ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Ústav letecké dopravy

Bo Stloukal

Kvalita ovzduší v okolí letišť během pandemie COVID-19

Bakalářská práce

Praha 2022

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta dopravní
děkan
Konviktská 20, 110 00 Praha 1

K621.....Ústav letecké dopravy

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bo Stloukal

Studijní program (obor/specializace) studenta:

bakalářský –LED– Letecká doprava

Název tématu (česky): **Kvalita ovzduší v okolí letišť během pandemie COVID-19**

Název tématu (anglicky): **Air Quality Near Airports During the COVID-19 Pandemic**

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je poskytnutí základního přehledu v problematice znečištění ovzduší vlivem letištního provozu a prozkoumání dopadů poklesu leteckého provozu vlivem pandemie v roce 2020 na místní kvalitu ovzduší s pomocí dostupných dat z vybraných letišť.
- Základní shrnutí problematiky znečištění ovzduší z hlediska přehledu zkoumaných látek, jejich původu v rámci leteckého provozu a vlivu na životní prostředí
- Přiblížení problematiky měření a monitorování kvality ovzduší
- Představení problematiky znečištění ovzduší v souvislosti s letištním provozem včetně přehledu hlavních zdrojů emisí
- Analýza dat o vývoji denních pohybů na pražském Letišti Václava Havla a hodnot zkoumaných látek v ovzduší naměřených místní měřicí stanicí v období 2019-2020 a vyhodnocení jejich vzájemného vztahu
- Ověření zjištěných poznatků v případě pražského letiště zkoumáním vývoje situace u dalších letišť

ČVUT FD

Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Letecký předpis L16/II – Ochrana životního prostředí – Emise leteckých motorů
ICAO Doc 9889 – Airport Air Quality Manual
EUROCONTROL Aviation Intelligence Portal: Airport traffic data

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jakub Hospodka, Ph.D.**

Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **8. srpna 2022**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE Fakulta dopravní

L. S.

doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.
vedoucí
Ústavu letecké dopravy

doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Bo Stloukal
jméno a podpis studenta

V Praze dne ..... 8. října 2021

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Ústav letecké dopravy

Kvalita ovzduší v okolí letišť během pandemie COVID-19

Bakalářská práce

Srpen 2022

Bo Stloukal

Abstrakt

Pandemie onemocnění COVID-19 v roce 2020 vedla v důsledku zavedení protiepidemických opatření omezujících cestování v mnoha zemích k bezprecedentnímu globálnímu poklesu úrovně letecké dopravy. V kontextu současné doby, kdy je stále více diskutováno o negativních dopadech letecké dopravy na životní prostředí, se jedná o jedinečnou příležitost na základě reálných dat prověřit vliv letištního provozu na kvalitu okolního ovzduší. Teoretická část práce poskytuje základní přehled o zkoumaných látkách v ovzduší včetně způsobu jejich měření a shrnuje problematiku zdrojů znečištění ovzduší v rámci letištního provozu. V praktické části práce probíhá analýza dat o pohybech na pražském ruzyňském letišti za roky 2019 a 2020 a jejich následné srovnání s daty o kvalitě ovzduší pořízenými letištní měřicí stanicí ve stejném období. Zjištěné poznatky jsou následně ověřeny zkoumáním vývoje situace u dalších letišť.

Klíčová slova

Kvalita ovzduší, letiště, pandemie COVID-19, LTO cyklus, emise, oxid uhelnatý, oxidy dusíku, pevné částice, ozon

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

FACULTY OF TRANSPORTATION SCIENCES

Department of air transport

Air Quality Near Airports During the COVID-19 Pandemic

Bachelor's thesis

August 2022

Bo Stloukal

Abstract

The COVID-19 pandemic led to an unprecedented fall in global air traffic in 2020 due to travel restrictions imposed by many countries. In the context of recent years, which have seen increasingly more discussions about the negative impact of air travel on the environment, it offers a unique opportunity to assess the impact of airport operations on local air quality using real data. The theoretical section of this thesis provides a general overview of the substances measured in the air including the methods of their measurement and sums up the topic of pollution sources within airport operations. In the practical section the traffic data for Prague airport from 2019 and 2020 are analysed and compared to air quality data measured by the airport measuring station over the same period. The findings from this are then verified by assessing the situation at other airports.

Keywords

Air quality, airports, COVID-19 pandemic, LTO cycle, emissions, carbon monoxide, nitrogen oxides, particulate matter, ozone

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli všechny podklady potřebné k vypracování této bakalářské práce. Především pak děkuji svému vedoucímu práce, panu doc. Ing. Bc. Jakubu Hospodkovi, Ph.D., za odborné vedení, trpělivost při konzultacích a všechny poskytnuté cenné rady a připomínky v průběhu psaní této práce. Srdečné poděkování patří také panu doc. Ing. Ivanu Nagyovi, CSc. z Ústavu aplikované matematiky FD ČVUT za velmi přátelský a obětavý přístup při konzultování postupu analýzy dat v rámci praktické části práce. Rád bych také poděkoval panu Ing. Petru Knápkovi a paní Lence Jalovecké z Letiště Praha za zprostředkování potřebných dat, bez nichž by tato práce nemohla vzniknout. Na závěr je mojí milou povinností poděkovat svým rodičům a blízkým za materiální i morální podporu, které se mi od nich dostávalo po celou dobu studia.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

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

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 8. srpna 2022

Podpis

Obsah

Seznam použitých zkratek 9
Úvod 11
1 Přehled zkoumaných látek v ovzduší 12
1.1 Oxid uhelnatý 12
1.2 Oxidy dusíku 13
1.2.1 Oxid dusnatý 14
1.2.2 Oxid dusičitý 15
1.3 Ozon 15
1.4 Pevné částice 16
1.5 Ostatní látky 17
1.5.1 Uhlovodíky 17
1.5.2 Oxid uhličitý 18
1.5.3 Oxid siřičitý 19
2 Problematika kvality ovzduší 20
2.1 Legislativní rámec pro monitorování kvality ovzduší 20
2.1.1 Legislativa EU 20
2.1.2 Legislativa ČR 22
2.2 Metody měření kvality ovzduší 24
2.2.1 Chemiluminiscence 24
2.2.2 Nedisperzní infračervená spektroskopie 25
2.2.3 Ultrafialová absorpční spektroskopie 26
2.2.4 Gravimetrická analýza 27
3 Letiště a znečištění ovzduší 28
3.1 Emisní inventáře 28
3.2 ICAO LTO cyklus 29
3.3 Hlavní letištní zdroje emisí 31
3.3.1 Letadla 31
3.3.1.1 Pohonné jednotky 31
3.3.1.2 Pomocné energetické jednotky 33
3.3.2 Pozemní odbavování letadel 34
3.3.3 Letištní infrastruktura 36
3.3.4 Provoz na okolních pozemních komunikacích 38
4 Metodika řešení 40
4.1 Data 40
4.1.1 Použitá data a jejich zdroje 40

4.1.1.1 Praha ... 41
4.1.1.2 Ostatní letiště ... 43
4.1.2 Postup zpracování dat ... 45
4.2 Postup základní analýzy dat ... 47
4.3 LTO emisní model – CO a NO_X ... 51
4.3.1 Matematické základy modelu ... 51
4.3.2 Modifikace ICAO LTO cyklu ... 54
4.3.3 Přiřazení emisních charakteristik k jednotlivým typům letadel ... 55
4.3.4 Zpětné odvození toku paliva a emisních indexů pro turbovrtulové motory ... 56
4.3.4.1 Výpočet hodnot palivového toku ... 56
4.3.4.2 Výpočet emisních indexů ... 58
4.3.5 Stanovení množství emisí jednotlivých pohybů ... 60
4.3.6 Seskupení emisí pohybů po hodinách ... 61
5 Prezentace výsledků ... 62
5.1 Amsterdam ... 62
5.2 Frankfurt ... 72
5.3 Praha ... 82
5.3.1 Základní analýza dat ... 82
5.3.2 Výsledky LTO emisního modelu ... 94
6 Diskuze výsledků ... 98
7 Závěr ... 109
Seznam použitých zdrojů ... 110
Seznam použitých obrázků ... 116
Seznam použitých tabulek ... 121
Přílohy ... i
Příloha č. 1: Seznam typů zahrnutých do LTO emisního modelu ... i
Příloha č. 2: Použité emisní a palivové charakteristiky letounů ... iv
Příloha č. 3: Použité emisní a palivové charakteristiky vrtulníků ... vii

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Český význam	Anglický význam
AMS	Letiště Amsterdam	Amsterdam airport
App	Přiblížení	Approach
APU	Pomocná energetická jednotka	Auxiliary power unit
ASU	Vzduchový startér	Air starter unit
ATA	Skutečný čas příletu	Actual time of arrival
ATD	Skutečný čas odletu	Actual time of departure
BHS	Badhoevedorp-Sloterweg	Badhoevedorp-Sloterweg
C/O	Stoupání	Climb-out
CO	Oxid uhelnatý	Carbon monoxide
CO_2	Oxid uhličitý	Carbon dioxide
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav	Czech Hydrometeorological Institute
EASA	Agentura Evropské unie pro bezpečnost letectví	European Union Aviation Safety Agency
EEA	Evropská agentura pro životní prostředí	European Environment Agency
EI	Emisní index	Emission index
FAA	Federální letecký úřad (USA)	Federal Aviation Administration (USA)
FEGP	Pozemní zdroj elektrické energie	Fixed electrical ground power
FFO	Frankfurt-Flughafen-Ost	Frankfurt-Flughafen-Ost
FN	Fotonásobič	Photomultiplier tube
FOCA	Federální úřad pro civilní letectví (Švýcarsko)	Federal Office of Civil Aviation (Switzerland)
FOI	Švédská obranná výzkumná agentura	Swedish Defence Research Agency
FRA	Letiště Frankfurt	Frankfurt airport
FSC	Obsah síry v palivu	Fuel sulfur content
GI-A	Volnoběh na zemi po přistání	Ground idle after arrival
GI-D	Volnoběh na zemi před vzletem	Ground idle before departure
GPU	Pozemní zdroj	Ground power unit
GSE	Pozemní vybavení	Ground support equipment
H_2O	Vodní pára	Water vapour
H_2SO_4	Kyselina sírová	Sulfuric acid
HC	Uhlovodíky	Hydrocarbons
HLNUG	Hesenský zemský úřad pro ochranu přírody, životní prostředí a geologii	Hessian Agency for Nature Conservation, Environment and Geology
CHOPN	Chronická obstrukční plicní nemoc	Chronic obstructive pulmonary disease
ICAO	Mezinárodní organizace pro civilní letectví	International Civil Aviation Organization
IFR	Pravidla pro let podle přístrojů	Instrument flight rules
IR	Infračervené	Infrared
LTO	Přistání a vzlet	Landing and take-off
N_2	Plynný dusík	Nitrogen gas
N_2O	Oxid dusný	Nitrous oxide
N_2O_3	Oxid dusitý	Dinitrogen trioxide
N_2O_4	Tetraoxid dusíku	Dinitrogen tetroxide
N_2O_5	Oxid dusičný	Dinitrogen pentoxide
NAAQS	-	National ambient air quality standards

NH_3	Amoniak	Ammonia
NMVOC	Nemetanové těkavé organické látky	Non-methane volatile organic compounds
NO	Oxid dusnatý	Nitrogen monoxide
NO_2	Oxid dusičitý	Nitrogen dioxide
NO_X	Oxidy dusíku	Nitrogen oxides
nvPM	Netěkavé pevné částice	Non-volatile particulate matter
O_2	Plynný kyslík	Oxygen gas
O_3	Ozon	Ozone
PAH	Polycyklické aromatické uhlovodíky	Polycyclic aromatic hydrocarbons
PM	Pevné částice	Particulate matter
PM_{10}	Hrubé částice s průměrem do 10 μm	Coarse particles with diameter less than 10 μm
$PM_{2,5}$	Jemné částice s průměrem do 2,5 μm	Fine particles with diameter less than 2,5 μm
ppm	Počet částic na milion	Parts per million
PRG	Letiště Praha	Prague airport
RIVM	Národní institut veřejného zdraví a životního prostředí (Nizozemsko)	National Institute for Public Health and the Environment (Netherlands)
RWY	Dráha	Runway
S	Síra	Sulfur
SARP	Standardy a doporučené postupy	Standards and recommended practices
SHP	Výkon na hřídeli	Shaft horsepower
SO_2	Oxid siřičitý	Sulfur dioxide
SO_X	Oxidy síry	Sulfur oxides
STA	Plánovaný čas příletu	Scheduled time of arrival
STD	Plánovaný čas odletu	Scheduled time of departure
T/O	Vzlet	Take-off
TIM	Doba trvání provozního režimu	Time in mode
TOBT	Cílový čas ukončení pozemního odbavení letadla	Target off-block time
TSAT	Cílový čas povolení spouštění motorů	Target start-up approval time
UHC	Nespálené uhlovodíky	Unburned hydrocarbons
UV	Ultrafialové	Ultraviolet
VOC	Těkavé organické látky	Volatile organic compounds

Úvod

V prvních měsících roku 2020 byl svět zasažen pandemií onemocnění COVID-19 způsobeného novým koronavirem SARS-CoV-2. Mnoho států ve snaze zamezit šíření viru zavedlo protiepidemická opatření zaměřená mimo jiné na omezení mobility populace, což mělo za přímý důsledek bezprecedentní pokles úrovně letecké dopravy ve většině zemí světa. Například v Evropě došlo naposledy k podobnému omezení letecké dopravy v roce 2010, kdy v důsledku erupce sopky na Islandu došlo ke krátkodobé uzávěře vzdušného prostoru a zrušení desítek tisíc letů.

V posledních několika desetiletích se stále více diskutuje o nepříznivých dopadech letecké dopravy na životní prostředí v souvislosti s emisemi, které kvůli ní vznikají. Například emise skleníkových plynů, z nichž nejvýznamnější je oxid uhličitý, se podílejí na skleníkovému efektu v atmosféře, jehož důsledkem je růst průměrné globální teploty. Kromě toho mají tyto emise rovněž dopad na místní ovzduší, především pak v blízkosti letišť. Zde se jedná o různé škodlivé látky, jejichž zvýšené koncentrace v ovzduší mohou mít negativní vliv na zdraví okolního obyvatelstva. Řada mezinárodních letišť si je této problematiky vědoma a například při plánování provozních strategií či budoucího rozvoje ji berou v potaz. Vzhledem k rostoucímu významu této problematiky se tedy aktuálně nabízí příležitost prozkoumat s využitím reálných dat z provozu, zda a jaký vliv měl útlum provozu na letištích způsobený pandemií COVID-19 na případnou změnu místní kvality ovzduší. Lze předpokládat, že toto bude v následujících letech předmětem vědeckého zkoumání.

Cílem teoretické části práce je představit základní poznatky týkající se této problematiky. Nejdříve budou představeny jednotlivé sledované látky z pohledu jejich vzniku v rámci letecké dopravy a jejich dopadů na lidské zdraví. Poté budou vysvětleny základní principy měření jejich koncentrací a rovněž bude popsán legislativní rámec pro jejich monitorování a regulaci. Následně bude tato problematika konkrétně propojena s provozem letiště.

Cílem praktické části práce je prozkoumat dopady útlumu provozu na letištích způsobeného pandemií na místní kvalitu ovzduší. Za tímto účelem budou analyzována data z několika evropských mezinárodních letišť (Praha, Amsterdam a Frankfurt) o letištním provozu za roky 2019 (před pandemií) a 2020 (během pandemie) a za stejné období také data o koncentracích jednotlivých zkoumaných látek v ovzduší naměřených místními měřicími stanicemi.

1 Přehled zkoumaných látek v ovzduší

Cílem následující kapitoly je představit v základním rozsahu problematiku znečištění ovzduší v souvislosti s provozem letecké dopravy z pohledu látek, které jsou během provozu uvolňovány do ovzduší. V rámci přehledu látek, na které se tato práce přímo zaměřuje, bude mimo jiné zmíněn jejich původ v rámci leteckého provozu a některé nepříznivé dopady na životní prostředí, respektive lidské zdraví. Některé látky budou zmíněny pouze pro úplnost na konci kapitoly vzhledem k tomu, že tato práce se na ně sice přímo nezaměřuje (například nejsou zahrnuty ve zkoumaných datech), nicméně v problematice vlivu na životní prostředí hrají důležitou roli.

1.1 Oxid uhelnatý

Oxid uhelnatý (CO) je bezbarvý plyn bez zápachu, který vzniká například při nedokonalém spalování uhlíkatých paliv, mezi něž patří i ta používaná v letectví. Má vysoce toxické účinky na lidský organismus, neboť po vdechnutí narušuje životně důležitý transport kyslíku v krvi, jelikož CO se váže na hemoglobin v krvi zhruba 200krát snadněji, než kyslík [1] [2]. Zdravotní účinky vystavení CO jsou různé v závislosti na jeho koncentraci; jejich přehled dle koncentrace udává tab. 1 [3]. Kromě počtu částic na milion (ppm) jsou zde udány koncentrace také v $\mu g/m^3$, přičemž tyto hodnoty byly vypočítány s pomocí příslušného převodního faktoru (1 150) dostupného v [1].

Tabulka 1: Účinky expozice CO v závislosti na jeho koncentraci [3] [1]

Koncentrace (ppm)	**Koncentrace ($\mu g/m^3$)**	**Zdravotní účinky při vystavení**
0-1	0-1 150	Bez účinků
9	10 350	Bez účinků; mezní koncentrace CO v ovzduší v EU
100	115 000	Mírná bolest hlavy po 1-2 h
200	230 000	Nevolnost, bolest hlavy a závratě po 2-3 h
400	460 000	Silná bolest hlavy a další symptomy, které se po 1-2 h zhoršují; nad 3 h je zvýšené riziko úmrtí
800	920 000	Nevolnost a závratě po 45 min, bezvědomí po 1 h, úmrtí po 2-3 h
1 600	1 840 000	Bolest hlavy a závratě po 20 min, úmrtí po 1-2 h
3 200	3 680 000	Bolest hlavy do 10 min, bezvědomí po 30 min, úmrtí do 1 h
6 400	7 360 000	Úmrtí do 30 min
12 800	14 720 000	Bezvědomí až úmrtí po 1-3 min

Z hlediska vlivu CO na životní prostředí je asi nejzásadnější jeho podíl na vzniku přízemního ozonu. Za pomoci hydroxylového radikálu oxiduje na oxid uhličitý a hydroperoxylový radikál, který dále reaguje s oxidem dusnatým. Jedním z produktů následného sledu reakcí je právě ozon [4]. O negativních účincích ozonu na životní prostředí bude blíže pojednávat podkapitola 1.3.

Vzhledem k toxickým účinkům CO je zřejmá důležitost jeho regulace. Předpis organizace International Civil Aviation Organization (ICAO) Annex 16/II, z nějž vychází český letecký předpis L16/II, stanovuje jeho limitní hodnoty v rámci ověřování emisní způsobilosti letadlových motorů. Zde jsou rozlišeny proudové a dvouproudové motory určené pro pohon při podzvukových rychlostech a při rychlostech nadzvukových. V prvním případě je jeho limitní hodnota dána poměrem $D_p/F_{oo} = 118\ g/kN$, kde D_p je obecně hmotnost látky vypuštěné během emisního referenčního LTO cyklu (viz kapitola 3.2) a F_{oo} je jmenovitý tah. V případě motorů určených k pohonu při nadzvukových rychlostech je limitní hodnota určená vztahem

$$D_p/F_{oo}^X = 4\,550 \cdot (\pi_{oo})^{-1,03}, \tag{1.1}$$

kde F_{oo}^X je jmenovitý tah při přídavném spalování a π_{oo} je referenční poměr stlačení[1] [5]. Nejvíce emisí CO letadlových motorů vzniká při nižším nastaveném výkonu motoru, kdy bývá teplota i tlak ve spalovací komoře motoru nižší a spalování paliva je tak méně účinné. To se týká především pojíždění, přičemž je odhadováno, že při tomto provozním režimu vzniká až o dva řády více emisí CO, než během vzletu. Jelikož letadla mají na letištích většinou nastavený spíše nižší výkon motorů, lze předpokládat, že mají významný podíl na celkových letištních emisích CO. Toto také prokázala řada studií, která se touto otázkou zabývala [2].

1.2 Oxidy dusíku

Oxidy dusíku jsou souhrnně označovány jako NO_X. Tato práce se bude detailněji zabývat pouze dvěma látkami patřícími do této skupiny, a sice oxidem dusnatým (NO) a oxidem dusičitým (NO_2). Právě na tyto dvě látky se rovněž zaměřuje předpis L16/II [5]. Pro úplnost je nicméně vhodné zmínit i některé další oxidy dusíku, jako například:

- Oxid dusný (N_2O)
- Oxid dusitý (N_2O_3)
- Tetraoxid dusíku (N_2O_4)
- Oxid dusičný (N_2O_5)

[1] L16/II: „*Poměr průměrného celkového tlaku u výstupu z kompresoru k průměrnému celkovému tlaku u vstupu do kompresoru při vzletovém tahu na hladině moře*“ [5]

Většina NO_X vzniká při spalování dusíku přítomného v atmosféře, který tvoří zhruba 79 % jejího složení. K tomu je potřeba vysoká teplota i tlak, což splňuje mj. spalování směsi paliva a okolního vzduchu v letadlových motorech. Malá část NO_X vzniká také na základě obsahu dusíkatých látek v palivu [1]. Jak již bylo řečeno, stejně jako v případě CO jsou emise NO_X letadlových motorů rovněž regulovány předpisem L16/II, přičemž se opět rozlišují motory pro pohon při podzvukových a nadzvukových rychlostech. V prvním případě závisí volba konkrétního vzorce pro určení mezního poměru D_p/F_{oo} na údajích jako je datum výroby motoru, poměr stlačení či jeho maximální jmenovitý tah. V případě motorů určených pro pohon při nadzvukových rychlostech se tento poměr určuje jediným vzorcem [5]:

$$D_p/F_{oo}^X = 36 + 2{,}42 \cdot \pi_{oo}. \tag{1.2}$$

Se snahou výrobců motorů zlepšovat palivovou účinnost v posledních letech dochází poněkud paradoxně ke zvyšování množství emisí NO_X. Důvodem jsou „příznivější“ podmínky pro jejich vznik, neboť s rostoucím poměrem stlačení v důsledku inovací roste teplota i tlak ve spalovací komoře motoru [6]. Vliv emisí NO_X vzniklých na letištích na místní koncentrace NO_X v ovzduší byl již předmětem řady studií, přičemž jejich závěry byly místy různé. Častým závěrem bylo, že tento vliv se stává znatelně slabším již od zhruba 2-3 kilometrů od letiště. Jedna studie pak identifikovala letadla jakožto dominantní zdroj letištních emisí NO_X, zatímco podle jiné byla hlavním zdrojem silniční vozidla. V blízkosti letišť pak byl podle těchto studií často rovněž podstatný vliv emisí NO_X pocházejících z provozu na pozemních komunikacích. Přesné určení vlivu letištních emisí NO_X na místní kvalitu ovzduší je často složité kvůli přítomnosti jiných zdrojů těchto látek v okolí [2].

1.2.1 Oxid dusnatý

Oxid dusnatý (NO) je bezbarvý plyn bez zápachu. Na lidský organismus má po vdechnutí toxické účinky; při nižších koncentracích způsobuje podráždění dýchacích cest, při vyšších koncentracích (nad 200 ppm neboli 246 000 μg/m^3 při použití převodního faktoru 1 230 [1]) může být smrtelný i při krátkodobém vystavení. Přesto je nutné zmínit, že ve srovnání s oxidem dusičitým jsou koncentrace, při kterých se projevují jeho nebezpečné účinky, mnohem vyšší. Kromě toho je NO důležitý pro lidský metabolismus [7]. Vzniká za vysoké teploty při oxidaci dusíku, který se vyskytuje v atmosféře ($N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$), a tedy tvoří podstatnou část všech NO_X vzniklých při spalování v motorech. Podle závěrů nedávných studií však u moderních letadlových motorů závisí na nastavení výkonu, přičemž emise NO obecně převládají pouze u vyšších výkonů. Jeho koncentrace v ovzduší postupně klesají s tím, jak dochází za přítomnosti ozonu k jeho oxidaci na oxid dusičitý (ovšem stejně tak může dojít ke štěpení oxidu dusičitého vlivem slunečního záření zpět na NO) [1] [2].

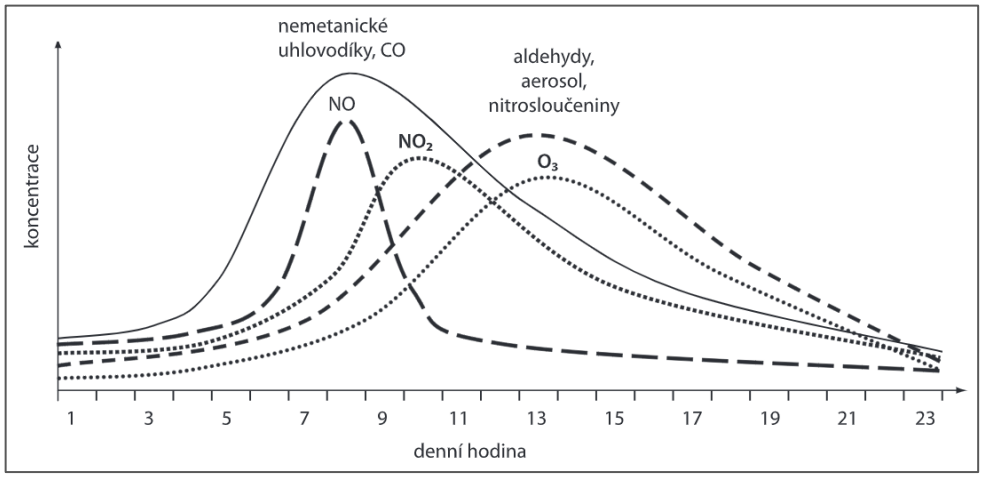
1.2.2 Oxid dusičitý

Oxid dusičitý (NO_2) se vyskytuje jako červenohnědý plyn se štiplavým zápachem. Zdraví jedinci jsou schopni jej detekovat čichem při koncentracích i pod 1 ppm (1 880 µg/m^3 [1]). Na lidský organismus má stejně jako NO toxické účinky, avšak ve srovnání s ním se tyto v případě NO_2 projevují již při nižších koncentracích. Kromě dráždivých účinků má při vdechnutí mimo jiné zánětlivé účinky na dýchací cesty, což může mít v krajních případech i fatální důsledky. Rizikovou skupinou jsou obecně osoby s respiračními potížemi, například astmatici či pacienti s chronickou obstrukční plicní nemocí (CHOPN) [8]. Oxid dusičitý je schopen absorbovat sluneční záření, především pak jeho ultrafialové (UV) spektrum, což je klíčové pro vznik tzv. fotochemického smogu. Tím, že je rovněž schopen reakcí s vodou v atmosféře vytvářet kyselinu, se také podílí na vzniku kyselých dešťů. S ohledem na zmiňované dopady NO_2 na lidské zdraví i životní prostředí je tedy zřejmá nutnost jeho regulace. Například americké standardy pro kvalitu ovzduší National ambient air quality standards (NAAQS) rozeznávají šest tzv. kriteriálních polutantů (látky splňující stanovená kritéria z hlediska vlivu na lidské zdraví nebo životní prostředí), mezi něž patří i NO_2 [1]. Kromě toho jsou limity průměrných hodinových a ročních koncentrací této látky stanovené také evropskou legislativou, jak bude zmíněno v podkapitole 2.1.

1.3 Ozon

Ozon (O_3) je bezbarvý až jemně namodralý plyn s charakteristickým zápachem při koncentracích pod 2 ppm (3 920 µg/m^3 [1]). Jeho toxické účinky se mohou projevit již při koncentraci zhruba 100 ppm (196 000 µg/m^3 [1]) při vystavení trvajícím jednu minutu. Po vdechnutí může způsobit akutní, případně chronické poškození plic, zvýšit jejich náchylnost vůči infekcím nebo citlivost na alergeny. V krajních případech hrozí i fatální plicní edém [9]. Může být jak přírodního, tak lidského původu. Dle výskytu v atmosféře se pak rozlišuje stratosférický a troposférický O_3. V případě stratosférického O_3 se jedná především o přírodní původ, kdy dochází k interakci UV záření s kyslíkem (O_2), který je jednou ze složek atmosféry. Tím vzniká takzvaná ozonová vrstva, která snižuje množství UV záření dopadajícího na zemský povrch. Troposférický neboli přízemní O_3 vzniká především vlivem lidské činnosti. V předešlých podkapitolách byl zmíněn podíl různých látek na vzniku tohoto typu O_3. Obecně se jedná především o NO_X, různé těkavé organické látky či například CO. Tyto látky spolu reagují a výsledným produktem série fotochemických reakcí, jejíž detailnější rozbor není předmětem této práce, je právě přízemní O_3. Jedná se zároveň i o látky, které bývají vypouštěné jako emise letadlových motorů. Některé z těchto látek se však rovněž mohou podílet na snižování koncentrace O_3 ve stratosféře a tím oslabovat ozonovou vrstvu [10] [2]. Obrázek 1 ukazuje zjednodušený časový průběh koncentrací těchto látek v atmosféře v rámci

jednoho dne včetně výsledné koncentrace O_3. Nárůst koncentrací NO_X a různých organických látek v ranních hodinách lze spojit s vyšší intenzitou provozu. S tím, jak v následujících hodinách jejich koncentrace klesají, lze naopak zpozorovat rostoucí koncentraci O_3, což je způsobeno probíhajícími fotochemickými reakcemi [4].



Obrázek 1: Spojitost mezi koncentracemi vybraných látek a přízemního ozonu [4]

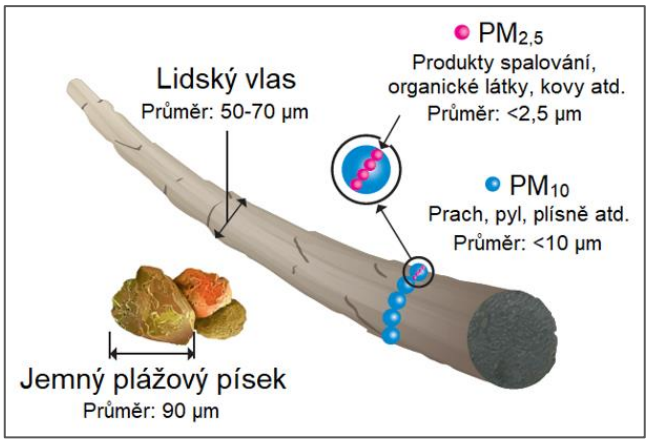
Ozon tedy není primárním polutantem, nýbrž sekundárním, protože nevzniká přímo v rámci konkrétní činnosti (v tomto případě spalování paliva v letadlových motorech), ale je produktem následných chemických reakcí mezi primárními škodlivinami [4]. Proto nejsou předpisem L16/II dány jeho limitní hodnoty v rámci ověřování emisní způsobilosti letadlových motorů [5].

1.4 Pevné částice

Pevné částice jsou také označované jako PM (z angl. Particulate Matter). Jedná se o pojem zastřešující celou řadu organických i anorganických pevných i kapalných látek, které spolu v ovzduší tvoří směsi částic mikroskopických rozměrů. Jelikož rozměry těchto částic mohou být různé, uplatňuje se v praxi jejich rozlišení dle průměru na následující:

- $PM_{2,5}$ – jemné částice s průměrem do 2,5 μm
- PM_{10} – hrubé částice s průměrem do 10 μm

Z pohledu dopadů na lidské zdraví bývají nebezpečnější jemné částice ($PM_{2,5}$), neboť mohou po vdechnutí proniknout až do průdušinek, kde zasahují do procesů výměny plynů. Znečištění ovzduší PM je celosvětový problém; jejich zdraví nebezpečným koncentracím je vystaveno více lidí, než u kterékoli jiné znečišťující látky. Ve městech se zvýšenými koncentracemi PM v ovzduší bývá úmrtnost až o 20 % vyšší ve srovnání s oblastmi, kde jsou jejich koncentrace nižší [1]. K ilustraci rozměru těchto částic slouží obr. 2.



Obrázek 2: Ilustrace měřítka velikosti pevných částic (přeloženo z [11])

Pevné částice, které bývají emitované leteckými motory, mají zpravidla malé průměry (v rozmezí 0,003-4 µm). Obecně je lze rozdělit na netěkavé a těkavé. Netěkavé PM (nvPM) jsou předpisem L16/II definované jako „*vypouštěné částice … v rovině výfuku trysky výstupních plynů turbínového motoru, které se při ohřátí na teplotu 350 °C neodpařují*“ [5]. Jedná se zpravidla o saze, které se tvoří při nedokonalém spalování paliva. Jejich rozměr se obecně pohybuje mezi 0,03–0,06 µm. Většinu těkavých PM tvoří sulfáty, které vznikají oxidací různých příměsí v palivu na bázi síry. Jejich zastoupení ve výfukových plynech je významnější ve srovnání se sazemi, a to až o dva řády [6]. Většina studií zkoumajících účinky PM na místní ovzduší v souvislosti s provozem letiště se zaměřuje především na jemné částice ($PM_{2,5}$). Jejich výsledky jsou různé; zatímco některé nenalezly žádnou souvislost mezi provozem na daném letišti a případnými zvýšenými koncentracemi $PM_{2,5}$ v jeho okolí, jiné tuto spojitost prokázaly. Podle jedné studie pak zvýšené koncentrace $PM_{2,5}$ v okruhu 20 kilometrů kolem letišť způsobí ročně přibližně třetinu ze všech zhruba 16 000 celosvětových předčasných úmrtí v souvislosti s emisemi z letectví [12].

1.5 Ostatní látky

Látky, které byly doposud představeny, jsou hlavním předmětem zkoumání této práce. Z hlediska dopadů letecké dopravy na životní prostředí je nicméně na místě pro úplnost zmínit i některé další látky, které jsou rovněž uvolňovány do ovzduší a také mají vliv na kvalitu ovzduší, případně klima jako takové. Právě o nich pojednávají následující oddíly.

1.5.1 Uhlovodíky

Uhlovodíky (HC) jsou obecně molekuly, které se skládají výhradně z atomů uhlíku a vodíku. Jejich emise z letadlových motorů zahrnují převážně nespálené molekuly kerosinu, které unikly zapálení ve spalovací komoře motoru a označují se jako tzv. nespálené uhlovodíky (UHC). Kromě nich se však mohou ve výfukových plynech vyskytovat i další uhlovodíky, které

jsou produktem různých chemických reakcí v motoru [6]. Mezi emise HC letadlových motorů patří různé těkavé organické látky (VOC); karbonyly (formaldehyd, aceton), aromatické uhlovodíky (benzen, toluen) či polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH), přičemž přesné zastoupení těchto látek v emisích HC je stále nejasné. Mnoho těchto látek má na člověka toxické účinky (např. benzen či řada PAH jsou známé karcinogeny), tudíž je zřejmá důležitost pokračujícího vědeckého výzkumu v této oblasti. Nicméně na základě údajů z emisních databank pro emise HC vyplývá, že obecně klesají s vyšším nastavením výkonu motoru, což souvisí s dokonalejším spalováním paliva při vyšších teplotách [2]. Předmětem zájmu předpisu L16/II z pohledu regulace jsou emise UHC. Za tyto látky předpis považuje všechny uhlovodíkové sloučeniny bez ohledu na druh nebo molekulární hmotnost. V případě proudových a dvouproudových motorů určených k pohonu při podzvukových rychlostech je jejich limitní hodnota daná poměrem $D_p/F_{oo} = 19{,}6\ g/kN$. V případě proudových a dvouproudových motorů určených k pohonu při nadzvukových rychlostech je tato limitní hodnota určená následujícím vzorcem [5]:

$$D_p/F_{oo}^X = 140 \cdot (0{,}92)^{\pi_{oo}}, \tag{1.3}$$

přičemž význam všech proměnných byl již popsán v předchozích podkapitolách.

1.5.2 Oxid uhličitý

Oxid uhličitý (CO_2) je bezbarvý plyn bez zápachu. Sám o sobě nemá na lidský organismus toxické účinky, ovšem vzhledem k tomu, že jeho hustota je větší než hustota vzduchu (zhruba 1,5krát), jej může z prostředí „vytlačit“. Tím může dojít k omezení přísunu kyslíku, jenž je jednou z příměsí vzduchu, pro lidský organismus, což může vést například k asfyxii [13]. Množství CO_2 emitovaného leteckými motory je přímo úměrné množství spáleného paliva; dle emisní kalkulačky ICAO Carbon Emissions Calculator je za každý kilogram spáleného paliva do ovzduší uvolněno přibližně 3,16 kg CO_2 [14]. Na tomto místě je důležité zmínit, že se jedná o skleníkový plyn a má tedy podíl na globálním oteplování. Jeho význam spočívá v jeho absolutním vypouštěném množství a dlouhé době setrvání v atmosféře. Například Kjótský protokol jej v tomto ohledu považuje za klíčovou látku. Právě letectví bývá jedním z často skloňovaných zdrojů jeho emisí (např. v roce 2005 představovaly emise z letectví zhruba 2,5 % globálních antropogenních emisí CO_2), přičemž v příštích letech až desetiletích je vzhledem k rozvoji letectví navzdory pokrokům v oblasti technologií a provozních postupů očekáván růst jeho emisí [6]. Předpis L16/II nepovažuje CO_2 za látku podílející se na znečištění ovzduší, a tedy přímo nereguluje jeho emise, avšak i tak vyžaduje v rámci certifikace motorů měření jeho koncentrací pro různé výpočetní a kontrolní účely [5]. Emisím CO_2 se podrobněji věnují předpisy L16/III a L16/IV, v této práci nebudou více rozebírány.

1.5.3 Oxid siřičitý

Oxid siřičitý (SO_2) je bezbarvý plyn se silným zápachem a se silnými toxickými účinky na lidský organismus při vdechnutí. Jeho dráždivé účinky na dýchací cesty se objevují již při koncentracích kolem 10 ppm (26 200 µg/m^3 [1]), výrazné zhoršení symptomů se objevuje při koncentraci zhruba 50 ppm (130 000 µg/m^3 [1]). Při vyšších koncentracích (v řádu stovek až tisíců ppm v závislosti na době vystavení) mohou být jeho účinky smrtelné [15]. Z historie lze v tomto kontextu zmínit například londýnský smog ze zimy roku 1952, který si mj. v důsledku zvýšených koncentrací SO_2 v ovzduší vyžádal přes 3 000 obětí [4]. Oxid siřičitý patří do skupiny oxidů síry (SO_X), přičemž z pohledu jejich emisí z letadlových motorů je jejich nejvýznamnějším zástupcem; v omezené míře pak vznikají i jiné sloučeniny, jako například kyselina sírová (H_2SO_4). Oxidy síry vznikají obecně oxidací různých látek na bázi síry v palivu. Ty mohou sice zlepšovat jeho mazivost, ovšem obecně je síra považovaná za nežádoucí součást paliv pocházejících z ropy; mj. z důvodu, že množství emisí SO_X je přímo úměrné jejímu množství v palivu [16] [6]. Zřejmým způsobem, jak redukovat letecké emise SO_2, je tedy snižování obsahu síry v palivu (FSC), což se již realizuje například u paliv určených pro silniční a námořní dopravu. Podle jedné studie by globální používání paliv s nízkým FSC v letectví (15 ppm ve srovnání s 400-600 ppm na začátku století) ročně představovalo náklady ve výši 1-4 miliard dolarů, ale ročně by potenciálně mohlo být zabráněno až 4 000 předčasným úmrtím v souvislosti se znečištěním ovzduší [2].

2 Problematika kvality ovzduší

Cílem následující kapitoly je přiblížit problematiku měření a sledování koncentrací látek, které byly představeny v předchozí kapitole. Kromě přehledu legislativních požadavků týkajících se kvality ovzduší na úrovni práva Evropské unie i České republiky bude pojednáno také o nejpoužívanějších měřicích metodách pro jednotlivé zkoumané látky.

2.1 Legislativní rámec pro monitorování kvality ovzduší

Cílem následující podkapitoly je poskytnout přehled o legislativních požadavcích na monitorování kvality ovzduší se zaměřením na evropské a národní předpisy.

2.1.1 Legislativa EU

Otázku kvality ovzduší na úrovni Evropské unie řeší směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/50/ES ze dne 21. května 2008 o kvalitě vnějšího ovzduší a čistším ovzduší pro Evropu. Hlavní oblasti zájmu této směrnice lze shrnout následovně:

- Zabraňování škodlivých účinků znečištění ovzduší na lidské zdraví či životní prostředí na základě opatření k udržení vyhovující úrovně kvality ovzduší
- Sledování kvality ovzduší včetně dlouhodobých trendů dle společného rámce
- Zajištění informovanosti veřejnosti v otázkách týkajících se kvality ovzduší
- Podpora mezinárodní spolupráce v rámci EU v otázkách týkajících se redukce znečištění ovzduší

Každý členský stát EU má směrnicí předepsáno určit orgány, které se mají postarat o splnění výše uvedených cílů [17].

Pro účely posuzování kvality ovzduší (zahrnující všechny metody měření, výpočtů, prognóz či odhadování) mají být v jednotlivých státech zřízené oblasti (dle směrnice tzv. „zóny“) zahrnující mj. aglomerace[2]. Posuzování kvality ovzduší a její řízení probíhá v každé takovéto oblasti. Předmětem posuzování v těchto oblastech jsou pak koncentrace SO_2, NO_X, PM_{10}, $PM_{2,5}$, olova, benzenu, CO a O_3. Pro všechny tyto látky s výjimkou O_3 platí shodné postupy z hlediska volby způsobu jejich monitorování (stacionární nebo orientační měření a modelování), která vychází z toho, zda sledované koncentrace převyšují stanovené prahy posuzování. Kromě toho směrnice pro jednotlivé zóny stanovuje také požadovaný počet měřicích lokalit a způsob

[2] Pojem „aglomerace“ je ve směrnici 2008/50/ES definován jako „*zóna, která je městskou aglomerací s počtem obyvatel vyšším než 250 000, [nebo případně zóna] s počtem obyvatel nižším nebo rovnajícím se 250 000 … s danou hustotou obyvatelstva na km² stanovenou členskými státy*“ [17]

volby jejich umístění. Zvláštní pozornost je kvůli nepříznivým dopadům na lidské zdraví věnována jemným částicím $PM_{2,5}$, respektive koncentracím jejich chemických složek, jejichž měření má probíhat i ve venkovských oblastech mimo významné zdroje znečištění ovzduší a je řízené dodatečnými kritérii. Pro tuto látku jsou pak směrnicí definované i tzv. celostátní cíle snížení expozice obyvatelstva. V případě O_3 platí odlišná kritéria z hlediska volby způsobu měření a umístění měřicích lokalit, přičemž důraz je zde kladený i na sledování jeho tzv. prekurzorů (tj. látek, které vedou k jeho vzniku; jak již bylo řečeno výše, O_3 je sekundární polutant), mezi něž patří především NO_X a některé VOC [17].

V kontextu ochrany obyvatelstva před nepříznivými zdravotními důsledky plynoucími ze znečištění ovzduší byly v případě některých látek směrnicí definovány mezní hodnoty jejich koncentrací. Tyto hodnoty pro látky zkoumané v práci jsou uvedené v tab. 2; kromě těchto látek jsou dále stanoveny limity i pro SO_2, benzen a olovo [17].

Tabulka 2: Mezní hodnoty koncentrací zkoumaných látek v ovzduší v rámci EU [17]

Látka	Doba průměrování	Mezní hodnota	Povolený počet překročení za kalendářní rok
NO_2	1 hodina	200 µg/m^3	18
	Kalendářní rok	40 µg/m^3	-
CO	8 hodin[3]	10 000 µg/m^3	-
PM_{10}	1 den	50 µg/m^3	35
	Kalendářní rok	40 µg/m^3	-
$PM_{2,5}$	Kalendářní rok	20 µg/m^3	-

Směrnice rovněž stanovuje referenční měřicí metody pro zkoumání koncentrací jednotlivých látek v ovzduší. Tabulka 3 poskytuje přehled těchto metod měření koncentrací pro ty látky, které jsou předmětem této práce [17].

Tabulka 3: Přehled referenčních metod měření koncentrací vybraných látek v ovzduší v rámci EU [17]

Látka	Norma	Metoda
NO_X	EN 14211:2012	Chemiluminiscence
CO	EN 14626:2012	Nedisperzní infračervená spektrometrie
O_3	EN 14625:2012	Ultrafialová spektrometrie
PM_{10}	EN 12341:2014	Gravimetrická analýza
$PM_{2,5}$	EN 12341:2014	Gravimetrická analýza

[3] Ze všech osmihodinových průměrů spočítaných pro daný den se volí jejich maximální hodnota [17]

Použití jiné metody je možné za předpokladu, že u ní lze prokázat dosažení rovnocenných výsledků, jako u výše uvedených referenčních metod [17]. Předpis L16/II stanovuje identické metody měření plynných emisí pro NO_X a CO, přičemž O_3 není předmětem tohoto předpisu a koncentrace pevných částic bývají vypočítané na základě koncentrací dílčích látek [5].

V roce 2016 vyšla směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2016/2284 o snížení národních emisí některých látek znečišťujících ovzduší, o změně směrnice 2003/35/ES a o zrušení směrnice 2001/81/ES. Směrnice má obecně za cíl řídit snižování antropogenních emisí (tj. emisí spojených s lidskou činností) řady látek; z látek zkoumaných v této práci se jedná o NO_X a $PM_{2,5}$, ostatní látky zahrnují SO_2, amoniak (NH_3) a nemetanové těkavé organické látky (NMVOC). Členské státy EU mají na základě svých stanovených národních programů omezit své roční antropogenní emise těchto látek, přičemž jako reference mají sloužit národní závazky ke snížení emisí pro období 2020-2029. Do těchto emisí se nezapočítávají emise z letadel kromě emisí spojených s tzv. přistávacím a vzletovým cyklem (LTO cyklus), který zahrnuje emise vzniklé na letišti a jeho bezprostředním okolí a blíže bude popsán v podkapitole 3.2. Směrnice dále ukládá povinnost členským státům každoročně zpracovávat emisní inventáře a k ní přiloženou informativní zprávu; každé dva roky pak také emisní prognózu. U těchto materiálů zároveň určuje náležitosti jako například potřebné údaje či postup zpracování. Tyto materiály mají být poté pravidelně předávány Evropské komisi a Evropské agentuře pro životní prostředí (EEA). Při zpracování emisního inventáře má být využita příručka zpracovaná EEA, přičemž jedna z jejích částí je věnovaná emisím z letadel [18]. Problematice emisních inventářů se věnuje podkapitola 3.1.

2.1.2 Legislativa ČR

Všechny právní předpisy rozebírané v tomto oddílu vycházejí z velké části z předpisových požadavků stanovených legislativou EU, které byly popsány výše. Problematiku znečištění ovzduší v ČR řeší zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší. Tento zákon stanovuje limity pro koncentrace škodlivin v ovzduší (tzv. imisní limity), předpisové požadavky na posuzování znečištění ovzduší či například jmenuje možné nástroje zmírňování znečištění či znečišťování ovzduší a určuje práva a povinnosti jednotlivých subjektů v této oblasti. Z tohoto hlediska například definuje zodpovědné orgány v oblasti ochrany ovzduší či podmínky autorizace zodpovědných osob a jejich povinnosti. Imisní limity stanovené tímto zákonem jsou shodné s limity stanovenými směrnicí 2008/50/ES, viz tab. 2. Zákon navíc oproti této směrnici stanovuje imisní limity pro obsah některých látek v částicích PM_{10}; konkrétně se jedná o arsen, kadmium, nikl a benzo(a)pyren. Stanovený imisní limit je u všech těchto látek shodně dán průměrnou koncentrací za jeden kalendářní rok. Zákon dále určuje náležitosti sledování kvality ovzduší; za tímto účelem například definuje seznam zón a aglomerací, kde má být kvalita

ovzduší sledována, či tzv. státní síť imisního monitoringu. Kromě imisních limitů řeší zákon také obecné postupy a povinnosti z hlediska provozu stacionárních zdrojů emisí; u nich například stanovuje povinnost sledování emisí z těchto zdrojů a pro každý rozlišovaný druh zdroje stanovuje požadavky (provedení rozptylové studie, vyhotovení provozního řádu v rámci udělení povolení k provozu nebo způsob měření emisí z tohoto zdroje). Z hlediska nástrojů určených ke zmírňování znečištění a znečišťování ovzduší jmenovaných a popsaných zákonem lze například zmínit Národní program snižování emisí ČR, místní programy zlepšování kvality ovzduší, zřizování tzv. nízkoemisních zón či vybírání poplatků za znečišťování. Zákon také například stanovuje povinnosti kolem využívání biopaliv či energie z obnovitelných zdrojů. Dále jsou také řešeny přestupky fyzických, právnických či podnikajících fyzických osob včetně příslušných sankcí [19].

Dalším českým právním předpisem, který pokrývá tuto problematiku, je vyhláška č. 330/2012 Sb., o způsobu posuzování a vyhodnocení úrovně znečištění, rozsahu informování veřejnosti o úrovni znečištění a při smogových situacích. Tato vyhláška stanovuje, jakým způsobem a za jakých podmínek má být posuzována kvalita ovzduší, respektive jeho znečištění. Například stejně jako evropská směrnice 2008/50/ES stanovuje způsob monitorování ovzduší v závislosti na míře překračování stanovených úrovní koncentrací škodlivin v ovzduší, či například shodným způsobem určuje požadovaný počet a polohu měřicích lokalit v závislosti na počet obyvatel konkrétní zóny. Dále se pak vyhláška věnuje vymezení požadavků na informování veřejnosti z hlediska aktuálního znečištění ovzduší s důrazem na smogové situace. Konkrétně například ukládá, že informace o koncentracích znečišťujících látek mají být aktualizovány každou hodinu; z látek zkoumaných v této práci se to týká NO_2, $PM_{2,5}$, PM_{10}, O_3 a CO. Vyhláška také určuje referenční metody pro měření koncentrací jednotlivých látek. Tyto jsou stejné jako v případě směrnice 2008/50/ES, přičemž oproti ní je tento seznam rozšířen o několik dalších látek; jmenovitě o benzo(a)pyren a další polycyklické aromatické uhlovodíky, rtuť, arsen a kadmium [20]. Tyto látky jsou totiž řešeny jiným evropským předpisem, konkrétně směrnicí Evropského parlamentu a Rady 2004/107/ES ze dne 15. prosince 2004 o obsahu arsenu, kadmia, rtuti, niklu a polycyklických aromatických uhlovodíků ve vnějším ovzduší, přičemž poslední úprava proběhla směrnicí Komise (EU) 2015/1480 ze dne 28. srpna 2015 [21]. Vedle metod měření vyhláška jmenuje i referenční modely pro provádění rozptylových studií i formální náležitosti protokolu o provedeném měření [20].

Poslední právní předpis, který zde bude popsán, je vyhláška č. 415/2012 Sb., o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. Tato vyhláška řeší problematiku emisí jako takových, konkrétně z pohledu

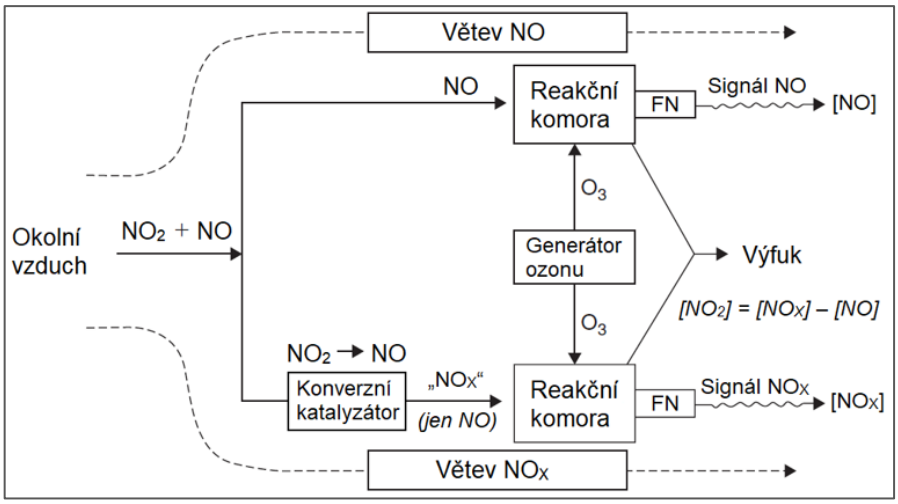
požadavků na jejich měření a dále jejich limitů z hlediska provozu spalovacích zdrojů, mj. z hlediska druhu použitého paliva či datumu uvedení do provozu. Dále jsou řešeny náležitosti kolem provozu zdrojů emisí, například požadavky na odsíření dle celkového jmenovitého tepelného příkonu. Zastoupeny jsou zde také různé průmysly, například chemický, potravinářský či energetický, a provoz s nimi související. Z hlediska požadavků na zjišťování úrovně znečištění je rozlišeno mezi jednorázovým a kontinuálním měřením emisí. V případě jednorázového měření emisí jsou vyhláškou stanoveny intervaly, jak často má být toto měření prováděno, a to s ohledem na druh zdroje emisí. Podle toho je rovněž předepsaný počet jednotlivých provedených měření a minimální doba jejich trvání (např. tři jednotlivá měření po půlhodině). Pro oba druhy měření jsou pak stanoveny požadavky na jejich následné vyhodnocení a také podmínky, za jakých posuzovat plnění daných emisních limitů. Vyhláška dále řeší problematiku spalování paliv, a to s důrazem na stacionární zdroje. Zde jsou řešeny i požadavky na kvalitu těchto paliv například z hlediska obsahu různých příměsí a rovněž jsou zde popsány technické podmínky provozu těchto zařízení. Zvlášť jsou pak řešeny stacionární zdroje, kde dochází k manipulaci s benzinem; zde jsou například řešeny požadavky na jeho plnění či skladování. Z hlediska dodržování emisních limitů vyhláška dále řeší ohlašovací povinnost, respektive formální náležitosti dokumentace k jejímu plnění [22].

2.2 Metody měření kvality ovzduší

V této podkapitole budou v základním rozsahu představeny některé z nejčastěji používaných metod měření koncentrací zkoumaných látek v ovzduší v rámci automatického monitoringu kvality ovzduší.

2.2.1 Chemiluminiscence

Metoda chemiluminiscence se používá pro měření koncentrací NO_X. Chemiluminiscence je obecně proces, kdy částice uvedená do excitovaného stavu v důsledku zisku energie při chemické reakci uvolňuje tuto energii ve formě elektromagnetického záření. Princip tohoto jevu použitý při stanovení koncentrací NO_X v ovzduší je následující. Na začátku dochází k reakci molekuly NO a O_3. Při této reakci vzniká molekula NO_2 v excitovaném stavu, která může do základního stavu přejít mj. vyzářením fotonu o energii rovné součinu Planckovy konstanty h a frekvence záření ν (dle vztahu $E = h \cdot \nu$ [1]). Intenzita výsledného záření je pak přímo úměrná koncentraci NO v okolním ovzduší. Přístroje měřící koncentrace NO_X proto využívají O_3, který je obvykle vytvářen ozářením kyslíku přítomného ve vzduchu UV zářením; alternativou je pak využití elektrického výboje o vysokém napětí. Příklad blokového schématu takového přístroje je zobrazený na obr. 3 [4] [1].

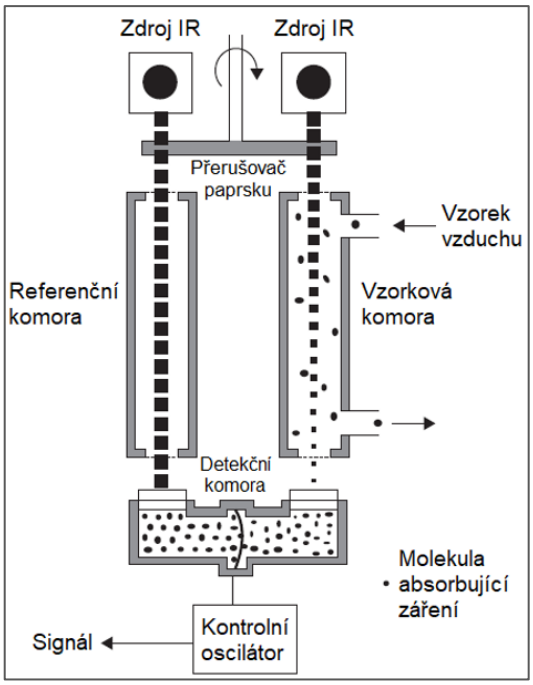


Obrázek 3: Blokové schéma zařízení měřícího koncentrace NO a NO_2 (přeloženo z [1])

Zařízení obsahuje dvě větve; jedna je určena pro měření koncentrace NO a druhá měří koncentrace NO_X, přičemž koncentrace NO_2 se následně vypočítá na základě rozdílu těchto dvou koncentrací. Do přístroje je přiveden vzduch z okolní atmosféry, přičemž jeho část putuje do větve určené k měření koncentrace NO. Ta je změřena tím, že k proudícímu vzduchu je z generátoru přiveden O_3, přičemž v reakční komoře dojde k výše popsané reakci, v jejímž důsledku dojde k emisi elektromagnetického záření. To je detekované fotonásobičem (FN) a převedené na elektrický signál, čímž je určena koncentrace NO v atmosféře. Stejným způsobem je konstruovaná i větev určená k měření koncentrace NO_X, ovšem zde je navíc před reakční komoru přidán konverzní katalyzátor, který redukuje NO_2 v proudícím vzduchu na NO. Následně stejným způsobem probíhá reakce s O_3, přičemž i zde je vyhodnoceno emitované elektromagnetické záření. Rozdíl je v tom, že tentokrát se ve zkoumaném vzorku vzduchu nenachází žádný NO_2 a o to více je v něm NO, tudíž výsledný elektrický signál musí být silnější. Rozdíl mezi oběma výslednými elektrickými signály tedy odpovídá koncentraci NO_2 v ovzduší. Pomocí principu chemiluminiscence lze při mírně odlišném postupu měřit také koncentrace O_3 [4] [1].

2.2.2 Nedisperzní infračervená spektroskopie

Pomocí nedisperzní infračervené spektroskopie jsou měřeny koncentrace CO. Spektroskopické techniky jsou obecně založené na fyzikálním principu, že různé látky mají různé absorpční pásy, což znamená, že každá látka má tendenci absorbovat elektromagnetické záření o určitém rozsahu vlnových délek, respektive frekvencí. Na základě této charakteristiky je tak možné určit, o kterou látku se jedná. Obzvláště dobře se pak v tomto ohledu pracuje s infračerveným (IR) zářením [4]. Příklad přístroje založeného na tomto principu je zobrazen na schématu na obr. 4 [1].

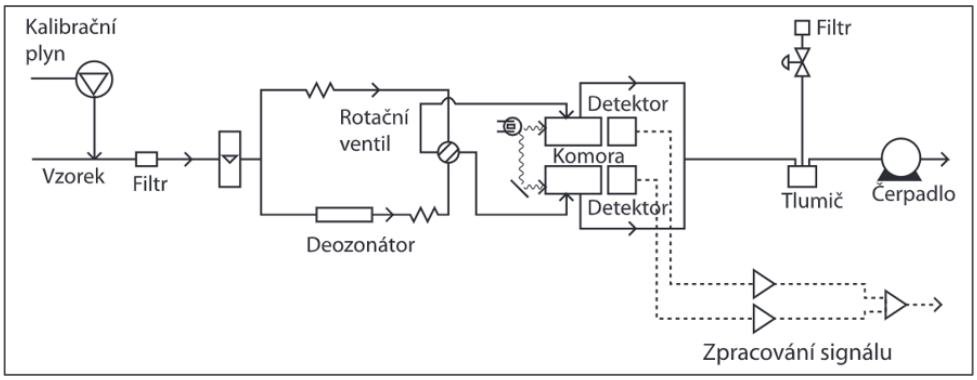


Obrázek 4: Schéma zařízení měřícího koncentrace CO (přeloženo z [1])

Zařízení obsahuje dva zdroje, přičemž z každého vychází IR paprsek. Oba paprsky prochází rotujícím přerušovačem paprsku, načež jeden putuje skrze referenční komoru obsahující plyn, který neabsorbuje IR záření (například lze použít dusík), a druhý putuje skrze vzorkovou komoru, přes kterou proudí analyzovaný vzorek vzduchu. V této komoře dojde k absorpci části IR záření CO přítomným ve vzorku, načež oba paprsky posléze dopadají na detekční komoru. Ta je rozdělena na dva oddíly naplněné CO a oddělené pružnou membránou. Na každý oddíl dopadá příslušný paprsek IR záření, přičemž nastává rozdíl v energii obdržené napříč oddíly, neboť paprsek, který prošel komorou obsahující vzorek vzduchu s CO, musí mít vzhledem k proběhlé absorpci menší energii. Tento rozdíl způsobí prohnutí pružné membrány a vznik elektrického signálu, z nějž je stanovena koncentrace CO přítomného ve zkoumaném vzorku vzduchu [1]. Mírně odlišnou metodou měření, byť stále založenou na stejném fyzikálním principu, je pak korelační infračervená spektroskopie s plynovým filtrem [4].

2.2.3 Ultrafialová absorpční spektroskopie

Tato metoda je používaná k měření koncentrací O_3. Její fyzikální princip je stejně jako v případě předchozí metody založený na schopnosti látek absorbovat určitá frekvenční pásma elektromagnetického záření. Jelikož O_3 dobře absorbuje UV záření (princip ozonové vrstvy), je v případě měření jeho koncentrací pomocí spektroskopie výhodné využít toto záření. Příklad měřicího zařízení využívajícího tento princip je schematicky zakreslen na obr. 5 [4].



Obrázek 5: Schéma zařízení měřícího koncentrace O_3 [4]

Na vstupu je do přístroje přiveden vzorek okolního vzduchu, který má být analyzován z hlediska koncentrace O_3. Ten je rozdělen do dvou větví, přičemž jedna z nich obsahuje tzv. katalytický deozonátor, který ze vzorku v této větvi odstraní obsah O_3. Obě větve následně vedou do rotačního ventilu, který zajišťuje, že do každé ze dvou měřicích komor jsou střídavě přiváděny plyny z obou větví, tj. vzorek s O_3 a bez O_3. Tyto komory jsou ozářeny UV zářením o dané vlnové délce, přičemž jeho výsledná intenzita je změřená fotonásobičem. Z něj vychází elektrický signál, který je následně zpracován. Výsledkem tohoto zpracování je hodnota koncentrace O_3 ve zkoumaném vzorku [4].

2.2.4 Gravimetrická analýza

Pomocí gravimetrické analýzy lze stanovit koncentrace pevných částic suspendovaných ve vzduchu; konkrétně se jedná o nejčastěji používanou techniku. Její základní princip spočívá v tom, že koncentrace pevných částic ve zkoumaném vzorku vzduchu lze určit na základě rozdílu hmotností použitých filtrů před a po analýze. Dva předem zvážené filtry jsou umístěné za sebou v jediném prostoru, kudy proudí zkoumaný vzduch. Filtr vystavený proudícímu vzduchu, na němž se zachytávají pevné částice, je tzv. vzorkový, a filtr za ním je kontrolní. Po měření jsou oba filtry zvážené, přičemž údaj o případné změně hmotnosti kontrolního filtru slouží k vytvoření korekčního faktoru při vážení vzorkového filtru. Jedná se o poměrně jednoduchou metodu, která není ve srovnání s ostatními výše popisovanými metodami natolik náročná z hlediska potřebných zdrojů [23].

Tato metoda je však rovněž citlivá na okolní podmínky, mezi něž patří například okolní vlhkost či teplota. Jelikož mezi pevné částice patří i různé těkavé látky, je nutné dbát na minimalizaci jejich ztrát výparem či tepelným nebo chemickým rozpadem, čehož lze docílit například hlídáním teplot použitých filtrů při jejich transportu do laboratoře, případně jejich neprodleným zvážením ihned po převzetí v laboratoři. Důležité je samozřejmě také pečlivé zacházení s filtry po celou dobu, což má zabránit nepřiměřeným hmotnostním ztrátám. V neposlední řadě může být zkreslujícím faktorem také přítomnost elektrostatického náboje na filtru [24].

3 Letiště a znečištění ovzduší

Následující kapitola pojednává o vztahu mezi letištěm a znečištěním místního ovzduší. Této problematice se věnuje dokument Airport Air Quality Manual (Doc 9889) vydaný organizací ICAO, který je zároveň i hlavním zdrojem informací v této kapitole. Jedná se o příručku, která shrnuje známé poznatky z této oblasti s důrazem na následující témata [25]:

- Legislativní standardy
- Inventarizace emisí
- Rozptyl emisí a disperzní modelování
- Měření letištní kvality ovzduší
- Snižování dopadů letištního provozu na životní prostředí

V následujících podkapitolách bude pozornost nejprve věnována vysvětlení problematiky inventarizace emisí a popisu tzv. LTO cyklu, který lze využít jako jednoduchý model pro odhad emisí z letištních pohybů a jehož modifikovaná podoba je rovněž použita v praktické části této práce. Poté budou popsány základní letištní zdroje emisí.

3.1 Emisní inventáře

Dokument ICAO Doc 9889 jmenuje dvě hlavní oblasti posuzování kvality ovzduší. První možností je disperzní modelování koncentrací škodlivin. Jedná se o pokročilejší přístup, který zkoumá rozložení emisí v prostoru i čase, přičemž je k tomu využíván počítačový software. Modelování emisí není předmětem této práce, a proto nebude tato oblast dále rozebírána; pro další studium této problematiky lze doporučit kapitoly 4 a 5 dokumentu Doc 9889. Druhý přístup spočívá ve využití tzv. emisních inventářů, jejichž základnímu představení se věnuje tato podkapitola. Emisní inventář obecně sleduje celkové množství emisí vypouštěné do ovzduší (např. jejich celkovou hmotnost), přičemž poskytuje základ pro plánování budoucích opatření sloužících ke zmírnění negativních dopadů na místní ovzduší či zajištění shody s příslušnými předpisovými požadavky [25].

Nejčastější cíle emisních inventářů bývají následující [25]:

- Sběr informací o emisích v rámci sledování současných trendů a predikce budoucích
- Neustálé porovnávání vlastních emisí s limity stanovenými předpisy
- Vytváření vstupních dat pro disperzní modely s cílem určit koncentrace škodlivin
- Stanovení referenční úrovně pro budoucí programy zmírňování negativních dopadů

Prvním krokem při vytváření emisního inventáře zpravidla bývá stanovení základních parametrů plánovaného inventáře. Jedná se o určení jeho cíle (viz výše), což může ovlivnit komplexnost použité metodiky; dále pak časového a prostorového vymezení (tj. jaká geografická oblast bude sledována a po jaké období) a četnosti aktualizace informací. Při této specifikaci je také podstatné stanovit, které látky mají být zahrnuty v emisním inventáři, což někdy bývá stanovené místní legislativou. Následně je nutné nalézt všechny zdroje emisí těchto látek v rámci sledované oblasti. Posledním krokem je kvantifikace emisí z těchto zdrojů, přičemž je zde nutná znalost příslušných emisních faktorů, vyjádřených jako jednotka hmotnosti emisí vztažená na vybranou provozní veličinu (např. hmotnost spáleného paliva, doba provozu či výkon zdroje), jejíž hodnotu je nutné znát. Při vytváření emisních inventářů je dále nutné hlídat kvalitu použitých dat v kontextu jejich limitací a nejistot s nimi spojených [25].

Je zřejmé, že čím vyšší je požadovaná přesnost emisního inventáře, tím detailnější a kvalitnější data jsou potřebná. V závislosti na tom, jak detailní jsou dostupná data, existují různě sofistikované metodiky výpočtu emisí z jednotlivých zdrojů; ať už letadel samotných, či například pozemní techniky. Složitost jednotlivých zvolených metodik nemusí být pro všechny zdroje stejná, ale měla by obecně být adekvátní tomu, jak detailní data byla využita. Výsledný letištní emisní inventář vznikne součtem emisí ze všech zkoumaných zdrojů [25]. V podkapitole 3.3 jsou dále popsány postupy pro výpočet emisí z některých těchto zdrojů. Jak již bylo řečeno v oddílu 2.1.1, při zpracování národních emisních inventářů má být členskými státy EU využita příručka vytvořená agenturou EEA, přičemž jedna z jejích částí se věnuje emisím z letadel. Tato například představuje problematiku zdrojů emisí v souvislosti s leteckými aktivitami, kategorizaci druhů letů pro účely inventarizace, navrhované metodiky s různou mírou sofistikovanosti v závislosti na dostupných datech, či problematiku nejistot spojených s použitými daty a metodikami pro jednotlivé zdroje emisí [26]. Příručka je zde zmíněná spíše pro přehled; pro účely této práce nebyla její metodika využita.

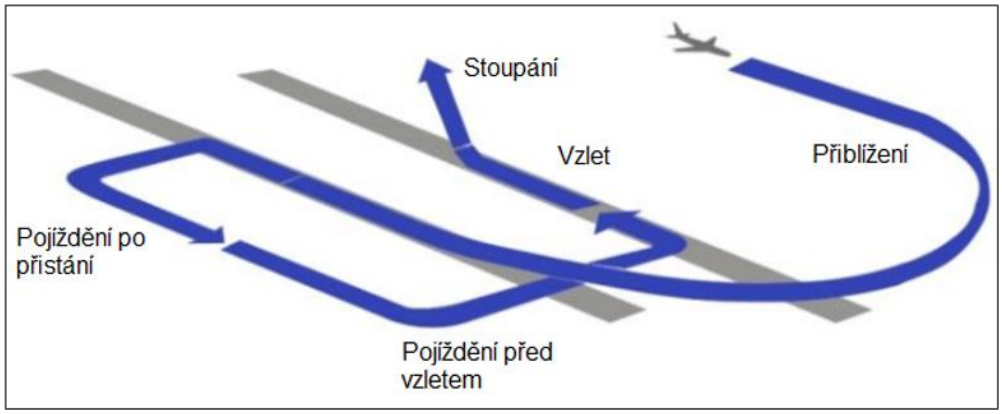
3.2 ICAO LTO cyklus

Referenční emisní cyklus přistání a vzletu (Landing and take-off cycle – LTO cyklus) je nástroj definovaný ICAO používaný v rámci certifikace letadlových motorů v kontextu jejich emisní zátěže, respektive dopadů na místní kvalitu ovzduší. Jedná se o model, který zjednodušeným způsobem popisuje provoz motoru během přistání, pobytu na letišti a následného vzletu. V rámci toho jsou definovány čtyři provozní režimy, přičemž pro každý z nich je stanovena jeho doba trvání a příslušné nastavení tahu. Při certifikaci motorů jsou na zkušebním exempláři pro tyto režimy měřeny plynné emise sledovaných polutantů (NO_X, CO, HC), kouř a též emise netěkavých pevných částic (nvPM) v souladu s příslušnými platnými ICAO Standardy a doporučenými postupy (SARP); výsledná data jsou pak zpřístupněna ve veřejné ICAO

emisní databance [27]. Postupům certifikace letadlových motorů se věnuje dokument ICAO Annex 16/II, z nějž vychází český předpis L16/II. Ten rozlišuje, zda je příslušný proudový či dvouproudový motor určený k pohonu při podzvukových, nebo nadzvukových rychlostech. Podle toho se mírně liší definované provozní režimy, respektive jejich doba trvání a příslušné nastavení tahu, a také některá specifika z hlediska postupu certifikace. Toto rozdělení je zde uvedeno pouze pro úplnost, a protože se práce věnuje pouze emisím z motorů určených pro provoz při podzvukových rychlostech, nebude zde dále rozváděno. Jednotlivé provozní režimy LTO cyklu v případě motorů určených pro provoz při podzvukových rychlostech včetně jejich příslušných dob trvání a nastavení tahu jsou popsané v tab. 4 [5] [25], pro lepší vizualizaci pak slouží doplňující ilustrace na obr. 6 [28].

Tabulka 4: Přehled provozních režimů LTO cyklu pro podzvukové proudové letouny [25]

Provozní režim		**Doba provozního režimu (min)**	**Tah (%)**
Vzlet		0,7	100,0
Stoupání		2,2	85,0
Přiblížení		4,0	30,0
Pojíždění a volnoběh na zemi	Po přistání	7,0	7,0
	Před vzletem	19,0	



Obrázek 6: Jednotlivé provozní režimy LTO cyklu pro podzvukové proudové letouny (přeloženo z [28])

Je nutné mít na paměti, že výše uvedené hodnoty dob trvání jednotlivých provozních režimů jsou čistě orientační a nelze je považovat za hodnoty reflektující reálný provoz. Ten je zcela zřejmě proměnlivý jednak napříč různými letišti, jednak na konkrétním letišti pro různé dny či dokonce denní dobu. Například v případě curyšského letiště byla doba vzletu v roce 2004 dvojnásobná, zatímco doba stoupání byla pouze čtvrtinová [29]. Hodnoty udávané ICAO byly původně získané na základě průzkumů realizovaných v 70. letech 20. století, přičemž měly odrážet především zhoršené, nikoli průměrné provozní podmínky. Jejich primárním cílem je poskytnout rámec pro technologické srovnání a prokazování emisní způsobilosti motorů. LTO cyklus lze použít pro jednoduché výpočty emisních inventářů, nicméně pro vyšší přesnost

jsou potřeba detailnější data o provozní situaci [25]. V této práci proto dochází k jeho mírné modifikaci, která je blíže popsaná v oddílu 4.3.2.

ICAO LTO cyklus se zaměřuje na letecký provoz do výšky 3000 ft (914 m) nad letištěm. Na základě této výšky jsou pak odvozeny doby provozních režimů pro přiblížení, vzlet a stoupání. Důvodem pro toto vertikální ohraničení je skutečnost, že do této výšky se zpravidla nachází inverzní vrstva atmosféry, přičemž škodliviny vypouštěné pod touto výškou mají tendenci mnohem více ovlivňovat místní kvalitu ovzduší. Jelikož byl LTO cyklus zaveden v kontextu sledování vlivu letecké dopravy na místní kvalitu ovzduší, je zřejmé, že má smysl do něj zahrnovat pouze ty emise, které na ni mají bezprostřední vliv [25].

3.3 Hlavní letištní zdroje emisí

V rámci letiště lze identifikovat řadu zdrojů emisí, které je možné kategorizovat různými způsoby. Dokument ICAO Doc 9889 je rozděluje podle původu do následujících kategorií [25]:

a) Letadla
b) Pozemní odbavování letadel
c) Letištní infrastruktura
d) Provoz na okolních pozemních komunikacích

V následujících oddílech budou tyto kategorie podrobněji prozkoumané.

3.3.1 Letadla

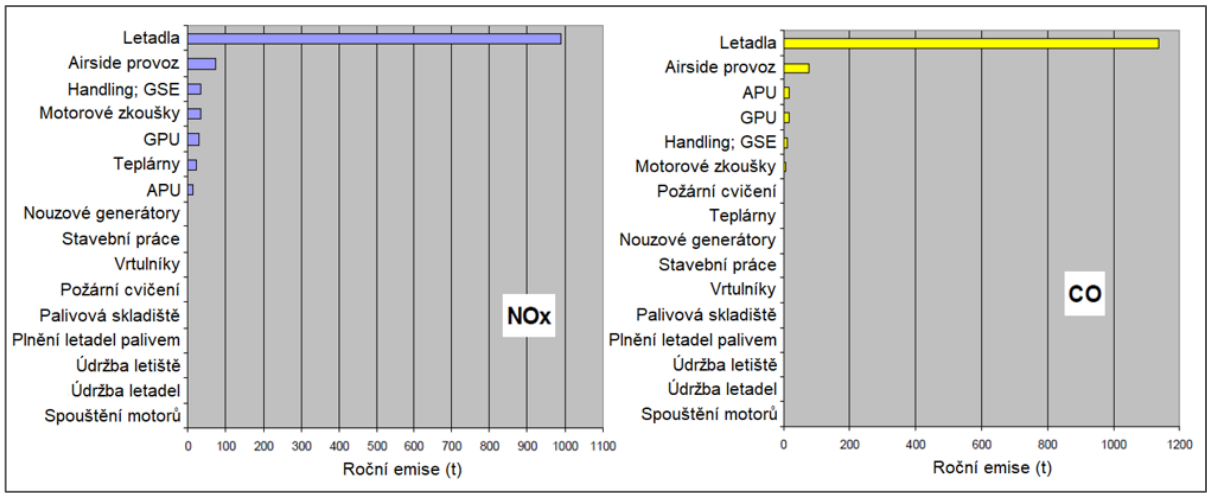
Vůbec nejvýznamnějším původcem emisí na letištích jsou samotná letadla. V souvislosti s jejich provozem lze identifikovat dva hlavní zdroje emisí:

a) Pohonné jednotky
b) Pomocné energetické jednotky

Oba tyto zdroje budou popsány zvlášť v následujících pododdílech.

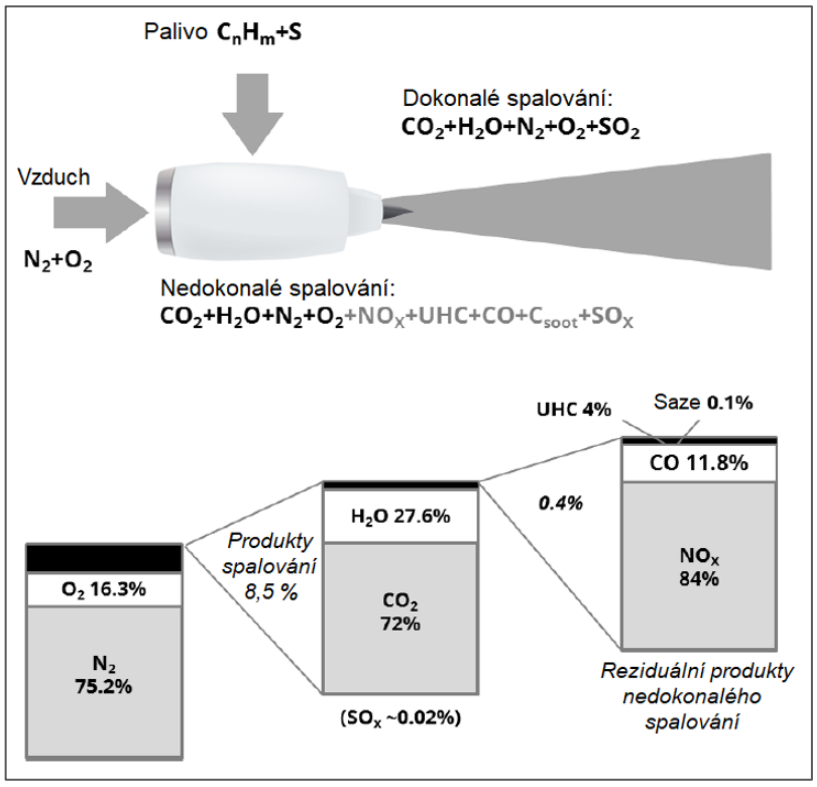
3.3.1.1 Pohonné jednotky

Problematika emisí z letadlových motorů již byla předmětem celé řady studií a ve srovnání s jinými zdroji letištních emisí o nich existuje mnohem více poznatků. Emise vzniklé na letišti v rámci provozu pohonných jednotek letadel jsou vůbec nejvýznamnější ze všech letištních zdrojů emisí [2]. Například podle studie kvality ovzduší zpracované pro curyšské letiště za rok 2004 bylo zjištěno, že emise z motorů letadel mají v případě NO_X a CO jednoznačně největší podíl na všech letištních emisích; jak je patrné na grafech na obr. 7 [29].



Obrázek 7: Emise dle jednotlivých zdrojů pro NO_X (vlevo) a CO (vpravo) na letišti Curych, 2004 (přeloženo z [29])

V obou případech byl na druhém místě automobilový provoz v rámci letištního areálu (airside), ten však nezaujímal ani desetinu oproti emisím z motorů letadel, zatímco emise CO z automobilového provozu v okolí letiště odpovídaly asi 30 % z emisí letadlových motorů [29]. K pochopení principu vzniku emisí z letadlových motorů může pomoci například obr. 8, který popisuje zjednodušeným způsobem proces spalování leteckého paliva v proudovém motoru.



Obrázek 8: Proces spalování paliva v proudovém motoru (přeloženo z [26])

Z obrázku vyplývá, že existuje rozdíl mezi dokonalým spalováním paliva a jeho reálným, nedokonalým spalováním. Do motoru vstupuje vzduch obsahující mj. plynný dusík (N_2) a kyslík (O_2), ve spalovací komoře motoru poté dochází ke spálení směsi vzduchu a paliva (C_nH_m)

s příměsí síry (S). Po ideálním spálení paliva zůstává na výstupu N_2, O_2, vodní pára (H_2O), CO_2 a SO_2, tj. dochází pouze ke spálení paliva a nikoli vzduchu. Ideální spalování paliva je však spíše teoretická záležitost; většinou jeho spalování bývá nedokonalé. Za takové situace pak vzniká celá řada dalších látek, jako například různé nespálené uhlovodíky (UHC), saze či NO_X (produkt oxidace N_2 za vysokých teplot). Tyto sice zastupují jen velmi malou část všech výstupních plynů z motoru (0,4 %), nicméně jejich význam je s ohledem na jejich nepříznivé zdravotní účinky nezanedbatelný. Emise některých látek jsou ovlivněné aktuální fázi letu. To souvisí s různými podmínkami (teplota, tlak) uvnitř spalovací komory motoru, které se mění v závislosti na požadovaném výkonu. Například při vyšším výkonu, kdy je ve spalovací komoře vyšší teplota, lze očekávat menší množství vypouštěných UHC [2] [16]. Existuje řada přístupů, jak vypočítat emise z motorů letadel v rámci letiště. Jeden z nich je využit v této práci; jeho popisu se věnuje podkapitola 4.3.

3.3.1.2 Pomocné energetické jednotky

Pomocná energetická jednotka (APU) je malý turbínový motor, který je propojený s elektrickým generátorem, zajišťující především na zemi dodávku elektrické energie palubním systémům a dodávající pneumatický či hydraulický výkon nutný při zapnutí motorů [2]. Letadlo na letišti má APU zpravidla v provozu v době, kdy stojí zaparkované na stojánce, pakliže není k dispozici jiný zdroj elektrické energie, jako např. pozemní zdroj (GPU). Obvykle bývá vypnuta, když jsou v běhu jeho motory, proto někdy dochází k jejímu zapnutí již během pojíždění letadla ke stojánce po přistání, pokud dojde z úsporných důvodů k vypnutí jednoho či více motorů. Některá letiště zavádějí omezení z hlediska doby provozu APU, například v souvislosti se zavedenými protihlukovými opatřeními [25] [30].

Na APU se oproti proudovým a dvouproudovým motorům nevztahují žádné předpisové požadavky ze strany ICAO. Z toho důvodu nebývají výrobci tak často zveřejňována vlastní data, která by bylo možné použít k výpočtu emisí APU tak, jako tomu je v případě emisí motorů letadel. Dokument Doc 9889 proto doporučuje při výpočtech používat především jednodušší postup, s nímž se samozřejmě pojí větší míra nejistoty. Spočívá v použití zprůměrovaných emisních charakteristik poskytnutých výrobci APU; jedná se tedy o čistě rámcové hodnoty. Hodnoty emisí vybraných látek při provozu jednotky po uvedenou dobu udává tab. 5. Primární dělení je zde podle doletu daného letadla; konkrétní kritérium dělení bylo převzato z dokumentu Doc 9889 [25].

Tabulka 5: Přehled emisí vybraných látek pro provoz APU dle doletu letadla [25]

Dolet letadla	**>8000 km**	**≤8000 km**
Doba provozu jednotky	45 minut	75 minut
Emise NO_X	0,70 kg	2,40 kg
Emise HC	0,03 kg	0,16 kg
Emise CO	0,31 kg	0,21 kg

Dle tohoto přístupu je možné hodnoty emisí přepočítat pomocí trojčlenky, tj. vynásobit je poměrnou změnou hodnoty doby provozu, pakliže je k dispozici nějaká její konkrétnější hodnota [25]. Vliv emisí APU na místní kvalitu ovzduší byl již předmětem řady studií, avšak mezi nimi i kvůli omezeným dostupným datům nepanuje jednoznačná shoda [2]. Podle zjištění studie z roku 2018 pak lze emise APU nejefektivněji redukovat s využitím pozemního zdroje elektrické energie (FEGP), a to celkově téměř o polovinu. Částečné redukce lze dosáhnout i zvýšením efektivity procesů spojených s odbavením na stojánce a také účinnějším odhadováním a předáváním cílového času ukončení pozemního odbavení letadla Target off-block time (TOBT), respektive cílového času povolení spouštění motorů Target start-up approval time (TSAT) sdělovaného letištní věží [31].

3.3.2 Pozemní odbavování letadel

Řada dalších zdrojů emisí v rámci letiště je spojená s různými procesy kolem pozemního odbavování letadel. V následujících odstavcích budou tyto zdroje emisí blíže popsané s ohledem na jejich kategorizaci dle dokumentu Doc 9889 [25].

První skupinou zdrojů je pozemní vybavení (GSE). Jedná se o obecný pojem zahrnující různá zařízení, která jsou využívána v rámci pozemního odbavování letadel na stojánce. Jsou navržena pro provoz při nízkých rychlostech, schopná pohybu v omezeném prostoru daném odbavovacím stáním. Obvykle bývají poháněna spalovacími motory, čímž se stávají zdroji emisí. Mezi GSE patří například GPU, klimatizační jednotky, vzduchový startér (ASU), pozemní tahače či nakladače zavazadel nebo nákladu [25]. Určení potřebného GSE pro daný let není přímočarou záležitostí, ale závisí na faktorech jako je typ letadla či druh provozu (let s cestujícími, nákladní let atd.); roli hraje také vybavení dostupné v rámci stání (například nástupní most, palivový hydrant či FEGP). Vliv může mít také politika leteckého dopravce či místní předpisy [32] [25]. Existuje několik způsobů, jak počítat emise z GSE. Vždy je nutné mít k dispozici data z provozu, která například zahrnují množství spotřebovaného paliva či dobu provozu jednotlivých zařízení. Jednodušší přístupy odhadují emise na základě počtu letištních pohybů či celkového množství spotřebovaného paliva (bez rozlišení jednotlivých zařízení), zatímco komplexnější metody zahrnují hlubší znalosti o provozu GSE (doba provozu

individuálních zařízení u jednotlivých obsluhovaných letů, přesné znalosti jejich emisních faktorů atd.) [25]. Otázku významnosti emisí z GSE v kontextu místní kvality ovzduší již řešila řada studií; podle některých se jedná o jeden z vůbec nejvýznamnějších zdrojů letištních emisí, podle jiných je jejich podíl ve srovnání s emisemi z letadel minimální [2] [29].

Další zdroje emisí na letišti zahrnují pozemní provoz převážně na obslužných komunikacích uvnitř letištního areálu; v rámci airside. Jedná se o různá servisní vozidla, jako např. autobusy přepravující cestující mezi terminálem a letadly na stáních, palivové cisterny či „follow-me“ vozidla; naopak se nejedná o GSE, o nichž pojednával předchozí odstavec. Protože je předpokládáno, že tyto emise nevznikají na místě, bývá obecným postupem vztahovat je nikoli k době jízdy vozidla, ale k ujeté vzdálenosti [25]. Jedním z možných způsobů, jak mohou letiště sledovat tyto emise, je sběr dat o provozu své flotily servisních vozidel, např. pomocí automatizovaných systémů či jiné evidence záznamů o jejich provozu. Klíčové zde je, aby byly k dispozici alespoň údaje o ujeté vzdálenosti, z nichž lze pomocí modelu odhadnout spotřebu paliva a následně tak vypočítat příslušné emise. Pokud jsou k dispozici údaje přímo o spotřebě paliva, lze při výpočtu aplikovat emisní faktory použitého paliva pro jednotlivé sledované látky [32].

Třetí skupinou jsou emise vzniklé při plnění letadel pohonnými hmotami. Na letištích se obecně používají dva základní způsoby plnění paliva, konkrétně s využitím mobilních prostředků nebo hydrantového systému s podzemním potrubním rozvodem. Ekologické riziko zde může představovat například porucha skladovacího zařízení či výskyt netěsnosti u rozvodního potrubí, což může způsobit únik paliva do půdy a tím kontaminaci podzemních vod [33]. V kontextu předmětu této práce jsou pak relevantní emise, které vznikají při výparu paliva; zde se jedná o emise VOC. K tomu může dojít například při plnění letadla palivem či při čerpání paliva cisternou ze skladovací nádrže, respektive při doplňování nového paliva do nádrže. Částečně pak k výparu paliva ze skladovací nádrže dochází samovolně, například v důsledku změny okolní teploty [32]. Z hlediska výpočtu těchto emisí jsou důležité údaje o typu paliva a hmotnosti paliva v kilogramech dodaného k letadlu včetně použitého způsobu dodání. Pro jednotlivé typy paliva je pak nutné mít k dispozici jejich příslušné emisní faktory v gramech VOC na kilogram plněného paliva. K výpočtu emisí VOC (E_{VOC}) slouží vzorec (3.1) doporučený v dokumentu Doc 9889:

$$E_{VOC} = (FH + 2 \cdot FT) \cdot EF, \tag{3.1}$$

kde FH je množství paliva v kilogramech dodané hydrantem, FT je množství paliva v kilogramech dodané cisternou a EF je emisní faktor v gramech VOC na kilogram paliva [25].

Poslední skupina definovaná dokumentem Doc 9889 zahrnuje emise vzniklé při odmrazování letadel (de-icing), případně v rámci aplikace protinámrazových postřiků (anti-icing) [25]. Tyto procesy jsou během zimních měsíců nutné z důvodu zachování provozní bezpečnosti; přičemž důraz je kladen na udržování nosných ploch a kormidel letadel bez námrazy. V rámci zimního provozu na letišti se kromě letadel musejí rovněž ošetřovat letištní provozní plochy; to je prováděno buďto mechanicky (s použitím sněhových pluhů, fréz či ofukovačů) či chemicky (např. s použitím močoviny) [33]. U letadel bývají typicky používány chemické roztoky, kdy se jedná o směs vody a účinné látky (propylenglykol či etylenglykol) o různých koncentracích (dle požadovaného úkonu). Tyto látky jsou však těkavé, tudíž během aplikace protinámrazových roztoků může docházet k jejich částečnému vypaření. Použití těchto roztoků tak přispívá především k místním emisím VOC [32]. Dokument Doc 9889 nabízí vzorec (3.2) pro výpočet těchto emisí (E_{VOC}):

$$E_{VOC} = DF \cdot DS \cdot W_{DS} \cdot EF, \tag{3.2}$$

kde DF je množství použité odmrazovací kapaliny v litrech, DS je podíl účinné látky v odmrazovací kapalině, W_{DS} je hustota účinné látky v kilogramech na litr a EF je emisní faktor účinné látky udávající množství emisí VOC v kilogramech na kilogram účinné látky [25]. Americký Federální letecký úřad (FAA) ve své emisní příručce dále rozlišuje mezi hodnotami tohoto emisního faktoru v případě ošetřování letadel a provozních ploch [32].

3.3.3 Letištní infrastruktura

Dalším zdrojem emisí spojených s letištním provozem dle dokumentu Doc 9889 je ostatní letištní infrastruktura. Jedná se zpravidla o stacionární zdroje emisí, mezi něž patří například boilery či dieselové generátory elektrické energie. Kromě toho jsou zde zahrnuty i emise související s údržbou či rozšiřováním této infrastruktury [25].

Část letištních emisí souvisí s výrobou energie, ať už tepelné či elektrické. Jedná se o emise z různých zařízení, v nichž bývají zpravidla spalována paliva na bázi uhlovodíků. Mezi tato paliva patří benzin, motorová nafta, ale například i uhlí či zemní plyn. Každé z nich má různé charakteristiky z hlediska produkovaných emisí, nicméně obecně jsou zahrnuty podobné látky, jako například u emisí z letadlových motorů; tedy CO, NO_X, HC či například PM_{10} [25]. Problematiku těchto stacionárních zdrojů pokrývá národní legislativa, o níž pojednávala podkapitola 2.1.2. Ta zahrnuje mj. postupy monitorování vzniklých emisí a jejich výpočtů. Kromě toho se emisím ze spalování paliv věnuje i příručka agentury EEA, která poskytuje metodiky pro výpočet emisí v rámci jejich inventarizace. V souvislosti s udržováním požadované úrovně provozní bezpečnosti probíhá na řadě letišť pravidelně výcvik místních požárních složek. Pro tyto účely bývají využívány nejrůznější požární simulátory. Při provádění

simulace požáru letadla pak bývá spalováno palivo, což může přispívat k emisím PM či jiných kouřových částic, ale také například CO či NO_X. Vzniklé emise jednotlivých látek se počítají jako součin množství spáleného paliva při cvičení a jeho jednotlivých emisních faktorů. V současné době existují tendence volbou vhodných paliv minimalizovat vznik kouře při těchto cvičeních; pro tento účel se například využívá propan či jiná paliva s nízkým kouřovým číslem [25] [32].

Dalšími emisemi jsou emise související s celou řadou údržbářských činností, ať už na letadlech, nebo v rámci letiště jako takového. Mezi aktivity tohoto typu, u nichž nejvíce vznikají emise, se řadí například aplikace různých postřiků či barev, především při vytváření nového nátěru letadla během údržby; dále pak tvorba nového značení provozních ploch nebo oprava či čištění povrchů obecně. V tomto případě primárně vznikají emise VOC, a to právě v souvislosti s těkavými látkami, s nimiž je pracováno. Mezi tyto látky patří různá ředidla, rozpouštědla či různé povrchové povlaky; konkrétně se například jedná o aceton, různé alkoholy či terpentýn. Údaje o těkavosti těchto látek lze zjistit z různých manuálů, bezpečnostních listů či jiných oficiálních materiálů. V posledních letech pak existují snahy výrobců barev minimalizovat podíl VOC v jejich složení. Při určování množství emisí z lakovacích činností je klíčové znát podíl jednotlivých látek, respektive jejich množství, a jejich obsah VOC. Dalším významným zdrojem emisí VOC spojených s těmito činnostmi je podle dokumentu Doc 9889 ošetřování letištních pohybových ploch při zimním provozu [25] [32]. Tato problematika již byla vysvětlena v oddílu 3.3.2 v souvislosti s odmrazováním letadel, přičemž zmiňované principy se pro ošetřování pohybových ploch zásadně neliší.

Nejrůznější emise mohou vznikat také při stavebních pracích na letišti. Například činnosti spojené s demolicí starých zařízení či různé zemní práce mohou přispět k emisím prachových částic (např. PM_{10}) [2] [25]. Tyto emise mohou být způsobeny i rozfoukáváním různých skladovaných stavebních materiálů do ovzduší. Během stavebních činností bývá využívána různá technika, ať už se jedná o buldozery či rypadla přímo na staveništi či nákladní vozy určené k přepravě nejrůznějšího nákladu z/na staveniště. Při provozu této techniky bývají do vzduchu uvolňovány výfukové emise. Tyto emise vznikají jednak přímo na místě, jednak také v širším okolí v souvislosti s jízdami nákladních vozidel a případně také vozidel přepravujících stavební dělníky. V neposlední řadě mohou během stavebních prací vznikat také emise z výparu různých látek při pokládání asfaltu. Kategorizaci jednotlivých aktivit v souvislosti s jejich výslednými emisemi řeší různé oficiální příručky, například již několikrát zmíněná příručka emisní inventarizace vydaná EEA. Při určení emisí ze stavebních činností jsou nejdůležitější údaje o emisních faktorech všech vozidel zapojených do prací, dále pak informace o jejich provozu; například o množství spáleného paliva či době provozu [32] [25].

3.3.4 Provoz na okolních pozemních komunikacích

Při zkoumání jednotlivých zdrojů emisí ve spojitosti s letištním provozem je také důležité vzít v potaz provoz na okolních pozemních komunikacích v rámci tzv. landside vedoucích přímo na letiště, čímž je zahrnut převážně silniční provoz související s letištěm. Dopravu z i na letiště využívají různé skupiny osob – samotní cestující, jejich doprovod nebo zaměstnanci letiště. Emise vzniklé z tohoto provozu lze například rozdělit na emise z hromadné a individuální dopravy. V případě hromadné dopravy představuje největší emisní zátěž autobusová doprava, zatímco kolejová doprava je v případě elektrické trakce z hlediska místních emisí ekologičtější alternativou. U individuální dopravy se pak jedná převážně o automobilovou dopravu (počítají se zde osobní automobily i vozy taxi), jejíž emisní zátěž je v přepočtu na přepravované osoby pochopitelně větší, než v případě autobusové dopravy [33]. Kromě přepravy cestujících je také nutné zohlednit přepravu nákladu z i na letiště, jelikož mnoho mezinárodních letišť má kromě terminálů pro cestující i logistické terminály určené pro nákladní leteckou dopravu. Celkovou intenzitu provozu na těchto komunikacích ovlivňuje několik faktorů. V prvé řadě závisí na efektivnosti uspořádání letiště a přilehlých pozemních komunikací. Dalším faktorem je dostupnost více alternativních způsobů dopravy na letiště, kdy například přítomnost kvalitního železničního spojení s letištěm může přispět k redukci provozu na pozemních komunikacích. Kromě toho je zřejmé, že vliv musí mít také počet osob cestujících z a na letiště, respektive množství přepravovaného nákladu. Na velkých mezinárodních letištích budou tedy tyto emise mít z pohledu vlivu na kvalitu místního ovzduší větší význam [2].

Při určování emisí z provozu na pozemních komunikacích v okolí letiště je možné zvolit řadu přístupů v závislosti na tom, jaká data jsou k dispozici a jaká je přijatelná úroveň výpočetní náročnosti. Tyto přístupy navrhované dokumentem Doc 9889 se obecně podobají klasickým postupům při emisní inventarizaci provozu na pozemních komunikacích. Před posouzením těchto emisí je nejprve nutné vymezit geografickou oblast kolem letiště, která má být zkoumána. Může zahrnovat pouze příjezdové cesty a parkoviště u letištního terminálu, nebo například okolní komunikace s výrazným podílem provozu souvisejícího s letištěm. Kromě vymezení geografického rozsahu zkoumání je také důležité stanovit časový rámec. Jedná se o dobu, za kterou mají být počítány hodnoty emisí. Nejobvyklejší a zároveň nejjednodušší postup je počítat emise za daný kalendářní rok, a to na základě údajů o celkovém ročním objemu provozu, celkové ujeté vzdálenosti všemi vozidly či podílu různých typů vozidel. Obecný vzorec pro výpočet emisí ze silničního provozu může být například následující [25]:

$$E = RL \cdot NV \cdot EF, \tag{3.3}$$

kde RL je délka komunikace v kilometrech, NV je počet vozidel na silnici a EF je příslušný emisní faktor v gramech emisí dané látky na vozokilometr [25].

Komplexnější přístupy například rozlišují denní špičky a sedla a nejsofistikovanější modely umožňují sledovat emise za jednotlivé hodiny za použití detailních informací jako sklony vozovky či údaje o individuálních vozidlech. Informace o zastoupení jednotlivých typů vozidel lze při použití jednodušších přístupů například čerpat z národních databází, v případě komplexnějších přístupů je vhodnější měření silničního provozu na letišti. V kontextu počítání emisí ze silničních vozidel jsou také důležité údaje o jejich rychlosti. Tyto lze brát buďto jako celkovou průměrnou hodnotu, případně jako průměrnou hodnotu pro jednotlivé silniční segmenty; u sofistikovaných přístupů bývají doplněné i daty z měření. Podobným způsobem, jako je popsaný vzorcem (3.3), lze spočítat i emise vzniklé při stání na místě se zapnutým motorem. Jediný rozdíl spočívá v tom, že místo parametru ujeté vzdálenosti RL je zde dosazena doba zapnutého motoru v minutách a příslušný emisní faktor EF je v gramech emisí dané látky na minutu zapnutého motoru [25].

4 Metodika řešení

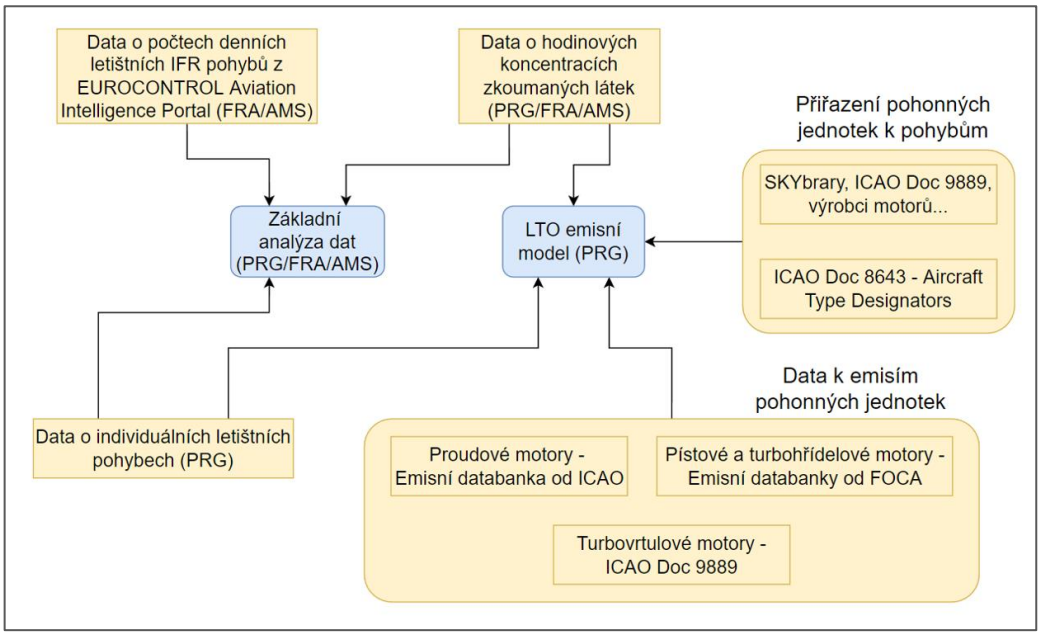
Tato kapitola se věnuje popisu metodiky řešení zkoumané problematiky v rámci této práce. Nejprve budou představena použitá data včetně jejich zdrojů a způsobu jejich zpracování před provedením následné analýzy. Dále budou představeny zvolené postupy základní analýzy dat a poté bude vysvětlena podstata vlastního emisního modelu sloužícího pro doplňující analýzu.

4.1 Data

V této podkapitole budou představena data, která byla použita v této práci. Důraz zde bude kladen především na jejich původ, relevantní zkoumané parametry a způsoby jejich zpracování před provedením samotné analýzy.

4.1.1 Použitá data a jejich zdroje

Obrázek 9 popisuje datový model praktické části práce. Jsou zde uvedeny veškeré zdroje dat, s nimiž bylo pracováno. V rámci analýzy dat je zde rozlišeno mezi základní analýzou dat, která byla provedena pro všechna tři letiště, a LTO emisním modelem zahrnujícím CO a NO_X, který byl aplikován pouze pro pražské letiště (PRG) a jehož popisu se věnuje podkapitola 4.3. Toto rozlišení bylo dáno dostupností dat, která byla limitující z hlediska možností analýzy dat. Postupu využití těchto dat se dále věnují následující pododdíly.



Obrázek 9: Datový model praktické části bakalářské práce

V rámci práce byl zkoumán vliv poklesu letištního provozu v roce 2020 na místní kvalitu ovzduší. Před analýzou dat bylo nejprve nutné stanovit, jakým ukazatelem budou tyto veličiny reprezentovány. Pro kvantifikaci letištního provozu byl zvolen ukazatel v podobě počtu

realizovaných denních pohybů na daném letišti. Kvalita ovzduší byla pro každou látku zvlášť vyjádřená hodnotou průměrné naměřené denní koncentrace; toto bylo praktické i z důvodu nutnosti nastavení stejného měřítka dat pro analýzu.

4.1.1.1 Praha

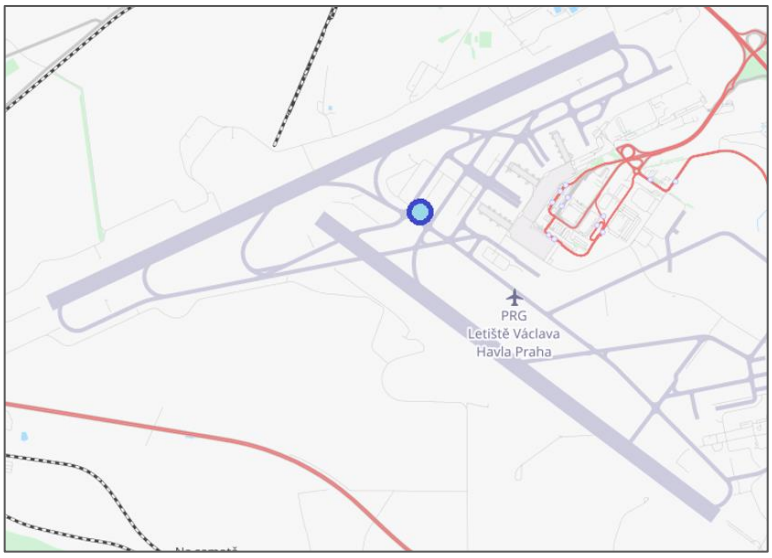
Pro účely této práce byla přímo pražským ruzyňským letištěm poskytnuta data o letištních pohybech za roky 2019 a 2020. Pro každý pohyb byly k dispozici následující údaje:

- Skutečný čas příletu (ATA) / Skutečný čas odletu (ATD)
- Plánovaný čas příletu (STA) / Plánovaný čas odletu (STD)
- Typ letadla (dle typového identifikátoru uvedeného v ICAO Doc 8643 [34])
- Typ pohybu (přílet/odlet)
- Dráha (RWY) použitá pro daný pohyb
- Druh motoru (proudový/turbovrtulový/pístový/turbohřídelový)

Pro následné vyhodnocení byly z hlediska časových údajů týkajících se daného pohybu relevantní pouze časy ATA či ATD, jelikož časy STA a STD jsou teoretické údaje, s nimiž nelze při vyhodnocování dopadů reálného provozu počítat. Toto je zřejmé zejména za situace, kdy vlivem zpoždění nastává výrazná prodleva mezi plánovaným a skutečným časem příletu/odletu, jejíž nezohlednění by do výsledků vneslo chybu (nebyly by správně spojené pohyby s příslušnými naměřenými koncentracemi látek v ovzduší). Informace o typu letadla pro daný pohyb byla důležitá kvůli spárování s konkrétním modelem pohonné jednotky (viz schéma na obr. 9) a následnému stanovení emisního odhadu pro daný pohyb, pro což bylo rovněž nutné upřesnit, zda se jednalo o přílet či odlet. Údaj o druhu motoru byl relevantní kvůli rozdílným postupům výpočtu emisí pro různé druhy motorů (viz níže), ovšem vzhledem k tomu, že tato informace de facto vyplývala i z typového identifikátoru, respektive následně stanoveného použitého motoru, nebylo nezbytně nutné s tímto údajem pracovat. Údaj o použité dráze daným pohybem nebyl využit vzhledem k použitým zjednodušením, která mj. zanedbala otázku trojrozměrného rozptylu emisí, jejíž vzetí v potaz by bylo nad výpočetní možnosti práce. Na základě těchto dat byly pro základní analýzu dat určeny údaje o počtu pohybů na ruzyňském letišti za každý den v rámci zkoumaného období.

Data o kvalitě ovzduší na ruzyňském letišti byla rovněž poskytnuta provozovatelem letiště. Jednalo se o data hodinových koncentrací látek naměřených místní měřicí stanicí ALERA. Stanice patří do celorepublikové sítě stanic Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) měřících kvalitu ovzduší. Její klasifikace je T/S/C, což znamená, že se jedná o dopravní měřicí stanici umístěnou v předměstské oblasti, přičemž okolní oblast je charakterizována jako

obchodní. Její reprezentativnost je udávána v měřítku 0,5-4 km, což pokrývá celý perimetr letiště včetně nejbližších obcí. Její umístění v areálu letiště ukazuje obr. 10 (poloha na mapě vyznačená modrým kruhem) [35].



Obrázek 10: Mapa pražského letiště s vyznačenou polohou měřicí stanice ALERA (OpenStreetMap)

Stanice zajišťuje měření koncentrací následujících látek:

- Oxidy dusíku (NO_X)
- Oxid dusnatý (NO)
- Oxid dusičitý (NO_2)
- Oxid uhelnatý (CO)
- Ozon (O_3)
- Jemné částice ($PM_{2,5}$)
- Hrubé částice (PM_{10})

Koncentrace všech uvedených látek jsou stanicí měřené od listopadu 2016 s výjimkou CO a O_3, jejichž koncentrace jsou měřeny až od srpna 2019 [36].

V poskytnutých datech se objevovaly hodinové mezery; tyto byly podle sdělení Ing. Knápka z Útvaru životního prostředí Letiště Praha obecně způsobené pravidelnou kalibrací měřicích přístrojů. Kromě toho se zde méně často objevovaly delší, několikahodinové mezery. Tato data tedy bylo nejprve nutné zpracovat a tyto mezery doplnit odhadem pomocí lineární interpolace na základě okolních hodnot, čemuž se detailněji věnuje oddíl 4.1.2. Součástí poskytnutých dat byly také některé doplňující statistiky, mezi něž například patřila maximální, minimální nebo průměrná koncentrace jednotlivých látek za daný den, avšak tyto nebyly využity. Pro účely práce byla relevantní pouze denní průměrná koncentrace, jejíž hodnota byla

získaná po zmiňovaném doplnění chybějících dat. Ukázku naměřených dat včetně nevyužitých denních statistik a mezery související s kalibrací přístrojů poskytuje tab. 6.

Tabulka 6: Ukázka dat naměřených stanicí ALERA

Stanica: Veličina: Jednotka:	4201=LetistePraha NO=no ug/m3	4201=LetistePraha NO2=no2 ug/m3	4201=LetistePraha NOx=nox ug/m3	4201=LetistePraha O3=ozone ug/m3	4201=LetistePraha CO=co ug/m3	4201=LetistePraha PM10=dust 10um ug/m3	4201=LetistePraha PM25=dust 25um ug/m3
02.05.20 01:00:00	0,6	4,7	5,7	53,1	241,9	0,5	4,3
02.05.20 02:00:00	0,6	4,6	5,5	50,8	239,2	2	3,4
02.05.20 03:00:00	0,6	5	6	48	233,7	6,8	3,6
02.05.20 04:00:00	0,5	6,3	7,2	41,8	232,5	7,7	2,2
02.05.20 05:00:00	1	6,8	8,3	45,1	236,9	5,1	-0,5
02.05.20 06:00:00	1,7	5,6	8,2	43,6	243,5	5,2	2,3
02.05.20 07:00:00	1,9	4,3	7,2	52,4	234,8	5,4	4
02.05.20 08:00:00	1,4	4,1	6,2	56,6	231,6	5,5	1,7
02.05.20 09:00:00	1,7	3,9	6,5	63,2	225,8	5,7	0,3
02.05.20 10:00:00	0,9	3,5	4,9	75,1	223	15,3	0,9
02.05.20 11:00:00	0,9	3,6	5	74,5	223,3	8	1
02.05.20 12:00:00	211.9 C	22.6 C	347.5 C	71,4	8465.0 C	5,6	0,6
02.05.20 13:00:00	1,5	3,5	5,9	74,6	243	5,3	0,9
02.05.20 14:00:00	1,4	3	5,1	83,9	219,6	7,4	1
02.05.20 15:00:00	1,3	2,9	4,9	87,7	215,4	9,8	1,8
02.05.20 16:00:00	1,3	3,1	5,1	88,4	223,4	14,5	2,3
02.05.20 17:00:00	0,7	3,9	5	83,2	233,7	16,8	1,8
02.05.20 18:00:00	0,7	4,2	5,4	84,3	225,5	13,5	3,1
02.05.20 19:00:00	0,5	6,1	7	77,5	228,7	8,8	3,2
02.05.20 20:00:00	0,5	9	9,7	65,6	246,7	5,3	2,1
02.05.20 21:00:00	0,6	7,8	8,7	69,5	229,3	6,3	3,6
02.05.20 22:00:00	0,5	5,3	6	70	236	7,1	4,9
02.05.20 23:00:00	0,4	5,4	6,1	32.9 C	240,3	5,3	4,5
03.05.20 00:00:00	0,8	4,4	5,5	64,5	238,8	7,7	5,9
Platných	23	23	23	23	23	24	24
Minimum	0,4	2,9	4,9	41,8	215,4	0,5	-0,5
Maximum	1,9	9	9,7	88,4	246,7	16,8	5,9
Priemer	1	4,8	6,3	66,3	232,4	7,5	2,5
Dátum minima	23:00:00	15:00:00	10:00:00	04:00:00	15:00:00	01:00:00	05:00:00
Dátum maxima	07:00:00	20:00:00	20:00:00	16:00:00	20:00:00	17:00:00	00:00:00

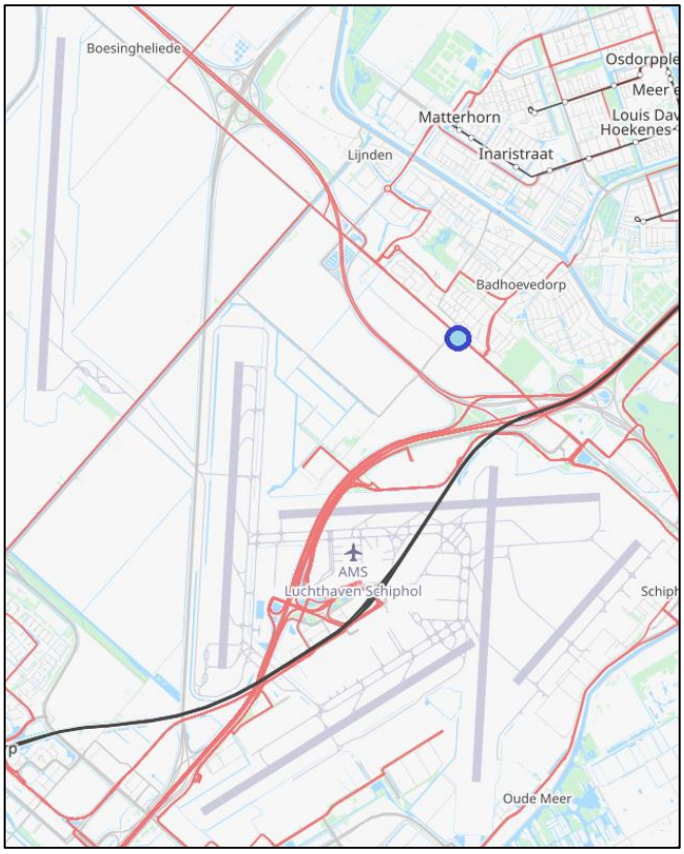
4.1.1.2 Ostatní letiště

Všechna data týkající se ostatních letišť pocházela pouze z volně dostupných zdrojů on-line. Pro všechna letiště byla využita data o denních počtech pohybů řídících se pravidly pro let podle přístrojů (IFR) na jednotlivých letištích, dostupná na webových stránkách EUROCONTROL Aviation Intelligence Portal [37]. Oproti pražskému letišti byly sice v těchto datech zahrnuty pouze IFR pohyby, nicméně lze zjednodušeně předpokládat, že s ohledem na charakter obou letišť, kdy se jedná o velká mezinárodní letiště, zde tvoří IFR provoz většinu všech pohybů. Ukázku těchto dat poskytuje tab. 7. Hlavní dva parametry, s nimiž bylo pracováno, byl parametr „FLT_TOT_1“, což byl celkový počet IFR pohybů na letišti udávaný síťovým manažerem (Network manager), a „FLT_TOT_IFR_2“, což byl celkový počet IFR pohybů na letišti udávaný provozovatelem letiště (Airport operator). Další postup zpracování těchto dat je popsán v oddílu 4.1.2.

Tabulka 7: Ukázka dat o denních letištních IFR pohybech od EUROCONTROL [37]

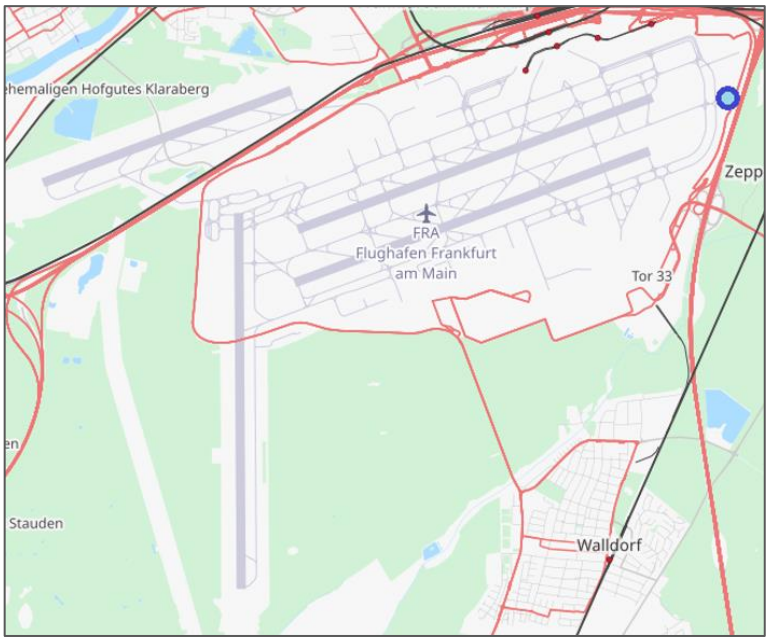
FLT_DATE	APT_ICAO	APT_NAME	STATE_NAME	FLT_DEP_1	FLT_ARR_1	FLT_TOT_1	FLT_DEP_IFR_2	FLT_ARR_IFR_2	FLT_TOT_IFR_2
03.04.2019	EHAM	Amsterdam - Schiphol	Netherlands	710	707	1417	711	714	1425
04.04.2019	EHAM	Amsterdam - Schiphol	Netherlands	728	730	1458	727	721	1448
05.04.2019	EHAM	Amsterdam - Schiphol	Netherlands	725	731	1456	725	735	1460
06.04.2019	EHAM	Amsterdam - Schiphol	Netherlands	632	629	1261	632	624	1256
07.04.2019	EHAM	Amsterdam - Schiphol	Netherlands	704	696	1400	703	701	1404
08.04.2019	EHAM	Amsterdam - Schiphol	Netherlands	735	743	1478	734	743	1477
09.04.2019	EHAM	Amsterdam - Schiphol	Netherlands	715	712	1427	714	711	1425
10.04.2019	EHAM	Amsterdam - Schiphol	Netherlands	717	725	1442	717	728	1445
11.04.2019	EHAM	Amsterdam - Schiphol	Netherlands	738	738	1476	738	731	1469
12.04.2019	EHAM	Amsterdam - Schiphol	Netherlands	737	720	1457	736	723	1459
13.04.2019	EHAM	Amsterdam - Schiphol	Netherlands	620	626	1246	620	627	1247
14.04.2019	EHAM	Amsterdam - Schiphol	Netherlands	703	695	1398	703	697	1400
15.04.2019	EHAM	Amsterdam - Schiphol	Netherlands	724	733	1457	724	736	1460

Data o kvalitě ovzduší byla čerpána z datových portálů místních agentur zabývajících se měřením kvality ovzduší. Pro letiště Amsterdam-Schiphol (AMS) se jednalo o data od nizozemského Národního institutu veřejného zdraví a životního prostředí (*Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu* – RIVM) [38]. V blízkosti letiště se nacházejí tři měřicí stanice, konkrétně nazvané Hoofddorp-Hoofdweg, Badhoevedorp-Sloterweg a Oude Meer-Aalsmeerderdijk; u všech byla k dispozici data za celé zkoumané období. Pro analýzu dat byla vybraná pouze data z měřicí stanice Badhoevedorp-Sloterweg (BHS). Důvodem pro výběr této stanice byla skutečnost, že v případě některých látek se jednalo o jedinou stanici, která měřila jejich koncentrace. Situaci zvolené stanice v rámci areálu letiště ukazuje obr. 11 (poloha na mapě vyznačená modrým kruhem) [39].



Obrázek 11: Mapa amsterdamského letiště s vyznačenou polohou měřicí stanice BHS (OpenStreetMap)

V případě letiště Frankfurt (FRA) byl zdrojem dat Hesenský zemský úřad pro ochranu přírody, životní prostředí a geologii (*Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie* – HLNUG) [40]. Ten má kolem perimetru letiště rozmístěné tři měřicí stanice, konkrétně Frankfurt-Flughafen-Nord, Frankfurt-Flughafen-West a Frankfurt-Flughafen-Ost. Pro analýzu dat byla vybraná data ze stanice Frankfurt-Flughafen-Ost (FFO), jelikož na rozdíl od ostatních stanic zde probíhalo měření po celé zkoumané období a stejně jako u amsterdamské stanice BHS zde bylo pokryto nejvíce látek. Situaci zvolené stanice v rámci areálu letiště ukazuje obr. 12 (poloha na mapě vyznačená modrým kruhem) [41].

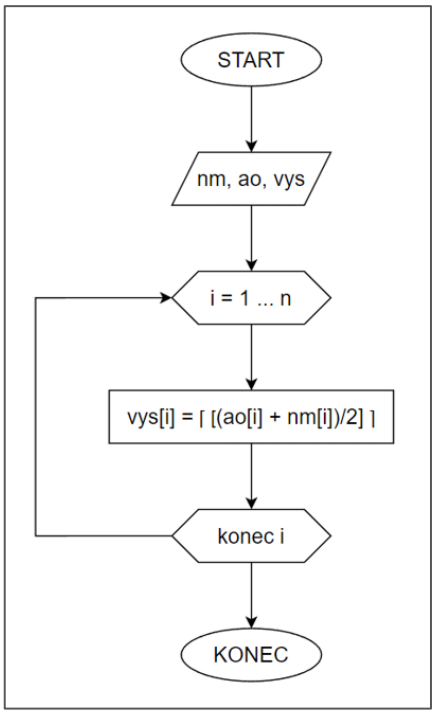


Obrázek 12: Mapa frankfurtského letiště s vyznačenou polohou měřicí stanice FFO (OpenStreetMap)

Stejně jako pro pražské letiště se i v datech o kvalitě ovzduší pro tato letiště místy vyskytovaly prázdné hodnoty, pravděpodobně způsobené stejnými příčinami, jako v případě pražského letiště. Způsob jejich doplnění byl rovněž stejný.

4.1.2 Postup zpracování dat

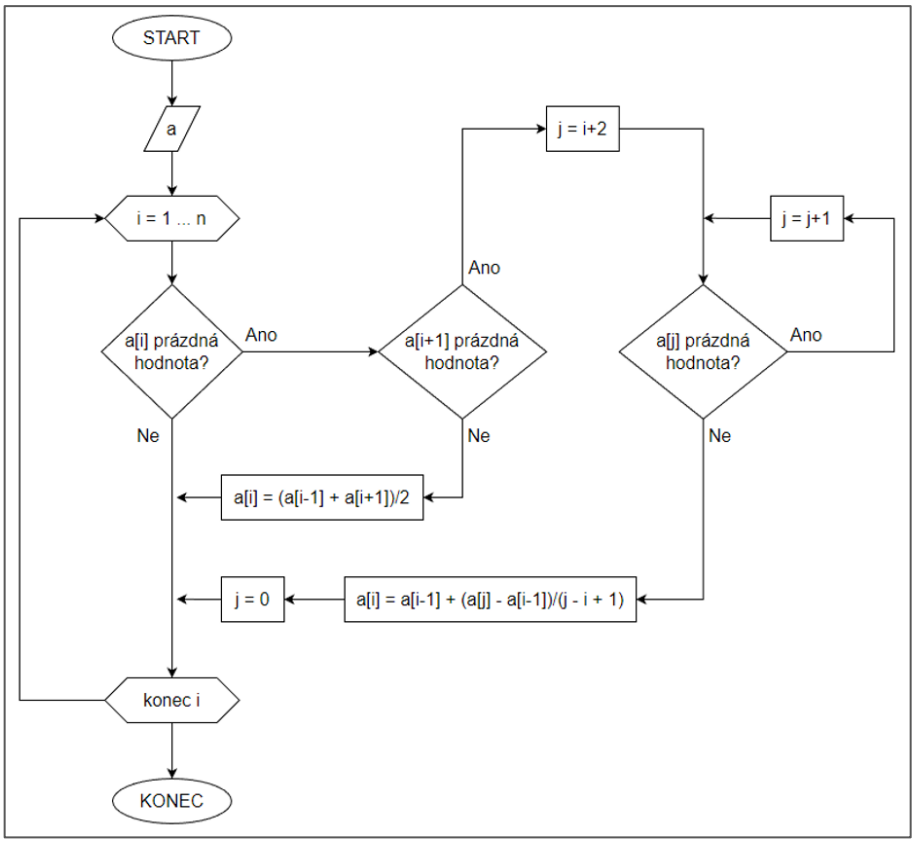
Před analýzou všech dat byla nutná jejich příprava, respektive zpracování. Jak bylo zmíněno v předchozí podkapitole, pro pražské ruzyňské letiště byla přímo provozovatelem poskytnuta kompletní data o letištních pohybech. Tato data bylo možné okamžitě použít bez jakékoli předchozí úpravy, přičemž na jejich základě byly stanoveny denní počty pohybů za každý den. Jak již bylo zmíněno výše, data o denních počtech IFR pohybů na ostatních letištích od EUROCONTROLu obsahovala pro každý den dvě hodnoty – jedna pocházela od síťového manažera, druhá od provozovatele letiště [37]. Cílem bylo pro daný den získat jednu reprezentativní hodnotu, která byla stanovena jako průměr obou zmiňovaných hodnot zaokrouhlený na jednotky nahoru. Toto bylo provedeno pomocí algoritmu popsaného vývojovým diagramem na obr. 13.



Obrázek 13: Algoritmus přípravy dat o denních letištních IFR pohybech

kde nm je posloupnost hodnot udávaných síťovým manažerem, ao je posloupnost hodnot udávaných provozovatelem letiště a vys je výsledná posloupnost hodnot připravených k analýze. Výraz $\lceil k \rceil$ představuje horní celou část čísla k, de facto se jedná o zaokrouhlení na jednotky nahoru. Pro daný den s indexem i z celkového počtu n dní tedy byly zprůměrovány obě udávané hodnoty $ao[i]$ a $nm[i]$, přičemž tato hodnota byla poté ještě zaokrouhlena na jednotky směrem nahoru.

Dále bylo nutné zpracovat data o kvalitě ovzduší. Již několikrát bylo zmíněno, že data naměřená letištními měřicími stanicemi místy obsahovala chybějící hodnoty související s různými kalibracemi přístrojů či jinými technickými faktory. Tyto mezery byly uměle doplněny pomocí lineární interpolace na základě sousedních hodnot. Vývojový diagram použitého algoritmu založeného na tomto principu je na obr. 14.



Obrázek 14: Algoritmus doplnění hodnot pomocí lineární interpolace

kde $a[i]$ je i-tá hodnota posloupnosti a naměřených hodnot při celkovém počtu hodnot n. Jako maximální přípustný počet za sebou chybějících hodnot, kdy ještě bylo přípustné bez větší újmy na přesnosti použít odhad pomocí lineární interpolace na základě okolních hodnot, bylo stanoveno číslo osm. V případě, že v datech existovala větší mezera, což bylo například v případě delší technické odstávky měřicího zařízení, data doplněna nebyla a tuto skutečnost bylo nutné dále vzít potaz, jak bude vysvětleno v podkapitole 4.2. Díky kompletnosti dat pro CO a NO_X (nepočítaje nedostupná data pro CO do srpna 2019) se však tento problém netýkal emisního modelu, řešeného v rámci pražského letiště.

4.2 Postup základní analýzy dat

V této podkapitole budou popsány jednotlivé zvolené postupy v rámci základní analýzy dat. Ta se, jak již bylo ukázáno na obr. 9, týkala všech tří zkoumaných letišť, přičemž zvolené přístupy byly všude stejné. Pro tuto analýzu dat byl využit tabulkový procesor Microsoft Excel. Pro větší přehlednost bude každý popisovaný přístup vždy uveden nadpisem, což se týká i následné diskuze výsledků v kap. 6. V závěru podkapitoly pak bude popsán způsob, jakým byly pro jednotlivé použité přístupy zohledněny mezery v datech, které byly nepřípustně velké.

Meziroční srovnání kvality ovzduší na letištích

Prvním zvoleným přístupem bylo meziroční srovnání kvality ovzduší na letištích obecně. Toto bylo provedeno vícero způsoby. Prvním způsobem bylo vytvoření bodového grafu pro všechny látky, kdy x-ové souřadnice jednotlivých bodů odpovídaly počtu denních pohybů a jejich y-ové souřadnice odpovídaly průměrné naměřené koncentraci za daný den. Data byla dále pro lepší přehlednost barevně rozlišena podle roku. Cílem těchto grafů bylo vizuální posouzení případné závislosti denních průměrných koncentrací na počtu letištních pohybů.

Kromě toho byla vyhodnocena samotná meziroční změna kvality ovzduší na letištích, bez ohledu na letištní provoz. Z použitých dat byly pro oba ročníky (tj. 2019 a 2020) vytvořeny tzv. krabicové diagramy (angl. *boxplot*, případně *box and whisker chart*). Účelem krabicového diagramu je obecně zobrazit charakteristiky zkoumaných dat z hlediska rozdělení jejich hodnot. Jedná se o svisle orientovanou krabici (box), jejíž spodní a horní okraj odpovídá prvnímu (Q_1), respektive třetímu (Q_3) výběrovému kvartilu. Uvnitř této krabice se pak nachází čára odpovídající mediánu neboli druhému kvartilu (Q_2). Z krabice pak v horním a dolním směru vystupují vousky (whiskers), které buďto zahrnují všechny zbývající hodnoty (pokud se v datech nevyskytují odlehlé hodnoty) a tedy končí maximální/minimální hodnotou výběru, nebo je jejich velikost určena jako $[1{,}5 \cdot (Q_3 - Q_1)]$, přičemž všechny hodnoty nacházející se mimo tyto vousky jsou považovány za odlehlé [42] [43]. Na základě těchto krabicových diagramů byla vizuálním porovnáním vyhodnocena meziroční změna kvality ovzduší.

Před dalším popisem postupu řešení v rámci práce je nejprve nutné ve stručnosti představit problematiku testování hypotéz. K ní lze zjednodušeně říci, že je vždy testován určitý parametr rozdělení zkoumaných dat. V souvislosti s tímto je formulována tzv. nulová hypotéza H_0, která reprezentuje určité tvrzení o předpokládaných vlastnostech tohoto parametru. Proti nulové hypotéze stojí tzv. alternativní hypotéza H_A, která tvrdí její opak. Ta také určuje typ testu (levostranný/pravostranný, případně oboustranný); v případě této práce byl vždy volen levostranný test, jelikož byla testována nulová hypotéza o tom, že došlo k meziročnímu zlepšení kvality ovzduší (tj. že medián výběru pro rok 2020 byl menší, než pro rok 2019). Po provedení testu hypotézy je obecně získána tzv. p-hodnota, jejíž hodnoty mohou ležet v intervalu od 0 do 1. Tu lze zjednodušeně řečeno interpretovat jako míru jistoty, s jakou lze nezamítnout nulovou hypotézu, přičemž pokud je její hodnota menší než nastavená hladina významnosti α (volně nastavitelná hodnota, která v zásadě udává požadovanou jistotu při zamítnutí či nezamítnutí nulové hypotézy; typicky se užívá hodnota $\alpha = 0{,}05$) dochází k zamítnutí nulové hypotézy (tj. formulovaný předpoklad o daném parametru rozdělení je mylný) [44]. Možnosti této práce neumožňují podrobnější popis této problematiky a tedy výše

uvedené vysvětlení je pouze vyčerpávající a pro neznalého čtenáře může být nedostatečné; v takovém případě je na místě studium příslušné odborné literatury.

Kromě vizuálního posouzení meziroční změny pomocí krabicových diagramů byla příslušná data pro větší spolehlivost konečného verdiktu rovněž otestována v prostředí softwaru Matlab pomocí testu *ranksum*, který odpovídá Mann-Whitneyovu testu, respektive pořadovému Wilcoxonovu testu. Tento test pracuje se dvěma nezávislými výběry, které mohou mít různý počet hodnot – to byl i případ výběrů pro oba roky, neboť 2020 byl přestupním rokem. Test při běžném nastavení pracuje s hladinou významnosti 5 %, neboli 0,05. [45]. Důležitá zde byla výsledná p-hodnota, která rozhodovala o zamítnutí či nezamítnutí nulové hypotézy, že došlo k meziročnímu zlepšení kvality ovzduší na daném letišti z pohledu konkrétní sledované látky; tedy pokud byla nižší než hladina významnosti (0,05), byla nulová hypotéza zamítnuta a k meziročnímu zlepšení kvality ovzduší pro danou látku nedošlo.

Srovnání mezi obdobími únor-březen a duben-květen 2020

Stejný postup analýzy, jako byl uvedený v rámci předchozího popisovaného přístupu, byl zvolen i pro období jarních měsíců roku 2020, kdy došlo vlivem nástupu pandemie COVID-19 k útlumu letištního provozu. Důvodem bylo blíže prozkoumat, jak se změnila kvalita ovzduší na zkoumaných letištích bezprostředně po nastalém poklesu provozu. Data byla tentokrát rozdělena na výběry za období únor-březen 2020, které bylo označené jako odpovídající běžnému stavu, a období duben-květen 2020, které již odpovídalo pandemickému stavu. Tyto dva výběry byly mezi sebou porovnány stejným způsobem jako při meziročním srovnání popsaném v předchozích odstavcích.

Vývoj sledovaných veličin během útlumu letištního provozu

Dalším zvoleným přístupem bylo sledování vývoje počtu denních pohybů v čase spolu s vývojem denních průměrných koncentrací jednotlivých látek. Pro větší přehlednost v grafickém zobrazení dat byly obě veličiny vyhlazeny pomocí sedmidenního klouzavého průměru (tj. daná hodnota vždy odpovídala průměru z dané původní hodnoty a šesti předcházejících původních). Stejně jako u předchozího přístupu bylo i zde sledováno období únor-květen 2020; tedy doba před, během a bezprostředně po poklesu letištního provozu. Účelem bylo oproti předchozímu přístupu sledovat dynamiku vývoje kvality ovzduší na konkrétním letišti, z čehož bylo možné stanovit závěry z hlediska chování koncentrací zkoumaných látek v reakci na útlum letištního provozu.

Poměrová meziroční změna kvality ovzduší a letištního provozu

Z hlediska meziročního srovnání změny kvality ovzduší, respektive letištního provozu byly pro každý den v roce, kde to bylo možné (tj. byly dostupné hodnoty pro oba roky), stanoveny indexy $MSPDK$ a $MSDP$, jejichž hodnoty pro daný den i byly dány následovně:

$$MSDPK_i = \frac{DPK_{2020,i}}{DPK_{2019,i}} \tag{4.1}$$

$$MSDP_i = \frac{DP_{2020,i}}{DP_{2019,i}} \tag{4.2}$$

kde DPK byla hodnota sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné naměřené koncentrace pro den i a DP byla hodnota sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů pro den i, přičemž v dolních indexech těchto veličin byl vždy uveden příslušný ročník. Pro oba indexy znamenaly hodnoty pod jedna meziroční pokles, hodnoty nad jedna znamenaly meziroční nárůst a hodnoty rovné jedné znamenaly setrvalý stav. Výsledný průběh vypočítaných hodnot obou indexů byl následně graficky znázorněn, přičemž oba byly srovnány a z jejich průběhu byly určené příslušné závěry.

Meziroční srovnání denního průběhu koncentrací škodlivin

Všechny dosavadní přístupy sledovaly data v měřítku dní. Vzhledem k možnostem daným dostupnými daty však bylo vhodné data prozkoumat i podrobněji. Konkrétně bylo sledováno meziroční srovnání vývoje hodnot naměřených hodinových koncentrací v průběhu dne. Použita byla data vždy pro 15. den měsíce za období březen-červenec, která byla zprůměrována, čímž byl získán výsledný průměrný denní průběh koncentrací odpovídající stavu před a během pandemie. Důvodem pro změnu zkoumaného časového období oproti výše popsaným přístupům (kdy bylo vždy bráno období únor-květen) byl úmysl mít pro rok 2020 zahrnuty pouze měsíce, kdy byl významný meziroční rozdíl v počtu denních pohybů, což únor nesplňoval.

Řešení chybějících hodnot

V oddílu 4.1.2 bylo zmíněno, že v datech o naměřených hodinových koncentracích se občas vyskytly mezery, které nebylo možné doplnit lineární interpolací kvůli jejich velikosti. Pokud k tomu došlo a hodnoty zůstaly prázdné, vyhodnotil se pro daný den chybějící počet hodnot. Bylo stanoveno, že maximální přípustný počet takto chybějících hodnot byl šest (daná nevyhovující mezera mohla připadat na dva dny; např. mohla začínat v první den ve 20:00 a končit druhý den v 9:00), respektive pro daný den mělo být k dispozici alespoň 75 % hodnot, přičemž nebylo rozlišováno, zda byly původně naměřené, nebo zda vznikly odhadem pomocí lineární interpolace v případě doplňování menších mezer. V případě, že byl tento požadavek

splněn, byla pro daný den stanovena průměrná koncentrace dané látky, s níž bylo dále pracováno. Pokud tento požadavek nebyl pro daný den splněn, byl postup různý podle zvoleného přístupu zpracování dat:

- Ze srovnání počtu denních pohybů a denních průměrných koncentrací (bodový graf, krabicové diagramy, testování dat) byl takovýto den vyjmut.
- V případě sledování časového vývoje denních průměrných koncentrací byla pro daný den použita hodnota získaná lineární interpolací z okolních hodnot. V případě, že toto bylo nutné provést u více dní za sebou (například v souvislosti s dlouhodobější odstávkou měřicího zařízení), byl maximální přípustný počet takovýchto dní stanoven na pět. Pokud byl tento počet překročen, nebyla lineární interpolace provedena a v grafech pro tyto dny hodnoty chyběly. Stejný postup byl použit i u meziročního srovnání z hlediska sledování hodnot indexů $MSDPK$ a $MSDP$.
- V rámci meziročního srovnání průměrného denního průběhu koncentrací dané látky pro vybraný vzorek dní (15. den měsíce pro období březen-červenec) byl místo původního dne zvolen nejbližší následující den, který splňoval požadavek na maximální přípustnou velikost mezery dat.

4.3 LTO emisní model – CO a NO_X

U analýzy dat obecně platí, že čím detailnější data jsou k dispozici, tím širší jsou možnosti z hlediska jejich analýzy. V předchozí podkapitole byl popsán postup základní analýzy dat, který byl shodný pro všechna tři letiště. V případě pražského letiště byla, jak již bylo zmíněno výše, dostupná detailnější data o jednotlivých pohybech. Tato podkapitola se věnuje popisu postupu využití těchto dat v rámci emisního modelu založeného na ICAO LTO cyklu, jehož cílem bylo prozkoumat vztah mezi emisemi CO a NO_X jednotlivých letištních pohybů a naměřenými koncentracemi těchto látek. Do modelu byla s ohledem na jejich dostupnost zahrnuta data za období od 16. srpna 2019 do 31. prosince 2020.

4.3.1 Matematické základy modelu

Hlavním účelem tohoto modelu bylo poskytnout odhad celkového množství emisí CO a NO_X za daný časový rámec, jenž byl následně porovnán s průměrnou skutečně naměřenou koncentrací za stejné období. Základní domněnkou zde bylo, že pakliže mají emise z letištního provozu vliv na naměřenou kvalitu ovzduší, musí určitému množství vypuštěných emisí zhruba odpovídat nějaká průměrná naměřená koncentrace této látky v ovzduší. Z matematického hlediska se jedná veličinu E_o, která reprezentuje součet odhadovaných emisí za určité časové okno v minulosti:

$$E_o = \sum_{i \in P} e_i, \tag{4.3}$$

kde e_i je odhad emisí pro daný pohyb i a P je množina všech pohybů realizovaných během posledních τ hodin. Parametr τ je zaveden proto, že je předpokládána určitá kumulativnost emisí, tj. emise v ovzduší musejí přetrvávat po určité časové období a je tedy nutné sledovat i ty starší. Hodnota veličiny E_o byla následně srovnána s veličinou K_p, která reprezentuje průměr z naměřených koncentrací dané látky za posledních τ hodin, neboli

$$K_p = \frac{1}{\tau} \cdot \left(\sum_{m \in Q} k_m \right), \tag{4.4}$$

kde k_m je daná hodnota naměřené koncentrace pro hodinu m z množiny Q všech koncentrací naměřených za posledních τ hodin. Pokud existuje nějaký vztah mezi letištními pohyby (respektive jejich emisemi) a místní kvalitou ovzduší, může existovat způsob, jak tento vztah popsat. Matematicky by se jednalo o situaci, kdy K_p je funkcí E_o, tj. $K_p = f(E_o)$. Takto je K_p funkcí jediné proměnné, tj. naměřené koncentrace závisejí pouze na emisích vypuštěných letištním provozem. Je však zřejmé, že ve skutečnosti bude K_p funkcí mnohem více proměnných, odpovídajících dalším zdrojům emisí či například povětrnostním vlivům. Ovšem tato práce se nevěnuje kvantifikaci emisí z ostatních zdrojů, včetně těch nacházejících se mimo letiště, nebo například nezohledňuje faktory jako vzdálenost zdroje emisí od měřicí stanice či aktuální povětrnostní podmínky. Proto bylo pro model nutné zavést určitá omezení a zjednodušující předpoklady.

Pro zjednodušení bylo například předpokládáno, že emise z daného pohybu se v ovzduší rozptýlí rovnoměrně a velice rychle, tudíž pro dvě různě zvolené lokace měření v rámci letiště by byly naměřeny stejné koncentrace, a tedy na místě jejich naměření nezáleží. Dalším předpokladem bylo, že pro emise platí princip superpozice. V teorii systémů je platnost principu superpozice jedním z požadavků na linearitu systému, přičemž platí:

$$D\{u_1(t) + u_2(t)\} = D\{u_1(t)\} + D\{u_2(t)\}, \tag{4.5}$$

kde D je obecně nějaký operátor aplikovaný na vstupní funkce $u_1(t)$ a $u_2(t)$ [46]. Přestože tato problematika nebude v práci dále rozebírána, byla zde zmíněna proto, že pro účely tohoto modelu lze s výhodou využít obecnou myšlenku principu superpozice. Interpretace vzorce (4.5) tedy v tomto konkrétním případě může být taková, že emise vypočítané pro jednotlivé pohyby lze sčítat a tento součet, E_o, je možné následně použít pro přímé srovnání s průměrnou naměřenou koncentrací K_p. Jinými slovy, s emisemi se v ovzduší neděje nic navíc, co by bylo nutné zohlednit a nesouviselo by s emisemi vypouštěnými letadly. Je však na místě obratem doplnit, že se ve skutečnosti, jak bylo zmíněno v kapitole 1, v ovzduší

odehrává celá řada různých chemických reakcí, které v čase různě mění koncentrace těchto látek; například NO_X i CO se mj. podílejí na vzniku O_3.

Již byl řečen předpoklad, že veličina K_p je funkcí veličiny E_o, přičemž bylo předpokládáno, že tento vztah je lineární, tedy že jej lze vyjádřit pomocí lineární funkce. Chceme-li obecně zkoumat lineární závislost nějakých dvou naměřených řad hodnot x a y, lze vztah mezi těmito proměnnými vyjádřit analyticky pomocí regresní rovnice, která optimálně prokládá soustavu bodů o souřadnicích $[x_i, y_i]$, ve tvaru

$$\tilde{y} = a_0 + a_1 \cdot x, \tag{4.6}$$

kde a_1 je regresní koeficient [47]. Přesnost odhadovaného lineárního vztahu, respektive stupeň vzájemné lineární závislosti mezi proměnnými x a y vyjadřuje korelační koeficient r_{xy} (v práci dále značený R), pro který platí

$$R = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \sum_i (y_i - \bar{y})^2}} \qquad R \in \langle -1,1 \rangle, \tag{4.7}$$

kde $\bar{x}$ a $\bar{y}$ jsou průměrné hodnoty datových řad. Pokud se koeficient R rovná některé z krajních hodnot intervalu, jedná se o dokonalou pozitivní, respektive negativní lineární závislost mezi oběma veličinami. K interpretování výsledné hodnoty korelačního koeficientu může rámcově posloužit stupnice verbálního hodnocení uvedená v tab. 8, která je však subjektivní, tudíž pro ni neexistuje žádný objektivní způsob stanovení dílčích intervalů [48].

Tabulka 8: Stupnice pro slovní interpretaci hodnoty korelačního koeficientu R [48]

Hodnota R	**Slovní interpretace hodnoty R**
$\|R\| \leq 0,3$	Nízký stupeň závislosti
$0,3 < \|R\| \leq 0,5$	Střední stupeň závislosti
$0,5 < \|R\| \leq 0,7$	Významný stupeň závislosti
$0,7 < \|R\| \leq 0,9$	Vysoký stupeň závislosti
$\|R\| > 0,9$	Velmi vysoký stupeň závislosti

Kromě subjektivního hodnocení však lze pro ověření nenulovosti koeficientu R použít i statistické testování [44]. U veličin E_o a K_p byla různě nastavována hodnota časového parametru τ, čímž bylo sledováno chování emisí pro různé časové měřítko. V souvislosti s porovnáváním těchto dvou veličin byla sledována hodnota korelačního koeficientu R, která udává stupeň této závislosti (viz tab. 8); respektive byla sledována jeho proměnlivost na základě volby různých hodnot parametru τ.

4.3.2 Modifikace ICAO LTO cyklu

LTO cyklus obecně pracuje s tím, že každé letadlo nejprve přistane na letišti a poté z něj odlétá, tedy bere jeho přílet i odlet jako jeden celek; cyklus. To zde však nebylo možné, protože z dostupných dat o pohybech nebylo možné spárovat konkrétní přílet s příslušným následným odletem (to by bylo možné, pokud by pro každý záznam například byla k dispozici imatrikulační značka letadla nebo jiný jednoznačně identifikující údaj). Místo toho tedy navrhovaný model pracoval s přílety a odlety zvlášť. Pro účely tohoto modelu nebylo nutné pracovat s údaji o nastavení tahu, tento parametr tedy v následujících tabulkách nebude dále uváděn. Rozdělení provozních režimů podle toho, zda příslušely odletu nebo příletu včetně jejich příslušných dob trvání (TIM – z angl. *Time in mode*), je popsáno v tab. 9.

Tabulka 9: Provozní režimy modifikovaného LTO cyklu

Druh pohybu	Provozní režim	TIM (min)
Odlet	Pojíždění ke vzletu	*(variabilní)*
	Vzlet	0,7
	Stoupání	2,2
Přílet	Přiblížení	4,0
	Pojíždění ke stojánce	*(variabilní)*

Doba pojíždění pro původní LTO cyklus (26 minut) je obecnou hodnotou, která se pro jednotlivá letiště i pohyby může zásadně lišit, což může negativně ovlivnit přesnost výpočtů. Pro tento model byly místo ní použity hodnoty pravidelně zveřejňované organizací EUROCONTROL pro konkrétní letiště vypočítané na základě reálného provozu za určité období. Tyto hodnoty, konkrétně pro ruzyňské letiště, udává tab. 10 [49].

Tabulka 10: Přehled použitých časů taxi-in/taxi-out pro LKPR [49]

Druh	Období	Průměrná doba pojíždění (min)
Pojíždění ke stojánce po přistání (taxi-in)	Zima 2018-2019	5,6
	Léto 2019	5,4
	Zima 2019-2020	5,3
	Léto 2020	4,7
	Zima 2020-2021	5,1
Pojíždění k dráze před vzletem (taxi-out)	Zima 2018-2019	12,4
	Léto 2019	11,9
	Zima 2019-2020	11,3
	Léto 2020	8,9
	Zima 2020-2021	11,2

Za zimní měsíce bylo v této práci považováno období říjen-březen a za letní měsíce období duben-září. Časové hodnoty uvedené v tab. 9 platí pro podzvukové letouny s proudovými motory. Model však pracoval také s letouny s turbovrtulovými a pístovými motory a vrtulníky, pro něž byly některé tyto hodnoty jiné, jak bude uvedeno níže.

4.3.3 Přiřazení emisních charakteristik k jednotlivým typům letadel

Pro každý pohyb bylo na základě dostupných dat možné určit, o jaký typ letadla se jednalo. Za zkoumané období se na ruzyňském letišti celkem vyskytlo 248 typů (za jeden typ jsou zde považována všechna letadla s konkrétním ICAO identifikátorem udávaným v dokumentu Doc 8643 – Aircraft Type Designators [34]), z nichž 97 mělo četnost výskytu pouze 10 a méně, což v součtu představovalo zhruba 0,5 % všech pohybů. Pro tento model bylo zvoleno kritérium, že mělo být obsaženo takové množství typů, které by po jejich sestupném seřazení dle četnosti výskytu na pražském letišti v letech 2019-2020 v součtu představovalo 99 % všech pohybů. Ve výsledku tak bylo do modelu zahrnuto 93 typů, přičemž zpětně určená spodní hranice četnosti výskytu byla 60. Seznam typů zahrnutých do modelu je v Příloze č. 1.

Ke každému typu byly následně přiřazeny všechny používané pohonné jednotky (zdroje viz obr. 9); toto byl zejména případ některých typů dopravních letadel, pro která bývají dostupné pohonné jednotky od více výrobců. U každé pohonné jednotky bylo dále nutné stanovit její emisní charakteristiky. K tomu byly využity dostupné emisní databanky obsahující údaje o palivovém toku φ (kg/s) a emisních indexech ω (g/kg spáleného paliva) pro NO_X a CO pro jednotlivé provozní režimy LTO cyklu. Pro proudové motory byl využit dokument ICAO Aircraft Engine Emissions Databank dostupný na stránkách Agentury Evropské unie pro bezpečnost letectví (EASA) [50]. V případě pístových a turbohřídelových motorů (používaných u vrtulníků) byly využity databáze volně dostupné na stránkách švýcarského Federálního úřadu pro civilní letectví (FOCA) [51] [52]. Pro turbovrtulové motory existuje databáze zpracovaná Švédskou obrannou výzkumnou agenturou (FOI), avšak tento dokument není volně přístupný. Dokument Doc 9889 z ní však uvádí údaje pro vybrané zástupce letounů s turbovrtulovými motory rozdělené dle výkonu na hřídeli (SHP) motoru následovně [25]:

- SHP < 1000 hp
- 1000 hp ≤ SHP ≤ 2000 hp
- SHP > 2000 hp

Tyto údaje odpovídaly celkovým emisím a celkové spotřebě paliva během LTO cyklu. Pro účely této práce je bylo nutné přepočítat do stejné podoby, v jaké byly k dispozici v ostatních emisních databankách. Postupu tohoto přepočtu se věnuje následující oddíl.

4.3.4 Zpětné odvození toku paliva a emisních indexů pro turbovrtulové motory

V tab. 11 jsou uvedeny údaje pro reprezentativní letouny s turbovrtulovými motory tak, jak jsou dostupné v dokumentu Doc 9889. Jedná se o celkový součet emisí CO a NO_X za daný LTO cyklus a příslušnou celkovou spotřebu paliva [25].

Tabulka 11: Dostupné hodnoty LTO emisí a spotřeby paliva pro vybrané zástupce turbovrtulových motorů [25]

Reprezentativní letoun včetně SHP motoru	**LTO emise CO (kg/LTO cyklus)**	**LTO emise NO_X (kg/LTO cyklus)**	**Spotřeba paliva (kg/LTO cyklus)**
Beech King Air (SHP < 1000 hp)	2,99	0,32	76
DHC8-100 (1000 hp < SHP < 2000 hp)	2,27	1,55	208
ATR72-500 (SHP > 2000 hp)	2,35	1,88	203

Agentura FOI, která je vlastníkem neveřejné emisní databanky pro turbovrtulové motory, uvádí na svých webových stránkách doporučené hodnoty TIM pro výpočet emisí spojených s LTO cyklem; tyto hodnoty jsou mírně odlišné od hodnot stanovených ICAO pro proudové motory a jsou uvedené v tab. 12 [53].

Tabulka 12: Přehled provozních režimů LTO cyklu pro turbovrtulové letouny dle FOI [53]

Provozní režim	**TIM (min)**
Vzlet	0,5
Stoupání	2,5
Přiblížení	4,5
Pojíždění a volnoběh na zemi	26,0

4.3.4.1 Výpočet hodnot palivového toku

K dispozici byla data pro celkovou spotřebu paliva a celkové množství emisí CO a NO_X za celý LTO cyklus, z nichž bylo nutné spočítat hodnoty pro palivový tok v kg/s a emisní indexy (EI) v g/kg spotřebovaného paliva pro dílčí provozní režimy.

Nechť celková spotřeba paliva σ_{total} v rámci celého LTO cyklu je dána jako součet spotřeb pro všechny provozní režimy:

$$\sigma_{total} = \sum_{j} \sigma_j = \sigma_{př} + \sigma_{po} + \sigma_{vz} + \sigma_{st}. \tag{4.8}$$

Pokud budou tyto dílčí spotřeby vyjádřené jako součin hodnoty TIM t v sekundách a toku paliva φ v kg/s a (tj. $\sigma_i = t_i \cdot \varphi_i$), mění se vzorec (4.8) na:

$$\sigma_{total} = (t_{p\check{r}} \cdot \varphi_{p\check{r}}) + (t_{po} \cdot \varphi_{po}) + (t_{vz} \cdot \varphi_{vz}) + (t_{st} \cdot \varphi_{st}). \tag{4.9}$$

Jednotlivé časy t (TIM) jsou sice známé, stále se však jedná o jednu rovnici se čtyřmi neznámými, které takto nelze nalézt. Zde tedy bylo nutné vzít v úvahu zjednodušující předpoklad, že lze vyjádřit hodnotu toku paliva pro libovolný provozní režim pomocí hodnoty pro jiný režim. Pokud bude zvolena libovolná hodnota toku paliva φ_i a ty ostatní (značené φ_k) budou vyjádřené jako nějaký násobek této hodnoty (tj. $\varphi_k = n_k \cdot \varphi_i$), zredukuje se počet neznámých v rovnici na jedinou, což již umožňuje její řešení.

Postup nalezení těchto násobících indexů byl následující. Pro každý proudový motor v emisní databance od ICAO byly určeny poměry toků paliva pro každý provozní režim ku toku paliva pro režim pojíždění. Tato čísla byla následně zprůměrována, přičemž ještě před tím došlo k filtraci odlehlých hodnot (aby byla hodnota považovaná za odlehlou, musela se vyskytovat mimo interval $\langle [Q_1 - 1{,}5 \cdot (Q_3 - Q_1)]; [Q_3 + 1{,}5 \cdot (Q_3 - Q_1)] \rangle$; viz podkapitola 4.2). Výsledné palivové toky φ vyjádřené podle palivového toku při pojíždění φ_{po} byly určeny jako následující:

$$\begin{aligned} \varphi_{vz} &= 10{,}1162 \cdot \varphi_{po} \\ \varphi_{st} &= 8{,}2688 \cdot \varphi_{po} \\ \varphi_{p\check{r}} &= 2{,}8222 \cdot \varphi_{po} \end{aligned} \tag{4.10}$$

Zde je na místě zmínit, že byl použit zjednodušující předpoklad, že z hlediska hodnot toku paliva pro jednotlivé provozní režimy se proudové a turbovrtulové motory chovají stejně. Tyto hodnoty byly dosazeny do vzorce (4.9), čímž bylo úpravami postupně získáno:

$$\sigma_{\text{total}} = t_{p\check{r}} \cdot (2{,}8222 \cdot \varphi_{po}) + t_{po} \cdot \varphi_{po} + t_{vz} \cdot (10{,}1162 \cdot \varphi_{po}) + t_{st} \cdot (8{,}2688 \cdot \varphi_{po})$$

a po vytknutí φ_{po} pak

$$\sigma_{\text{total}} = \varphi_{po} \cdot \left(t_{p\check{r}} \cdot 2{,}8222 + t_{po} + t_{vz} \cdot 10{,}1162 + t_{st} \cdot 8{,}2688\right).$$

Po dosazení jednotlivých časů TIM t v sekundách již zbývala pouze triviální úprava:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{total}} &= \varphi_{po} \cdot (270 \cdot 2{,}8222 + 1560 + 30 \cdot 10{,}1162 + 150 \cdot 8{,}2688) = \\ &= \varphi_{po} \cdot (761{,}994 + 1560 + 303{,}486 + 1240{,}32) = \\ &= \varphi_{po} \cdot (3865{,}8) \\ \varphi_{po} &= \frac{\sigma_{total}}{3865{,}8}. \end{aligned} \tag{4.11}$$

Nyní byl tedy vyjádřen tok paliva při pojíždění pomocí celkové spotřeby paliva. S použitím odvozených vztahů (4.10) pro výpočet dalších toků paliva byl tedy výpočet všech dílčích palivových toků pro jednotlivé provozní režimy pro jednotlivé reprezentativní typy hotový. Výsledky výpočtů jsou k dispozici v tab. 13.

Tabulka 13: Výsledky zpětného výpočtu hodnot palivových toků

Letadlo	σ_{total} **[kg/LTO cyklus]**	φ_{po} **[kg/s]**	$\varphi_{p\check{r}}$ **[kg/s]**	φ_{st} **[kg/s]**	φ_{vz} **[kg/s]**
Beech King Air	76	0,020	0,056	0,164	0,200
DHC8-100	208	0,054	0,154	0,450	0,546
ATR72-500	203	0,053	0,150	0,439	0,533

4.3.4.2 Výpočet emisních indexů

Pro obě látky (CO a NO_X) byly k dispozici hodnoty celkových emisí $\varepsilon_{\text{total}}$ v kg za celý LTO cyklus, přičemž stejně jako v případě palivových toků bylo cílem spočítat dílčí emisní indexy ω pro jednotlivé provozní režimy.

Základní předpoklad byl opět, že celkové množství emisí $\varepsilon_{\text{total}}$ dané látky za LTO cyklus je součtem emisí pro dílčí provozní režimy:

$$\varepsilon_{total} = \sum_{j} \varepsilon_j = \varepsilon_{p\check{r}} + \varepsilon_{po} + \varepsilon_{vz} + \varepsilon_{st}. \tag{4.12}$$

Dále bylo uvažováno, že množství emisí pro libovolný provozní režim ε_i lze obecně vyjádřit jako součin emisního indexu ω_i v g/kg spáleného paliva a množství spáleného paliva během tohoto provozního režimu f_i v kg:

$$\varepsilon_i = \omega_i \cdot f_i. \tag{4.13}$$

Množství spáleného paliva f_i v rámci daného provozního režimu i lze dále vyjádřit jako součin palivového toku φ_i v kg/s a času TIM t_i v sekundách:

$$f_i = t_i \cdot \varphi_i. \tag{4.14}$$

Dosazením vzorců (4.13) a (4.14) do vztahu (4.12) vychází následující:

$$\varepsilon_{total} = \omega_{p\check{r}} \cdot (t_{p\check{r}} \cdot \varphi_{p\check{r}}) + \omega_{po} \cdot (t_{po} \cdot \varphi_{po}) + \omega_{vz} \cdot (t_{vz} \cdot \varphi_{vz}) + \omega_{st} \cdot (t_{st} \cdot \varphi_{st}). \tag{4.15}$$

Hodnoty palivového toku φ_i i časy t_i (TIM) byly známé, čímž opět zbývaly čtyři neznámé v jediné rovnici odpovídající hledaným emisním indexům ω_i. Analogickým principem jako v případě odvozování hodnot palivových toků, kdy byl zvolen jeden palivový tok a ty ostatní byly vyjádřeny podle něj, bylo možné se opět dostat na jednu rovnici o jedné neznámé.

Výsledné emisní indexy pro NO_X a CO byly stanovené jako následující:

$$\omega_{vzNO_X} = 6{,}5969 \cdot \omega_{poNO_X} \qquad \omega_{poCO} = 63{,}3566 \cdot \omega_{vzCO}$$
$$\omega_{stNO_X} = 4{,}8780 \cdot \omega_{poNO_X} \qquad \omega_{přCO} = 8{,}3334 \cdot \omega_{vzCO} \tag{4.16}$$
$$\omega_{přNO_X} = 2{,}2462 \cdot \omega_{poNO_X} \qquad \omega_{stCO} = 0{,}9903 \cdot \omega_{vzCO}$$

Do vztahu (4.15) byly dosazeny hodnoty z (4.16) pro NO_X spolu s hodnotami palivových toků:

$$\varepsilon_{\mathrm{total}_{NO_X}} = 270 \cdot \omega_{přNO_X} \cdot \varphi_{př} + 1560 \cdot \omega_{poNO_X} \cdot \varphi_{po} + 30 \cdot \omega_{vzNO_X} \cdot \varphi_{vz} + 150 \cdot \omega_{stNO_X} \cdot \varphi_{st} =$$
$$= 270 \cdot \left(2{,}2462 \cdot \omega_{poNO_X}\right) \cdot \varphi_{př} + 1560 \cdot \omega_{poNO_X} \cdot \varphi_{po} +$$
$$+30 \cdot \left(6{,}5969 \cdot \omega_{poNO_X}\right) \cdot \varphi_{vz} + 150 \cdot (4{,}8780 \cdot \omega_{poNO_X}) \cdot \varphi_{st}$$

Po vytknutí ω_{poNO_X} bylo získáno:

$$\varepsilon_{\mathrm{total}_{NO_X}} = \omega_{poNO_X} \cdot \left(270 \cdot 2{,}2462 \cdot \varphi_{př} + 1560 \cdot \varphi_{po} + 30 \cdot 6{,}5969 \cdot \varphi_{vz} + 150 \cdot 4{,}8780 \cdot \varphi_{st}\right) =$$
$$= \omega_{poNO_X} \cdot (606{,}474 \cdot \varphi_{př} + 1560 \cdot \varphi_{po} + 197{,}907 \cdot \varphi_{vz} + 731{,}7 \cdot \varphi_{st})$$

Základní vztah pro výpočet emisního indexu NO_X pro pojíždění vyjádřený pomocí celkového emisního faktoru za celý LTO cyklus a dílčích palivových toků byl stanoven jako následující:

$$\omega_{poNO_X} = \frac{\varepsilon_{total_{NO_X}}}{606{,}474 \cdot \varphi_{př} + 1560 \cdot \varphi_{po} + 197{,}907 \cdot \varphi_{vz} + 731{,}7 \cdot \varphi_{st}}. \tag{4.17}$$

Obdobně pak pro výpočet dílčích emisních indexů byly pro CO opět dosazeny vypočítané hodnoty z (4.16) do vztahu (4.15), čímž bylo postupně získáno:

$$\varepsilon_{\mathrm{total}_{\mathrm{CO}}} = 270 \cdot \omega_{přCO} \cdot \varphi_{př} + 1560 \cdot \omega_{poCO} \cdot \varphi_{po} + 30 \cdot \omega_{vzCO} \cdot \varphi_{vz} + 150 \cdot \omega_{stCO} \cdot \varphi_{st} =$$
$$= 270 \cdot (8{,}3334 \cdot \omega_{vzCO}) \cdot \varphi_{př} + 1560 \cdot (63{,}3566 \cdot \omega_{vzCO}) \cdot \varphi_{po} + 30 \cdot \omega_{vzCO} \cdot \varphi_{vz} +$$
$$+150 \cdot (0{,}9903 \cdot \omega_{vzCO}) \cdot \varphi_{st} =$$
$$= 2250{,}018 \cdot \omega_{vzCO} \cdot \varphi_{př} + 98836{,}296 \cdot \omega_{vzCO} \cdot \varphi_{po} + 30 \cdot \omega_{vzCO} \cdot \varphi_{vz} + 148{,}545 \cdot \omega_{vzCO} \cdot \varphi_{st} =$$
$$= \omega_{vzCO} \cdot (2250{,}018 \cdot \varphi_{př} + 98836{,}296 \cdot \varphi_{po} + 30 \cdot \varphi_{vz} + 148{,}545 \cdot \varphi_{st})$$

Základní vztah pro výpočet emisního indexu CO pro režim vzletu byl tedy:

$$\omega_{vzCO} = \frac{\varepsilon_{total_{CO}}}{2250{,}018 \cdot \varphi_{př} + 98836{,}296 \cdot \varphi_{po} + 30 \cdot \varphi_{vz} + 148{,}545 \cdot \varphi_{st}}. \tag{4.18}$$

Po dosazení již vypočítaných hodnot palivových toků φ do vzorců (4.17) a (4.18) a následném dosazení takto spočítaných emisních indexů přepočítaných na g/kg do vztahů (4.16) byly získány emisní indexy CO a NO_X pro vzlet (T/O), stoupání (C/O), přiblížení (App) a volnoběh na zemi (Idle); jejich hodnoty jsou uvedené níže v tab. 14 a 15.

Tabulka 14: Zpětně spočítané emisní indexy pro CO pro všechny provozní režimy pro turbovrtulové motory

Letadlo	EI T/O (g/kg)	EI C/O (g/kg)	EI App (g/kg)	EI Idle (g/kg)
Beech King Air	1,424	1,410	11,867	90,221
DHC8-100	0,395	0,391	3,292	25,027
ATR72-500	0,419	0,415	3,492	26,547

Tabulka 15: Zpětně spočítané emisní indexy pro NOX pro všechny provozní režimy pro turbovrtulové motory

Letadlo	EI T/O (g/kg)	EI C/O (g/kg)	EI App (g/kg)	EI Idle (g/kg)
Beech King Air	9,409	6,958	3,204	1,426
DHC8-100	16,653	12,314	5,670	2,524
ATR72-500	20,696	15,304	7,047	3,137

Po provedení všech výpočtů a nalezení požadovaných emisních indexů ω a hodnot palivových toků φ byl pro každou turbovrtulovou pohonnou jednotku nalezen na webových stránkách jejího výrobce její výkon na hřídeli, podle nějž k ní byly přiděleny tyto emisní indexy dle kategorizace uvedené na str. 55.

4.3.5 Stanovení množství emisí jednotlivých pohybů

Pokud bylo k některému typu přiděleno více různých pohonných jednotek nebo bylo pro jednu pohonnou jednotku dostupných více dat, byly hodnoty pro jednotlivé parametry zprůměrovány, tudíž byly ve výsledku pro každý typ jednoznačně stanovené všechny potřebné emisní indexy CO/NO_X i hodnoty pro palivový tok, na jejichž základě bylo možné pro každý pohyb stanovit odhad jeho emisí (viz Příloha č. 2 pro letouny a Příloha č. 3 pro vrtulníky). Tabulka 16 uvádí hodnoty TIM pro jednotlivé provozní režimy pro všechny druhy motorů. U vrtulníků se „pojížděním ke vzletu“ rozumí doba mezi zapnutím motoru a vzletem (volnoběh na zemi před vzletem označený GI-D v Příloze 3); stejně tak „pojížděním ke stojánce“ se rozumí doba mezi dosednutím a vypnutím motoru (volnoběh na zemi po přistání označený GI-A v Příloze 3).

Tabulka 16: Přehled hodnot TIM pro jednotlivé druhy motorů

Provozní režim	TIM (min)			
	Proudové motory	Turbovrtulové motory	Pístové motory	Vrtulníky
Pojíždění ke vzletu	*(variabilní)*			4,0
Vzlet	0,7	0,5	0,3	3,0
Stoupání	2,2	2,5	2,5	
Přiblížení	4,0	4,5	3,0	5,5
Pojíždění ke stojánce	*(variabilní)*			1,0

Pro každý pohyb bylo nejprve dle údaje o typu letadla stanoveno, zda bude zahrnutý do výpočtů v rámci modelu. Pakliže ano, bylo dalším rozhodujícím parametrem, zda se jednalo o přílet, nebo odlet. Pokud se jednalo o odlet letounu, byly emise pohybu $\varepsilon_{\mathrm{total}_{DEP}}$ vypočítány pomocí vzorce (4.19); jednalo-li se o přílet letounu, byl pro výpočet emisí pohybu $\varepsilon_{\mathrm{total}_{ARR}}$ použit vzorec (4.20).

$$\varepsilon_{total_{DEP}} = n_m \cdot (t_{poOUT} \cdot \varphi_{po} \cdot \omega_{po} + t_{vz} \cdot \varphi_{vz} \cdot \omega_{vz} + t_{st} \cdot \varphi_{st} \cdot \omega_{st}) \tag{4.19}$$

$$\varepsilon_{total_{ARR}} = n_m \cdot (t_{p\check{r}} \cdot \varphi_{p\check{r}} \cdot \omega_{p\check{r}} + t_{poIN} \cdot \varphi_{po} \cdot \omega_{po}) \tag{4.20}$$

kde n_m je počet motorů daného letadla, t_{poIN} je doba pojíždění po přistání a t_{poOUT} je doba pojíždění před vzletem. Tyto vztahy byly platné pro letouny s proudovými, turbovrtulovými i pístovými motory. Specifickým případem byly vrtulníky, pro jejichž odlet byl použit vzorec (4.21), který je pouze lehce modifikovaným vzorcem (4.19) s ohledem na rozdíl v uvažovaných provozních režimech (konkrétně sloučení režimů vzlet a stoupání). Pro přílet vrtulníku byl použit vztah (4.22), který se od vzorce (4.20) liší pouze jiným provozním režimem reprezentujícím pojíždění po přistání.

$$\varepsilon_{total_{DEP,HELI}} = n_m \cdot (t_{(GI-D)} \cdot \varphi_{(GI-D)} \cdot \omega_{(GI-D)} + t_{vz} \cdot \varphi_{vz} \cdot \omega_{vz}) \tag{4.21}$$

$$\varepsilon_{total_{ARR,HELI}} = n_m \cdot (t_{p\check{r}} \cdot \varphi_{p\check{r}} \cdot \omega_{p\check{r}} + t_{(GI-A)} \cdot \varphi_{(GI-A)} \cdot \omega_{(GI-A)}) \tag{4.22}$$

Výběr konkrétní hodnoty t_{poOUT} a t_{poIN} závisel na aktuálním období podle tab. 10.

4.3.6 Seskupení emisí pohybů po hodinách

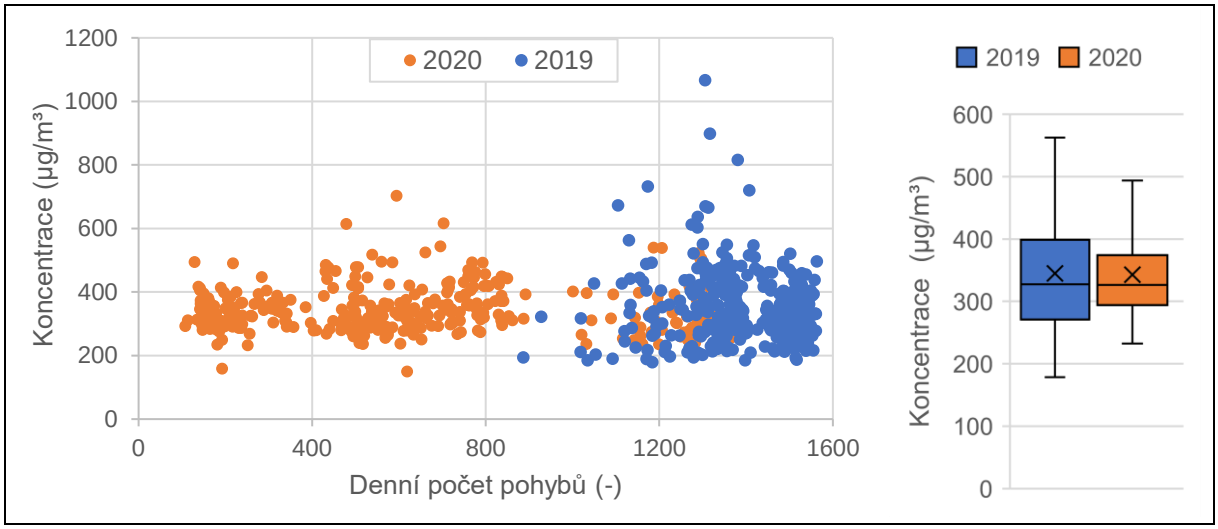
Veškeré spočítané emise všech pohybů za danou hodinu byly sečteny, načež byl tento součet přiřazen k začátku následující hodiny. Například tedy byly sečteny všechny emise vzniklé za období 12:00-12:59 a následně byl tento součet uveden u času 13:00. Tím pádem bylo možné spárovat tento součet s příslušnou naměřenou koncentraci dané látky za stejnou uplynulou hodinu.

5 Prezentace výsledků

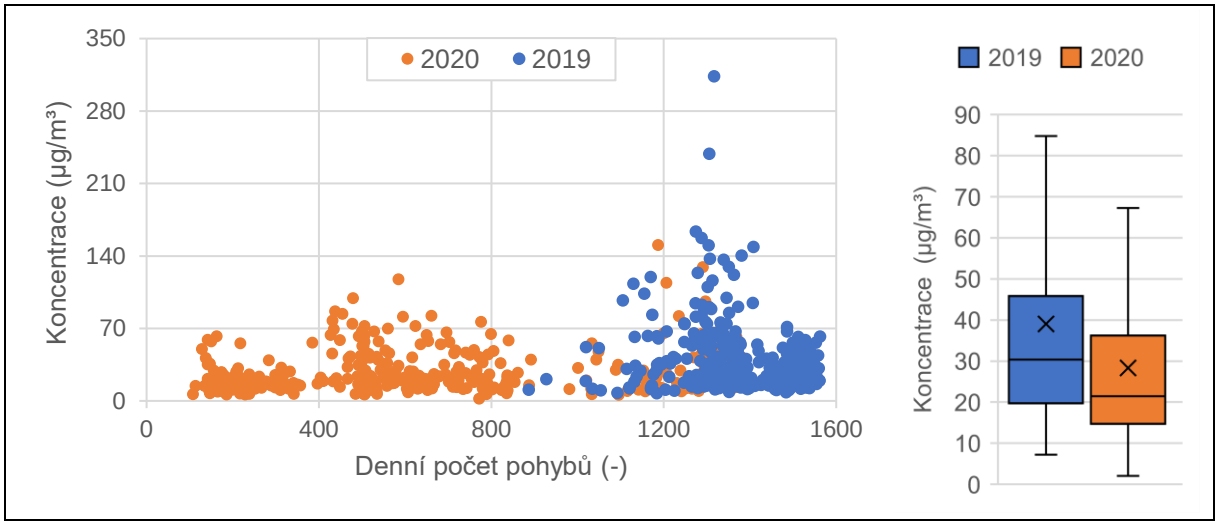
V této kapitole budou představeny výsledky analýzy dat pro všechna zkoumaná letiště. Pro větší přehlednost bude tato kapitola členěna na podkapitoly věnující se jednotlivým letištím. Podkapitola věnující se prezentaci výsledků analýzy dat v případě pražského letiště je dále členěna na oddíl věnující se základní analýze dat a oddíl věnovaný výsledkům zpracovaného LTO modelu pro emise CO a NO_X.

5.1 Amsterdam

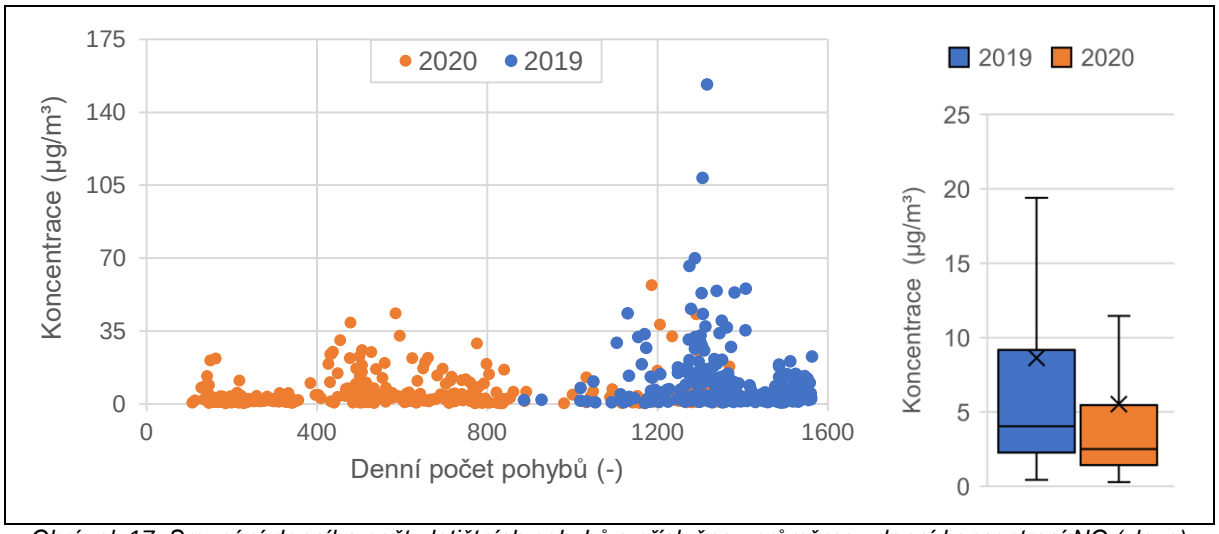
Následující grafy (obr. 15 až 20) zobrazují srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací dané látky (vlevo) včetně zpracovaného krabicového diagramu (vpravo) a barevného rozlišení zkoumaných období (roky 2019 a 2020).



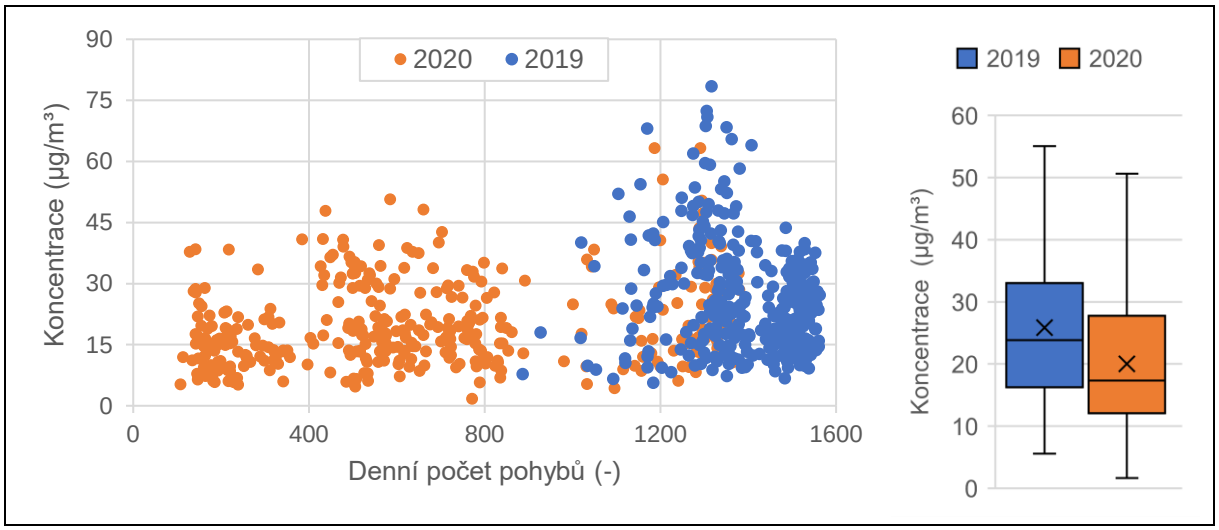
Obrázek 15: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací CO (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (AMS, 2019-2020)



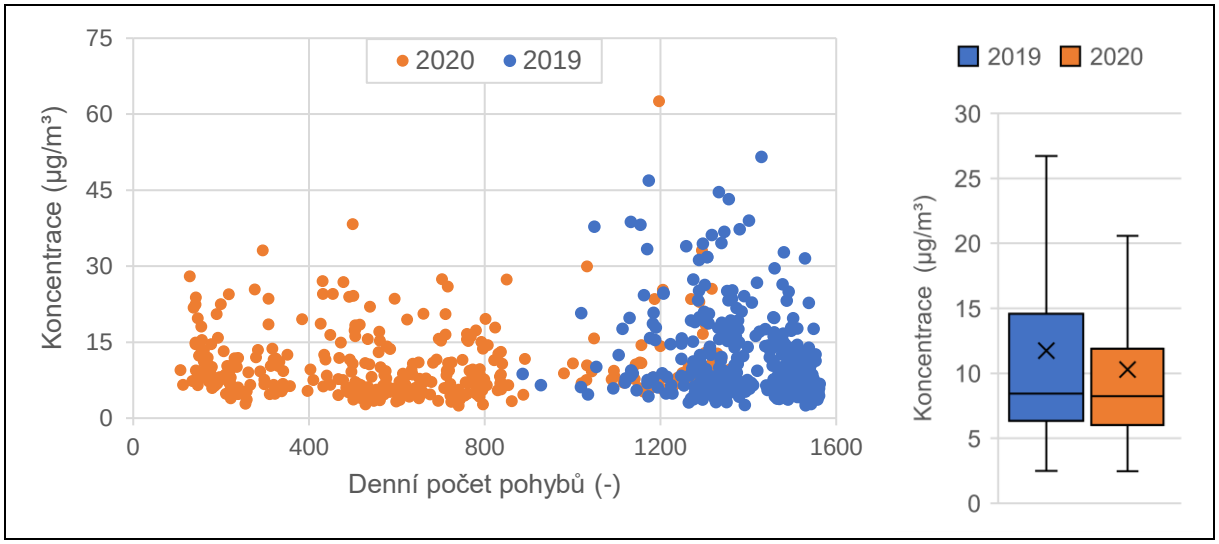
Obrázek 16: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO_X (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (AMS, 2019-2020)



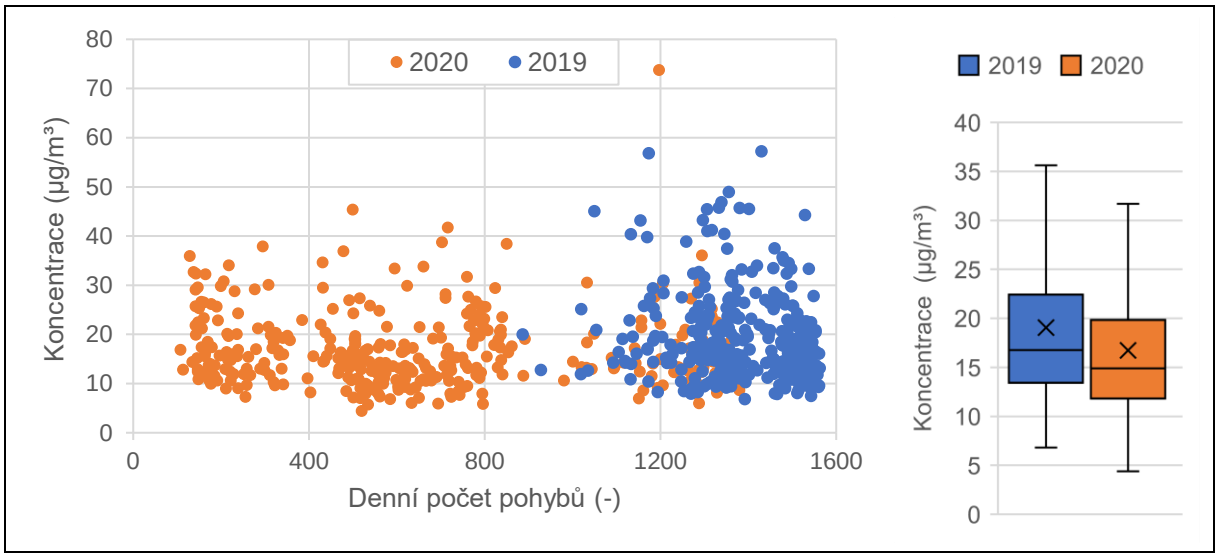
Obrázek 17: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (AMS, 2019-2020)



Obrázek 18: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO_2 (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (AMS, 2019-2020)



Obrázek 19: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací $PM_{2,5}$ (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (AMS, 2019-2020)



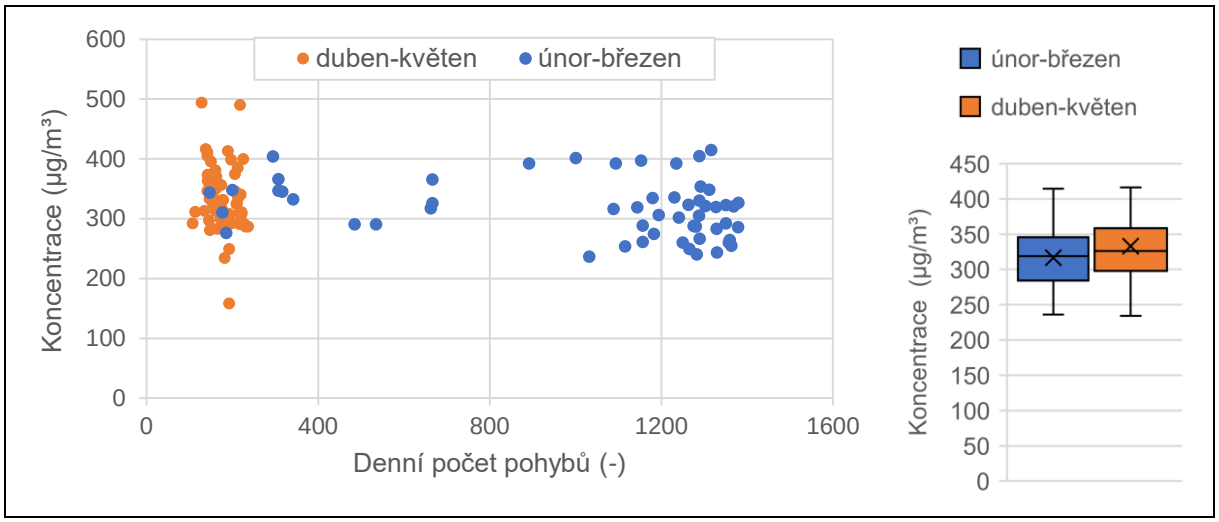
Obrázek 20: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací PM_{10} (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (AMS, 2019-2020)

Tabulka 17 obsahuje výsledky testování hypotéz pro jednotlivé látky, že medián výběru dat pro danou látku odpovídajícího roku 2019 je vyšší, než medián výběru za rok 2020.

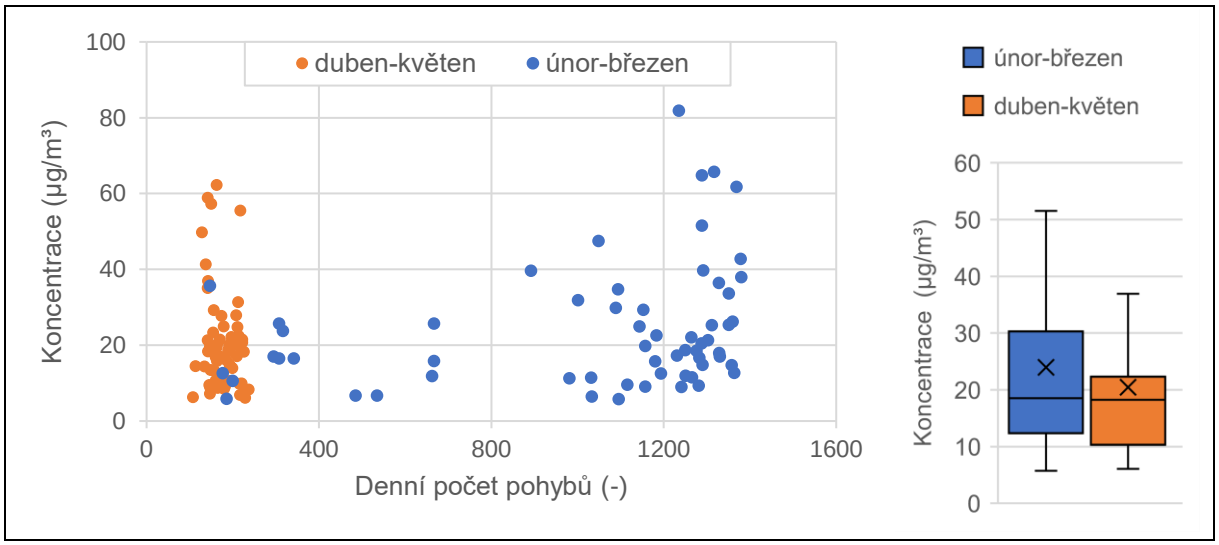
Tabulka 17: Výsledky testování hypotéz o meziročním poklesu hodnot denních průměrných koncentrací jednotlivých látek (AMS, 2019-2020)

Látka	**p-hodnota**	**p >0,05?**	**Verdikt**
CO	0,0978	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá
NO	1,0000	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá
NO_2	1,0000	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá
NO_X	1,0000	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá
$PM_{2,5}$	0,9568	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá
PM_{10}	1,0000	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá

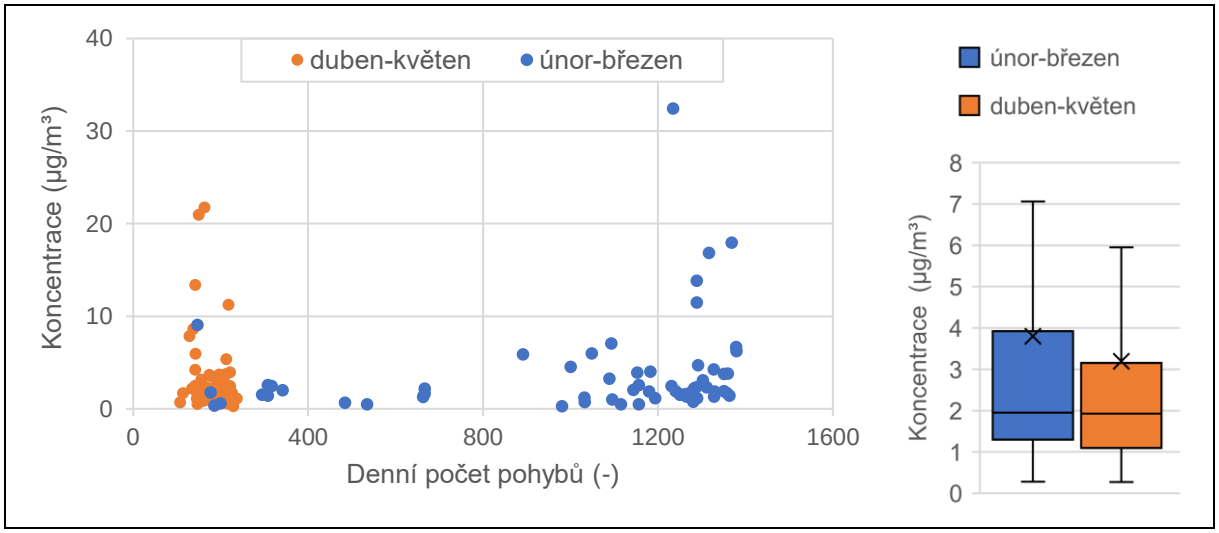
Následující grafy (obr. 21 až 26) zobrazují srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací dané látky (vlevo) včetně zpracovaného krabicového diagramu (vpravo) a barevného rozlišení zkoumaných období (únor-březen 2020 a duben-květen 2020).



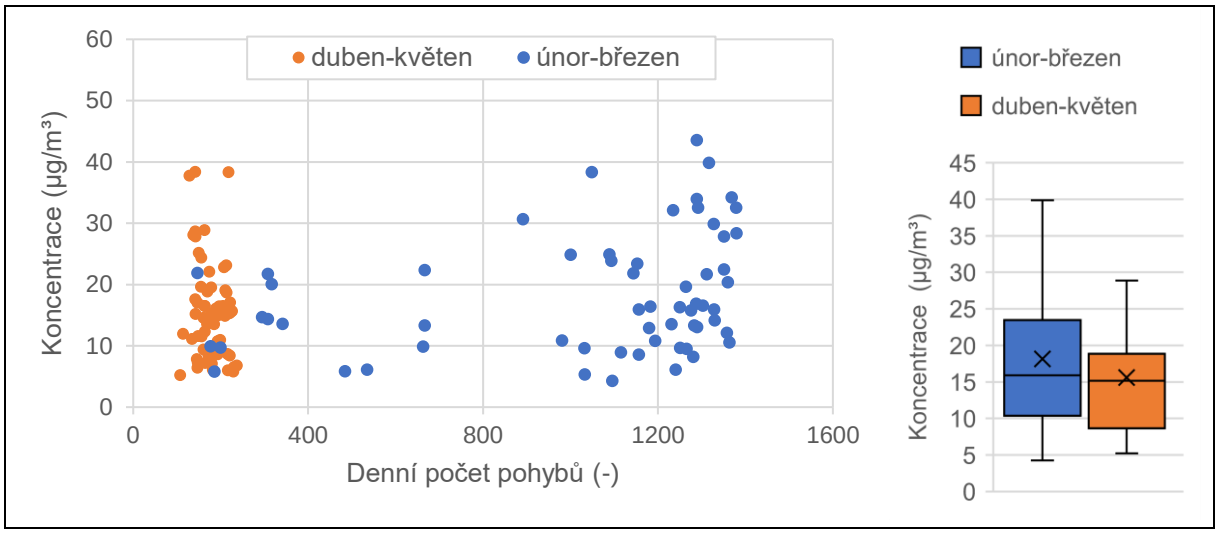
Obrázek 21: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací CO (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (AMS, únor-květen 2020)



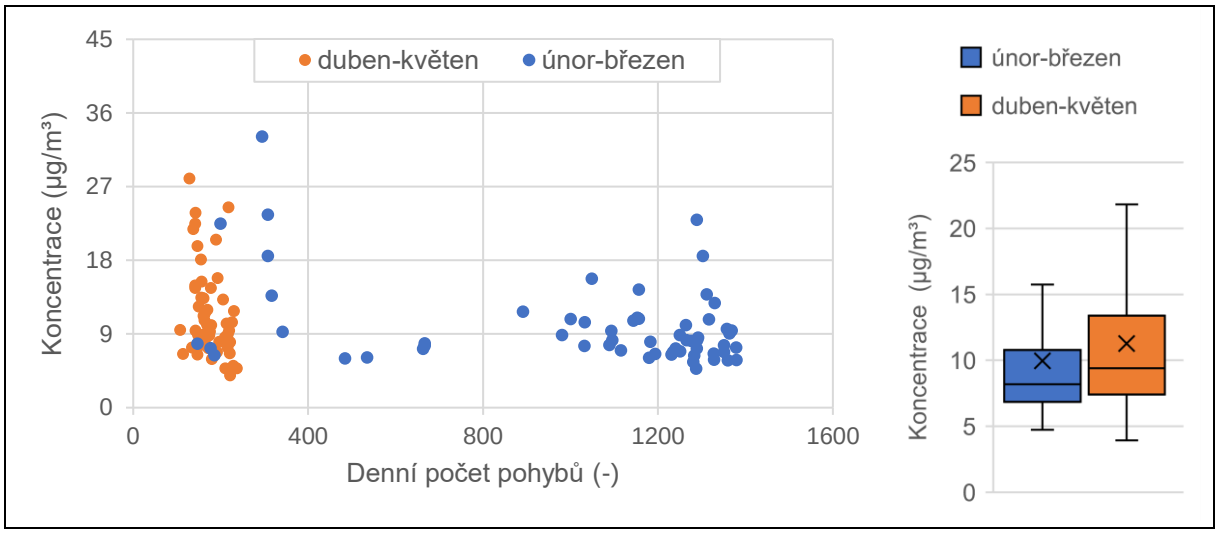
Obrázek 22: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO_X (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (AMS, únor-květen 2020)



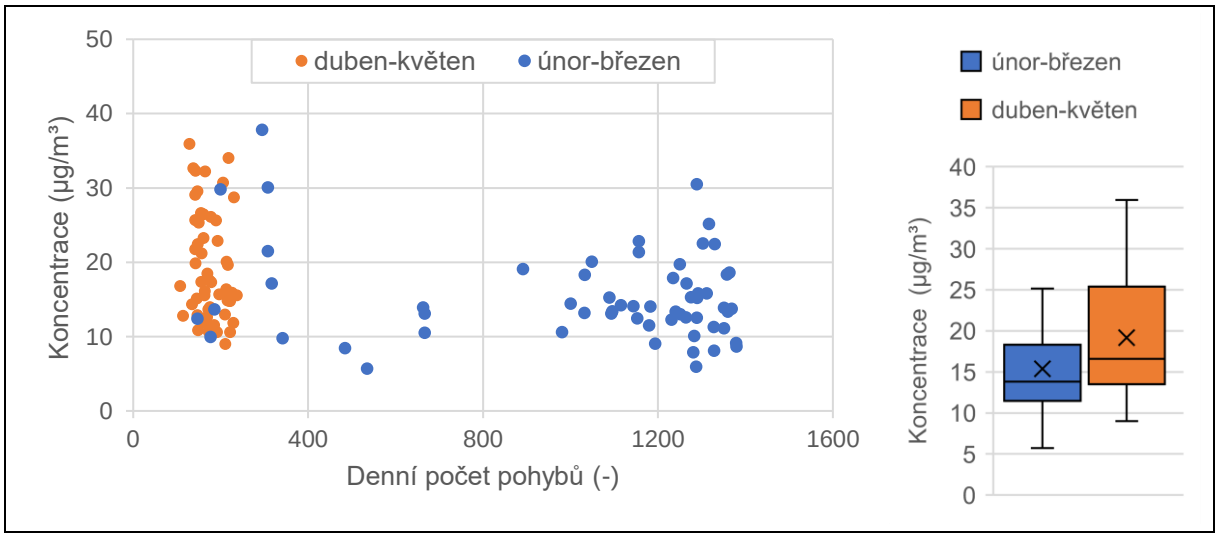
Obrázek 23: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (AMS, únor-květen 2020)



Obrázek 24: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO_2 (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (AMS, únor-květen 2020)



Obrázek 25: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací $PM_{2,5}$ (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (AMS, únor-květen 2020)



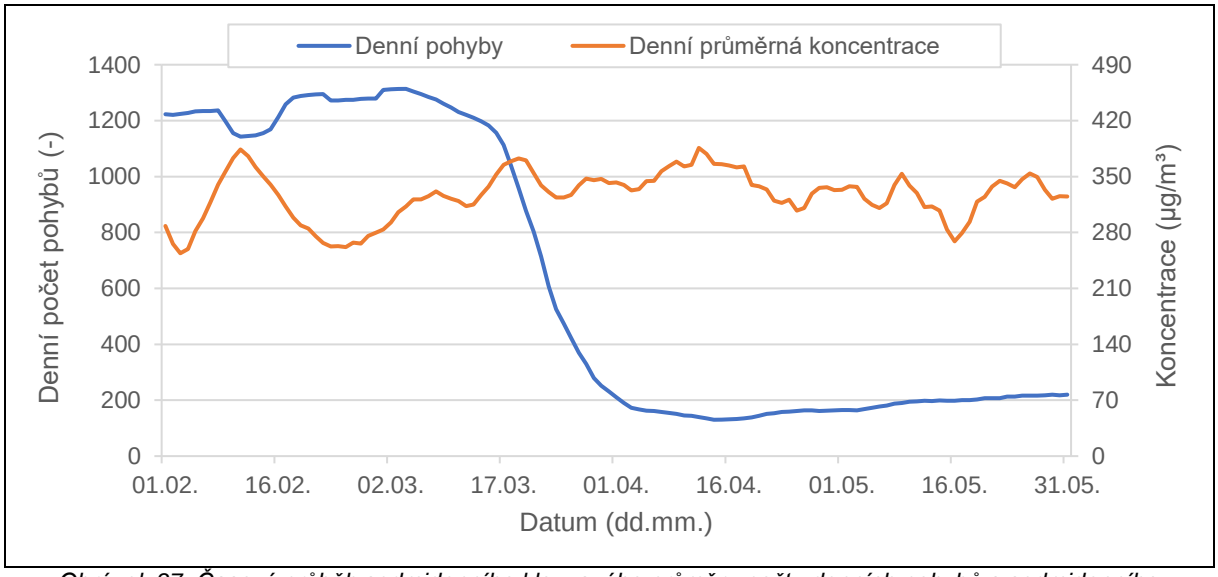
Obrázek 26: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací PM_{10} (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (AMS, únor-květen 2020)

Tabulka 18 ukazuje výsledky testování hypotéz pro jednotlivé látky, že medián výběru dat odpovídajícího období únor-březen 2020 je vyšší, než medián výběru za období duben-květen 2020.

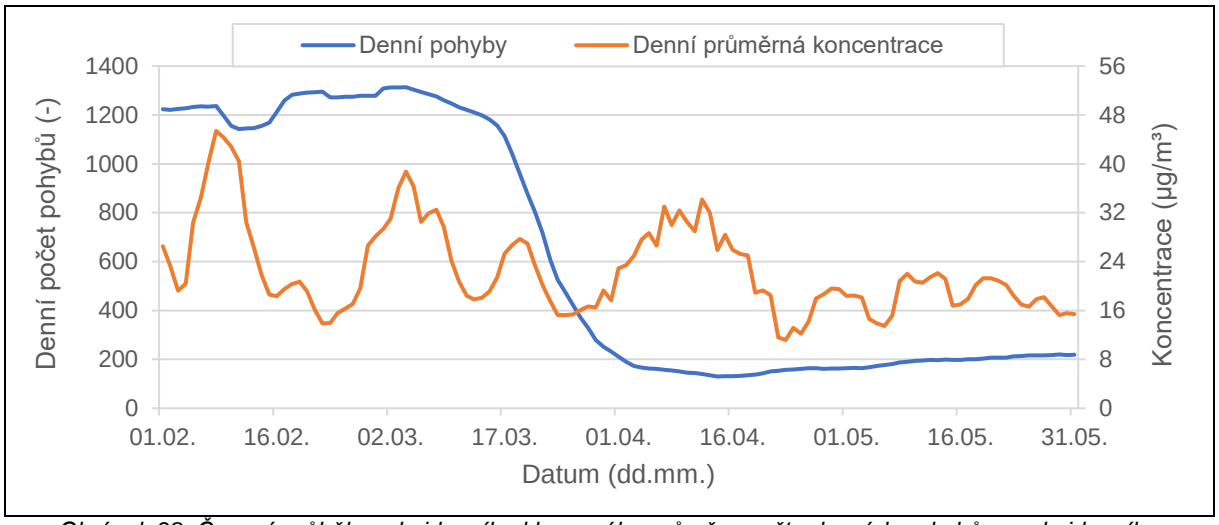
Tabulka 18: Výsledky testování hypotéz o poklesu hodnot denních průměrných koncentrací jednotlivých látek (AMS, únor-březen/duben-květen 2020)

Látka	p-hodnota	p >0,05?	Verdikt
CO	0,0373	Ne	Nulová hypotéza se zamítá
NO	0,7060	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá
NO_2	0,9078	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá
NO_X	0,8829	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá
$PM_{2,5}$	0,0547	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá
PM_{10}	0,0027	Ne	Nulová hypotéza se zamítá

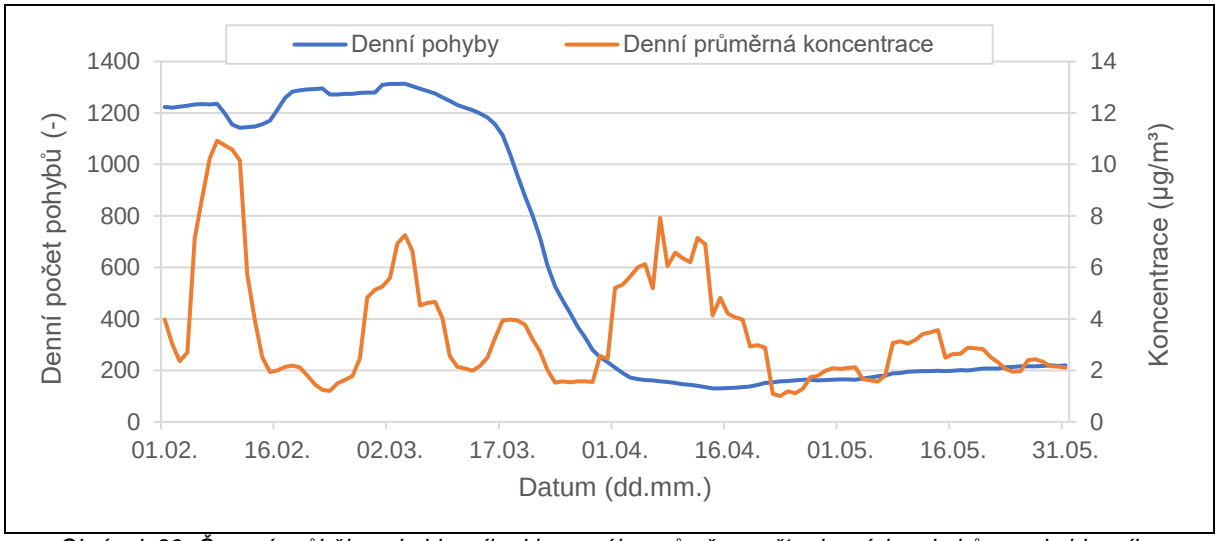
Následující grafy (obr. 27 až 32) zobrazují časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace dané naměřené látky během období únor-květen 2020.



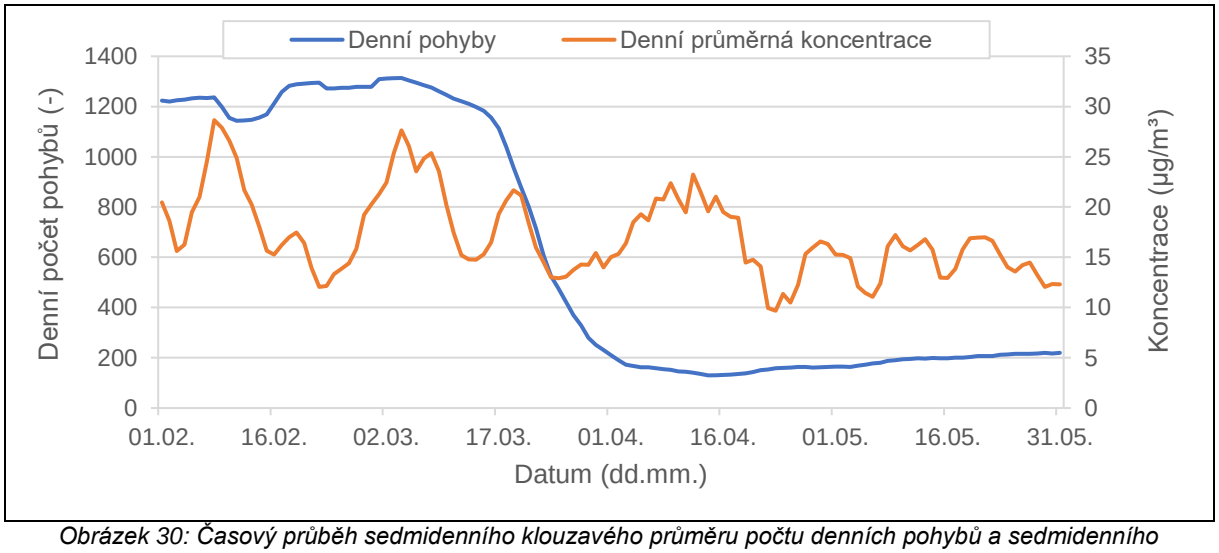
Obrázek 27: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace CO (AMS, únor-květen 2020)



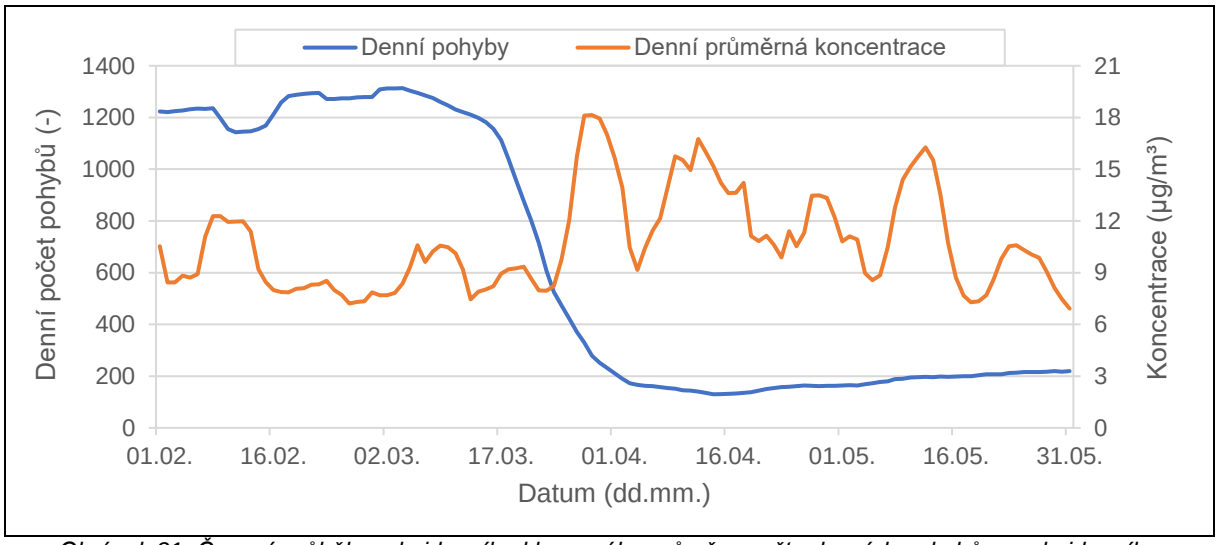
Obrázek 28: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace NO_X (AMS, únor-květen 2020)



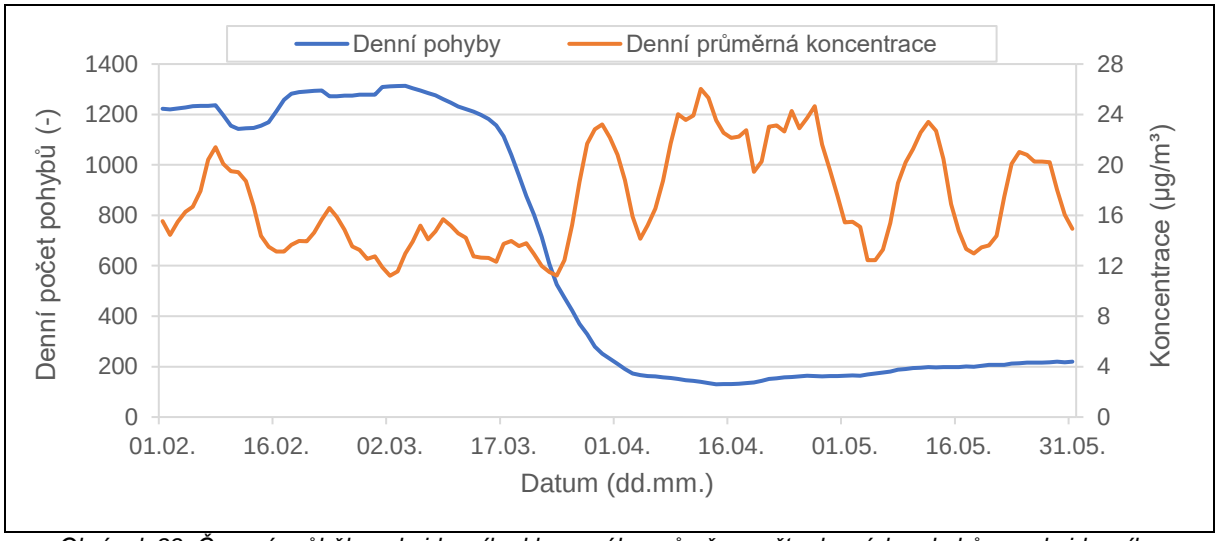
Obrázek 29: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace NO (AMS, únor-květen 2020)



Obrázek 30: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace NO_2 (AMS, únor-květen 2020)

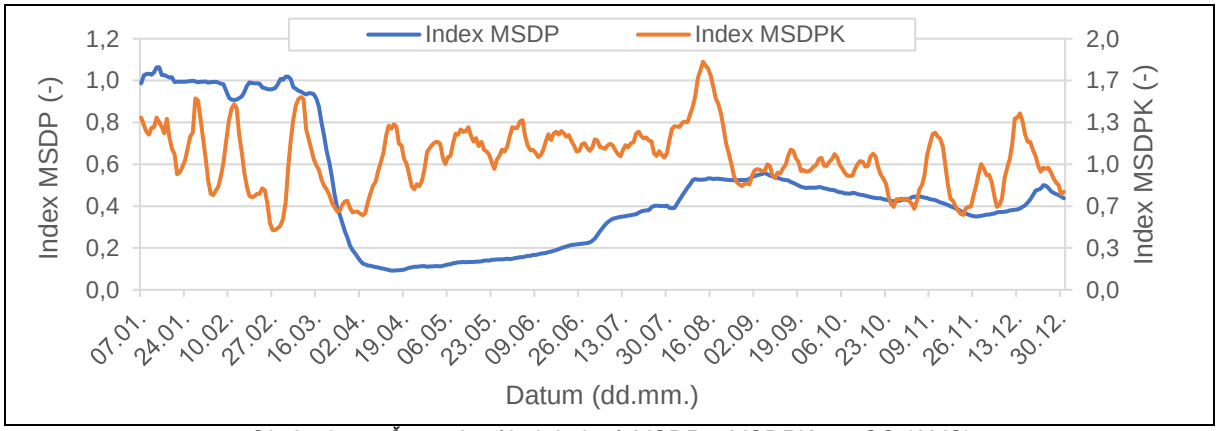


Obrázek 31: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace $PM_{2,5}$ (AMS, únor-květen 2020)

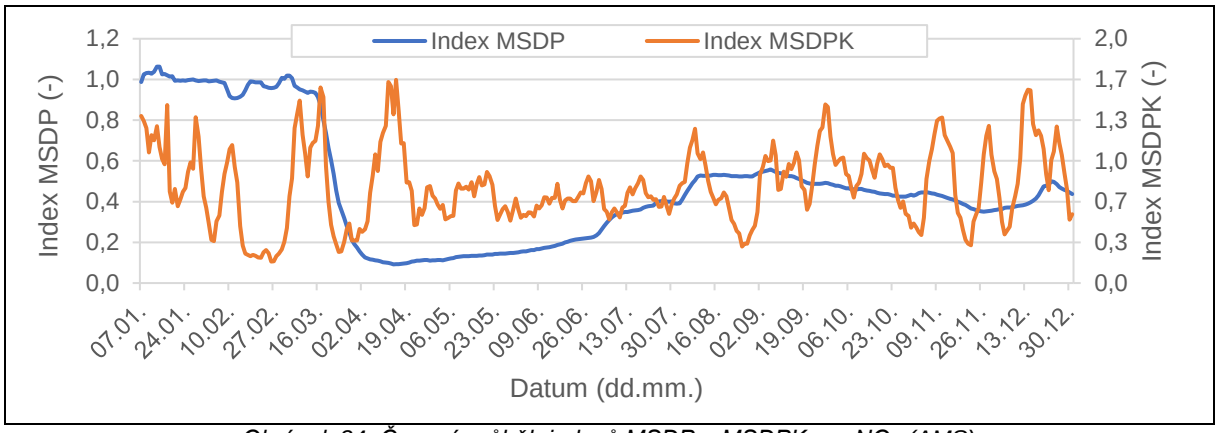


Obrázek 32: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace PM_{10} (AMS, únor-květen 2020)

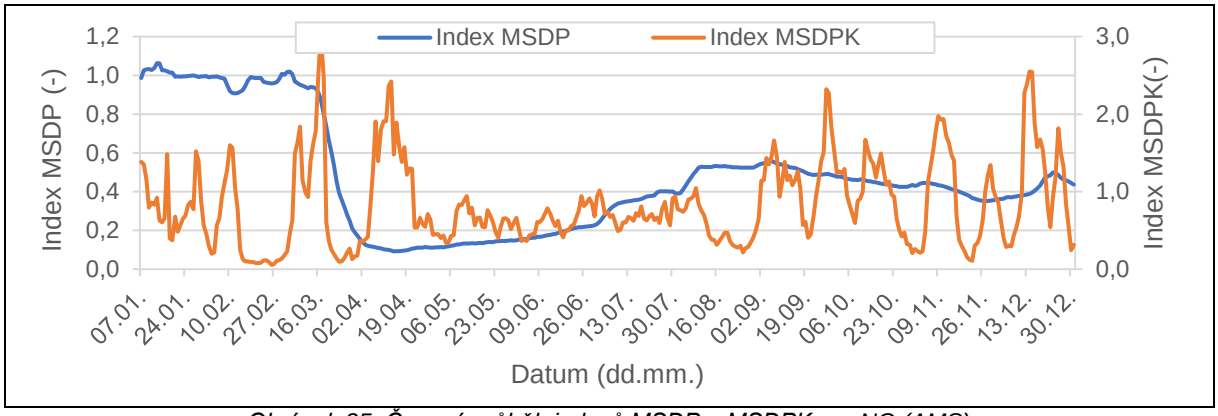
Následující grafy (obr. 33 až 38) zobrazují časový průběh indexů MSDP a MSDPK (definovány v podkapitole 4.2) pro jednotlivé zkoumané látky.



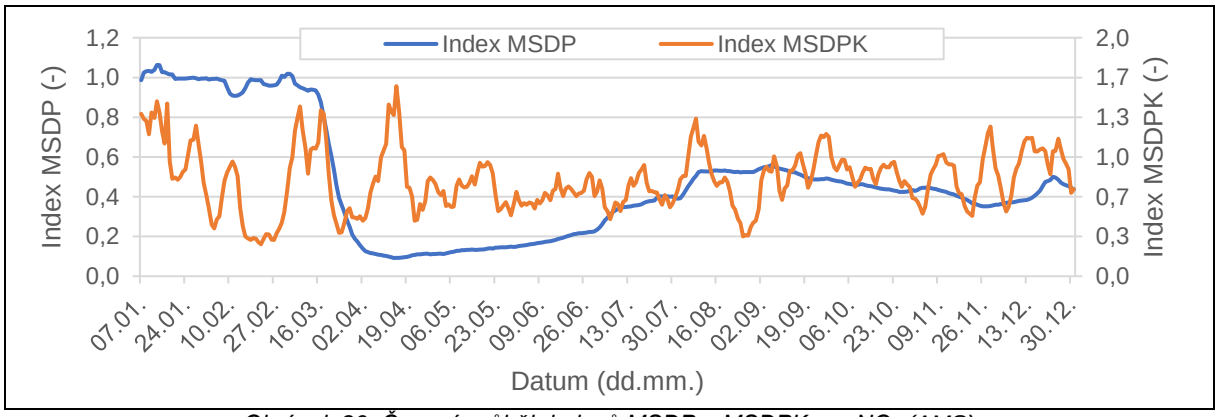
Obrázek 33: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro CO (AMS)



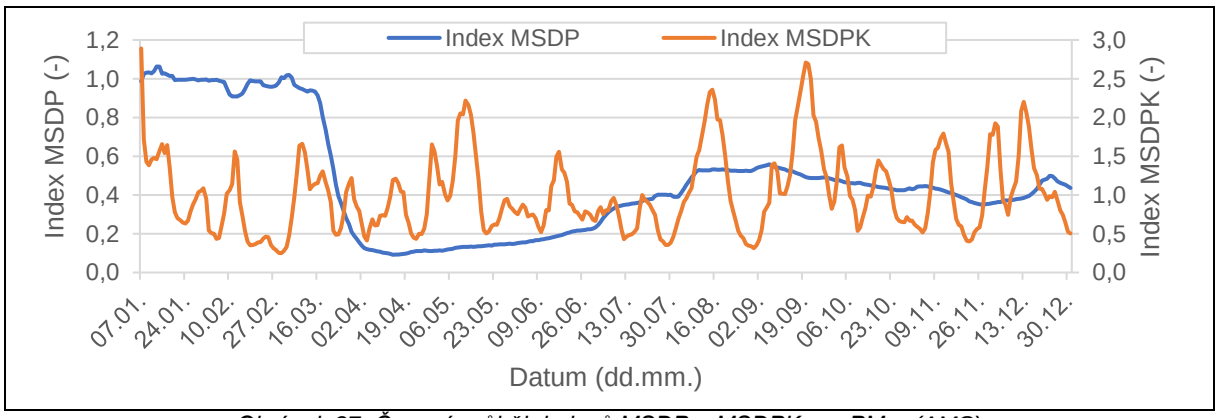
Obrázek 34: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro NO_X (AMS)



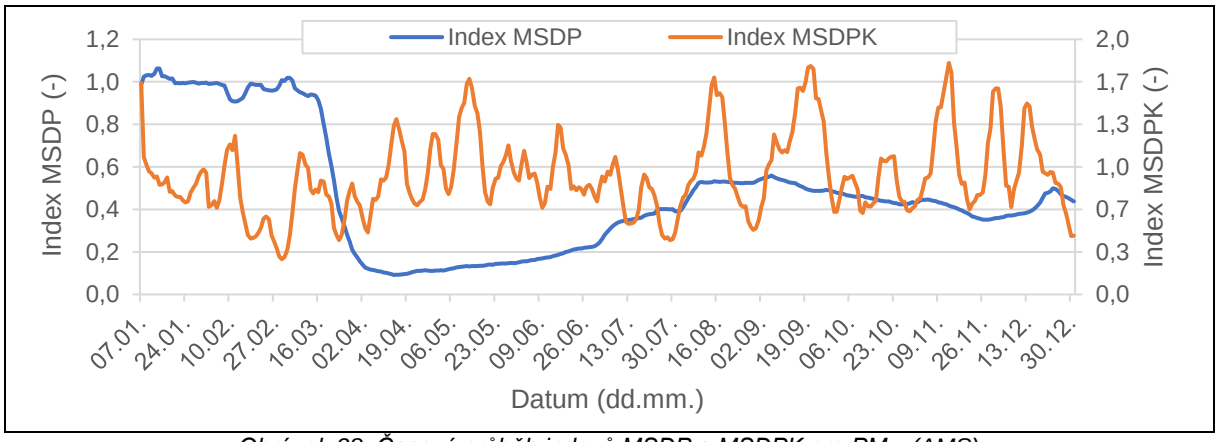
Obrázek 35: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro NO (AMS)



Obrázek 36: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro NO_2 (AMS)

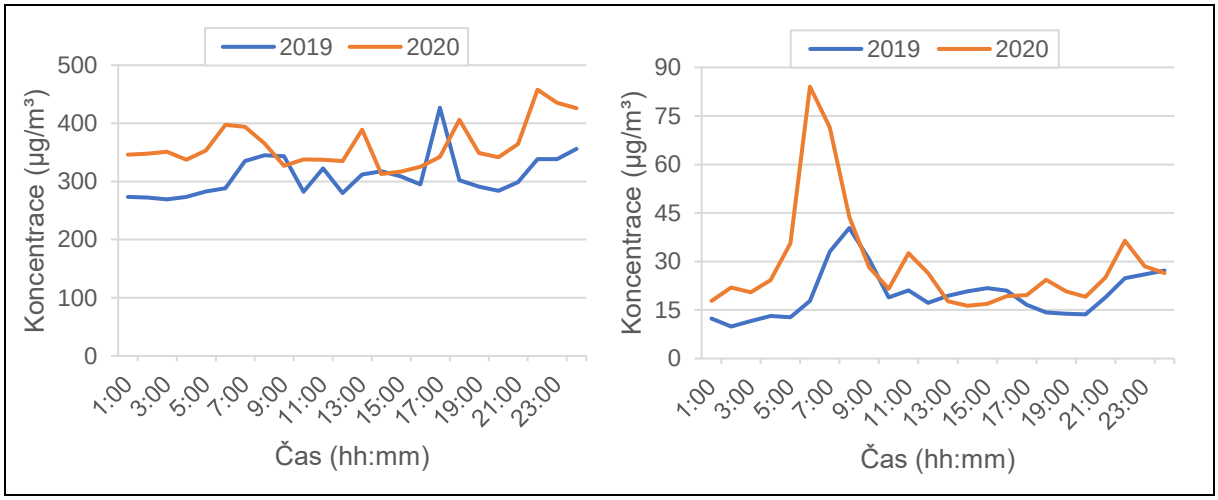


Obrázek 37: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro $PM_{2,5}$ (AMS)

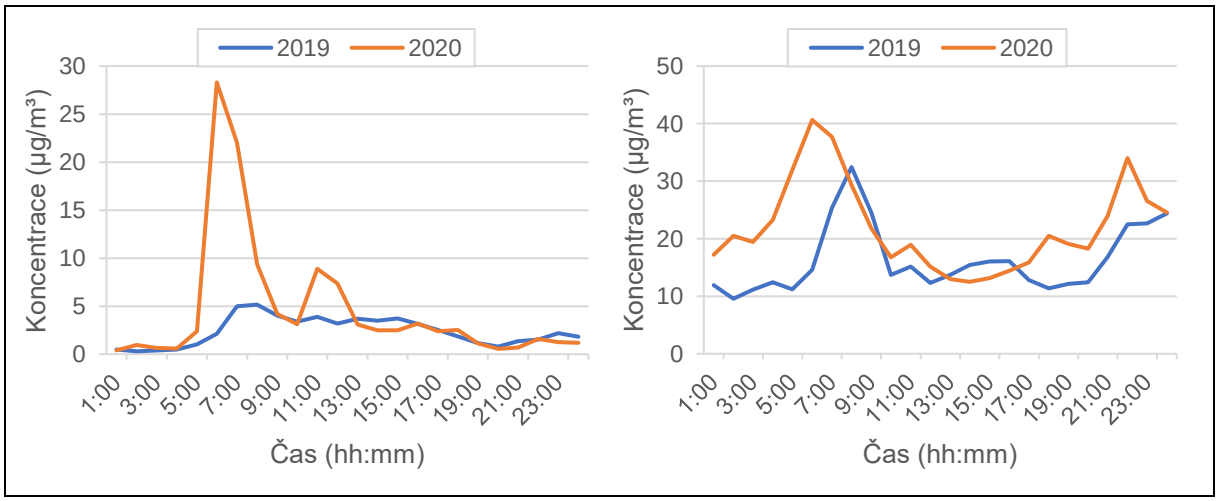


Obrázek 38: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro PM_{10} (AMS)

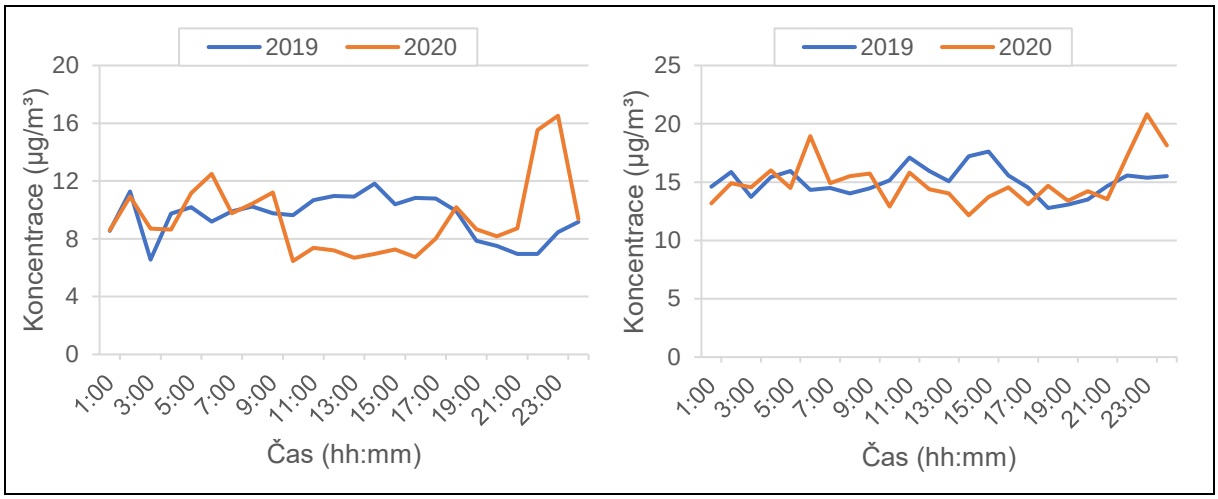
Následující grafy (obr. 39 až 41) zobrazují průměrný denní průběh koncentrací zkoumaných látek na základě zprůměrování dat pro vybrané dny (15. den měsíců březen-červenec) s barevným rozlišením podle roku (2019/2020).



Obrázek 39: Srovnání denního průběhu koncentrací CO (vlevo) a NO_X (vpravo) pro vybraný vzorek dní z období březen-červenec 2019/2020 (AMS)



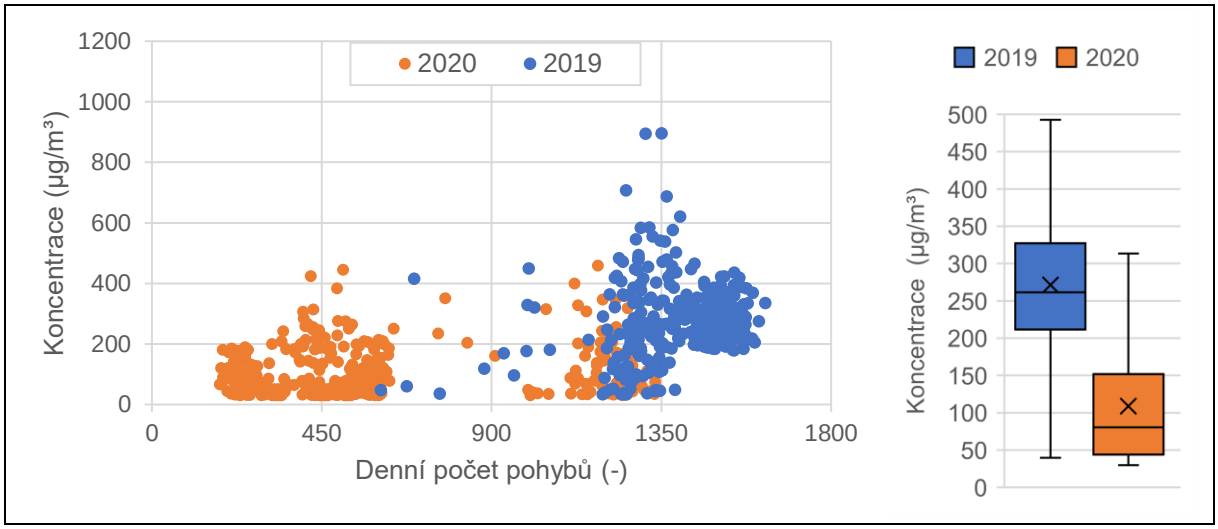
Obrázek 40: Srovnání denního průběhu koncentrací NO (vlevo) a NO_2 (vpravo) pro vybraný vzorek dní z období březen-červenec 2019/2020 (AMS)



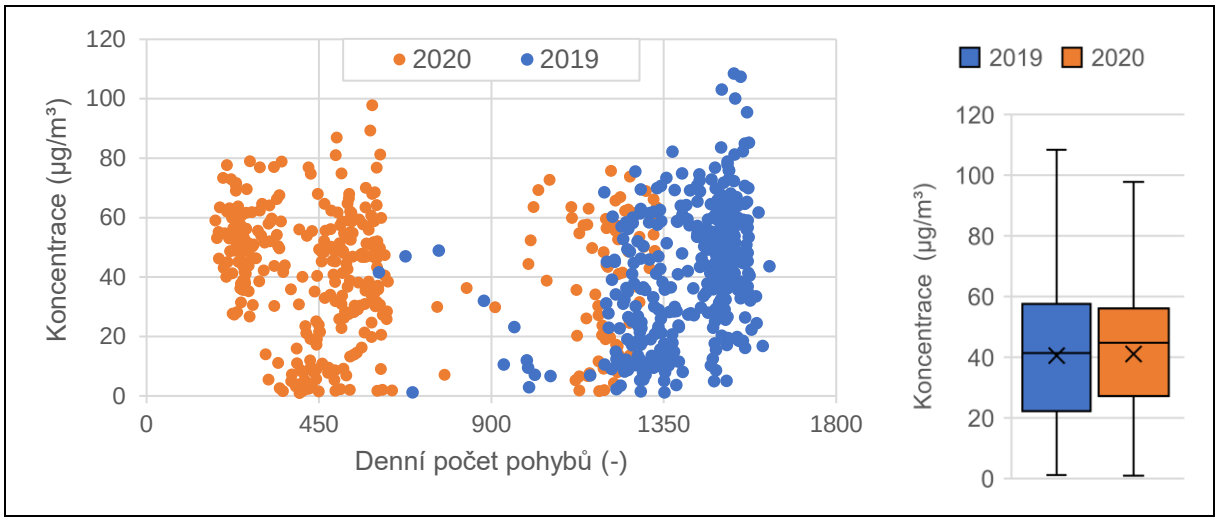
Obrázek 41: Srovnání denního průběhu koncentrací $PM_{2,5}$ (vlevo) a PM_{10} (vpravo) pro vybraný vzorek dní z období březen-červenec 2019/2020 (AMS)

5.2 Frankfurt

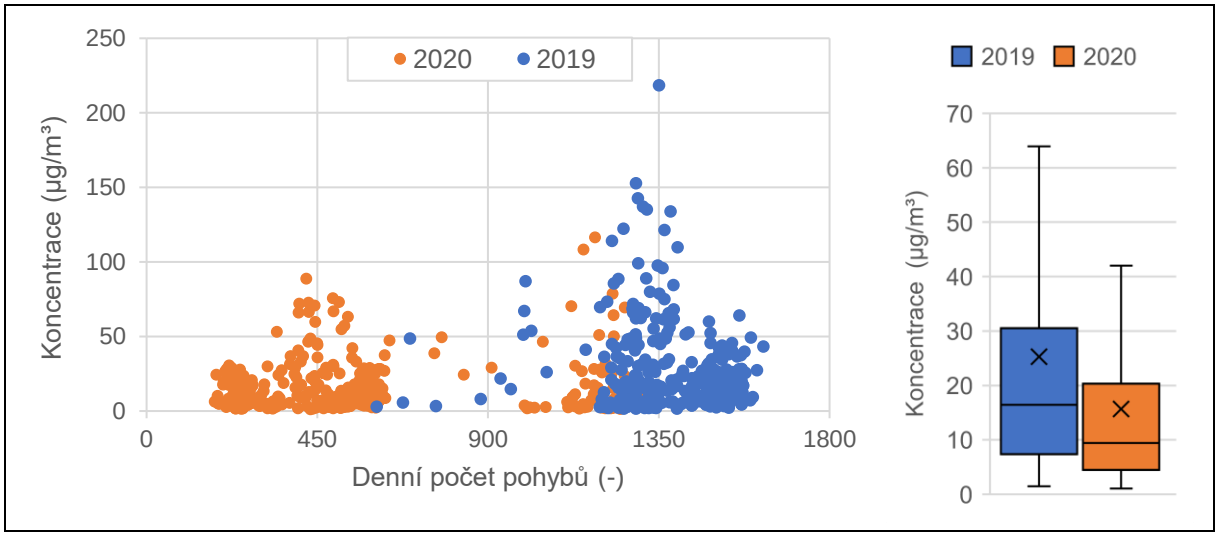
Následující grafy (obr. 42 až 47) zobrazují srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací dané látky (vlevo) včetně zpracovaného krabicového diagramu (vpravo) a barevného rozlišení zkoumaných období (roky 2019 a 2020).



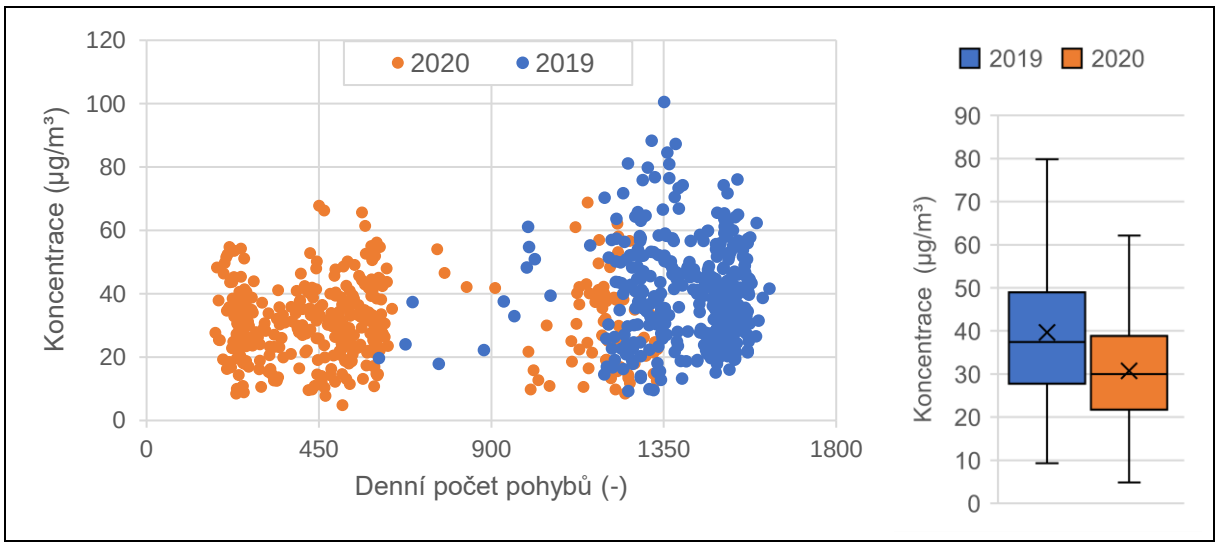
Obrázek 42: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací CO (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (FRA, 2019-2020)



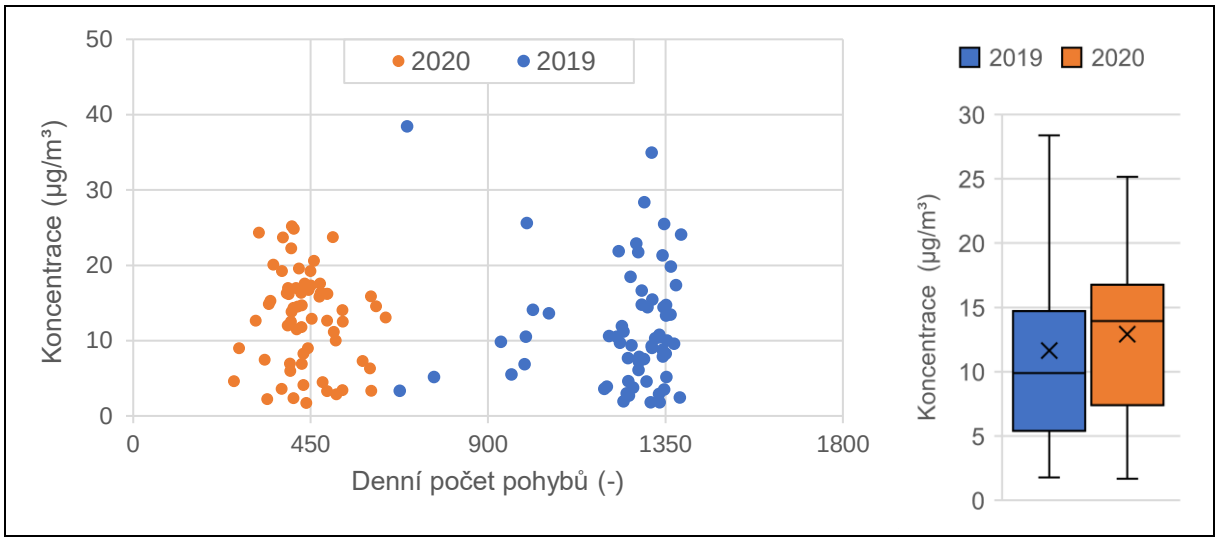
Obrázek 43: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací O_3 (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (FRA, 2019-2020)



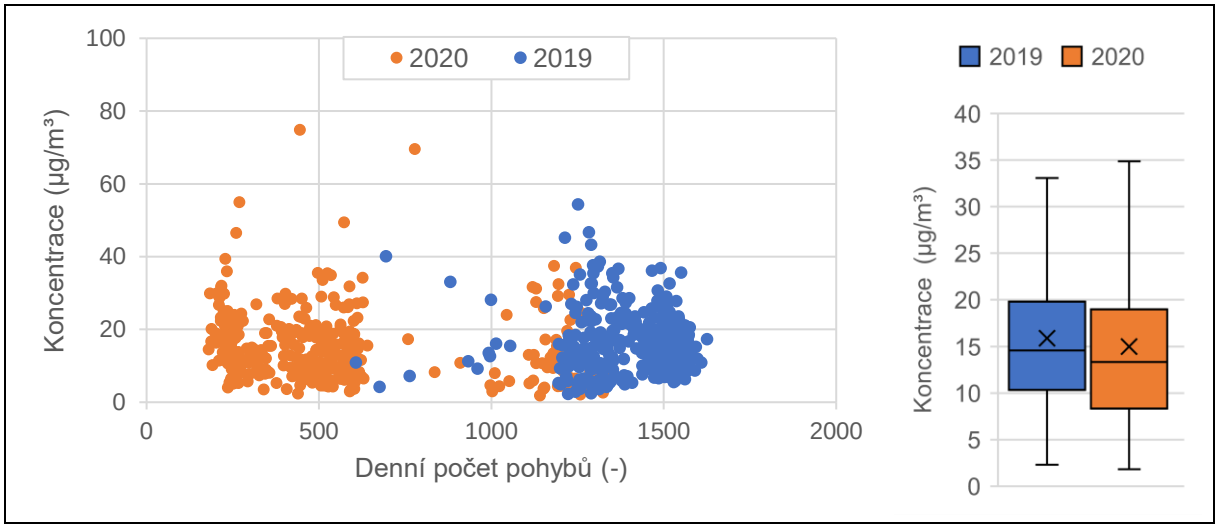
Obrázek 44: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (FRA, 2019-2020)



Obrázek 45: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO_2 (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (FRA, 2019-2020)



Obrázek 46: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací $PM_{2,5}$ (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (FRA, 2019-2020)



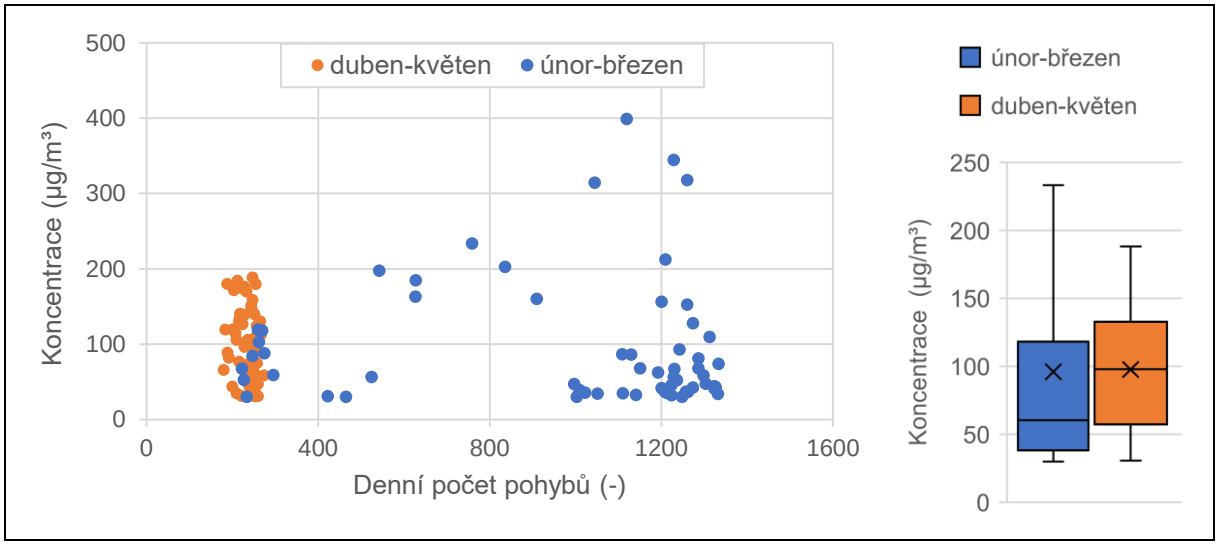
Obrázek 47: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací PM_{10} (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (FRA, 2019-2020)

Tabulka 19 obsahuje výsledky testování hypotéz pro jednotlivé látky, že medián výběru dat odpovídajícího roku 2019 je vyšší, než medián výběru za rok 2020.

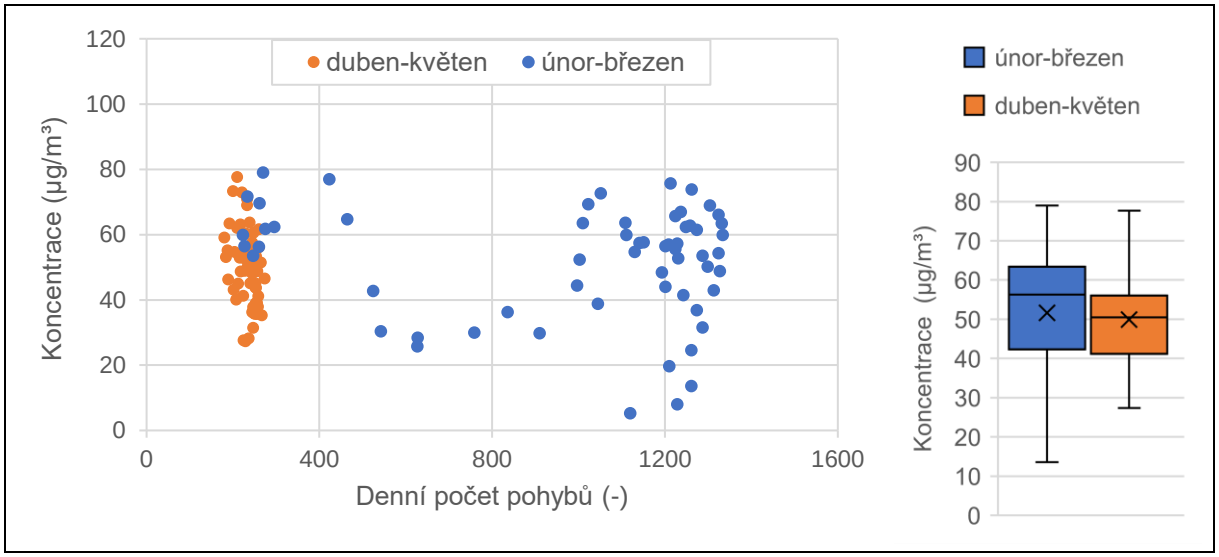
Tabulka 19: Výsledky testování hypotéz o meziročním poklesu hodnot denních průměrných koncentrací jednotlivých látek (FRA, 2019-2020)

Látka	**p-hodnota**	**p >0,05?**	**Verdikt**
CO	1,0000	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá
O_3	0,2944	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá
NO	1,0000	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá
NO_2	1,0000	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá
$PM_{2,5}$	0,0536	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá
PM_{10}	0,9830	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá

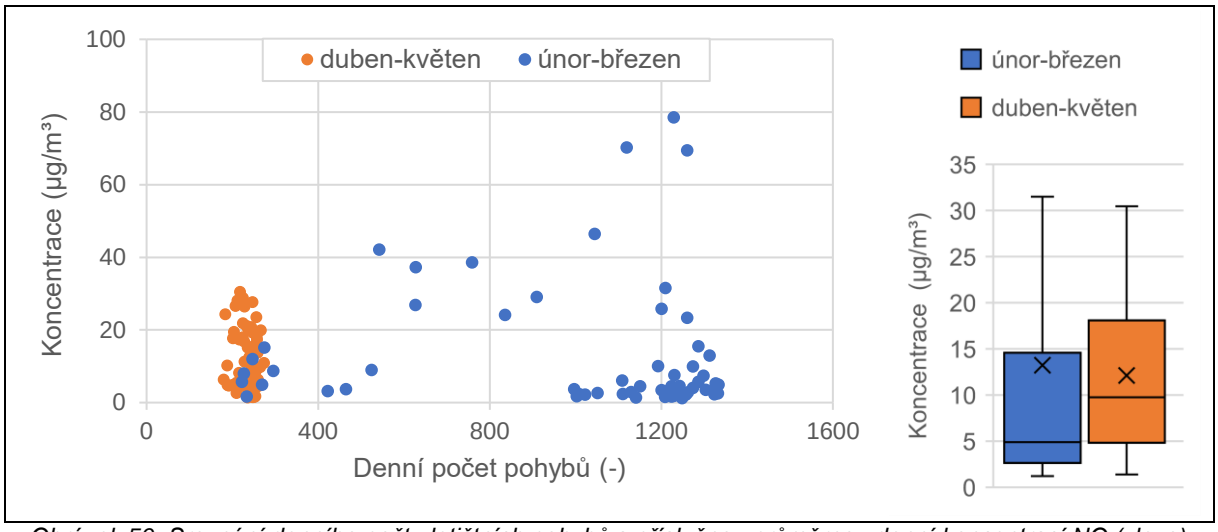
Následující grafy (obr. 48 až 53) zobrazují srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací dané látky (vlevo) včetně zpracovaného krabicového diagramu (vpravo) a barevného rozlišení zkoumaných období (únor-březen 2020 a duben-květen 2020).



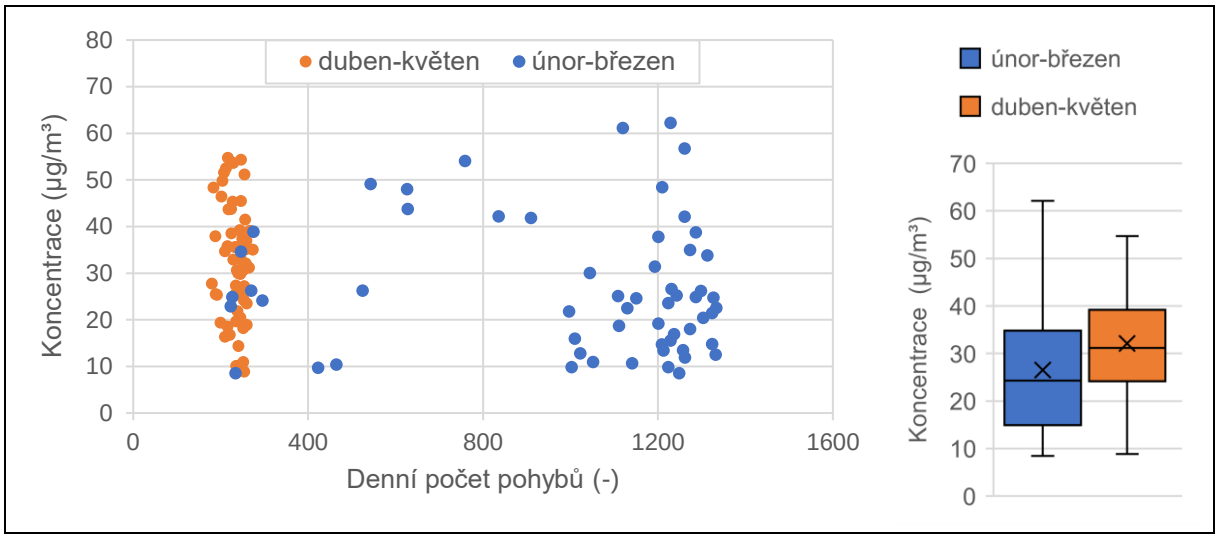
Obrázek 48: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací CO (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (FRA, únor-květen 2020)



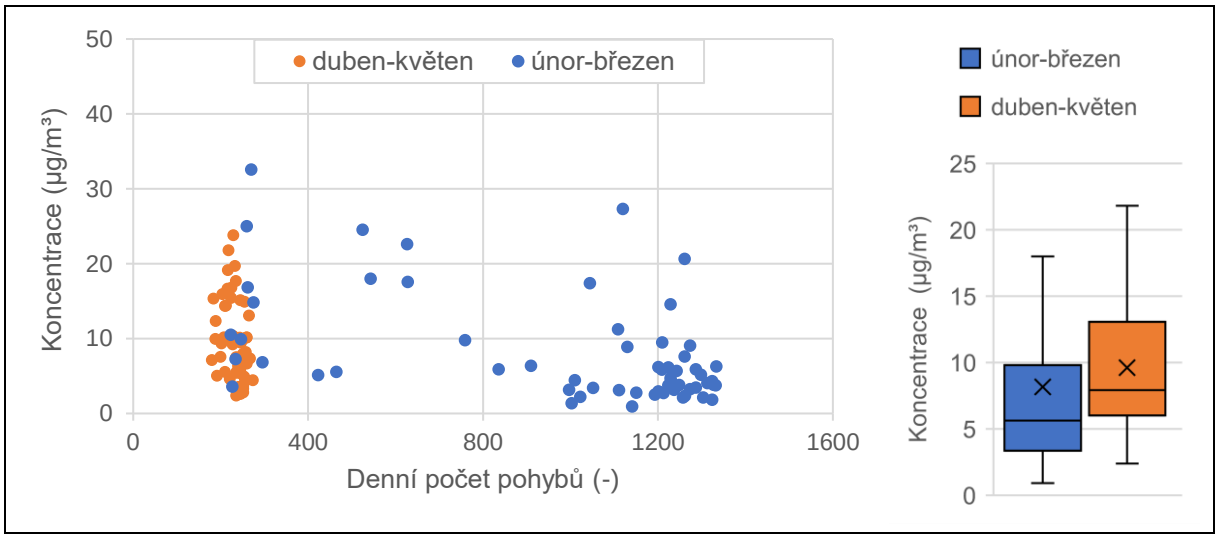
Obrázek 49: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací O_3 (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (FRA, únor-květen 2020)



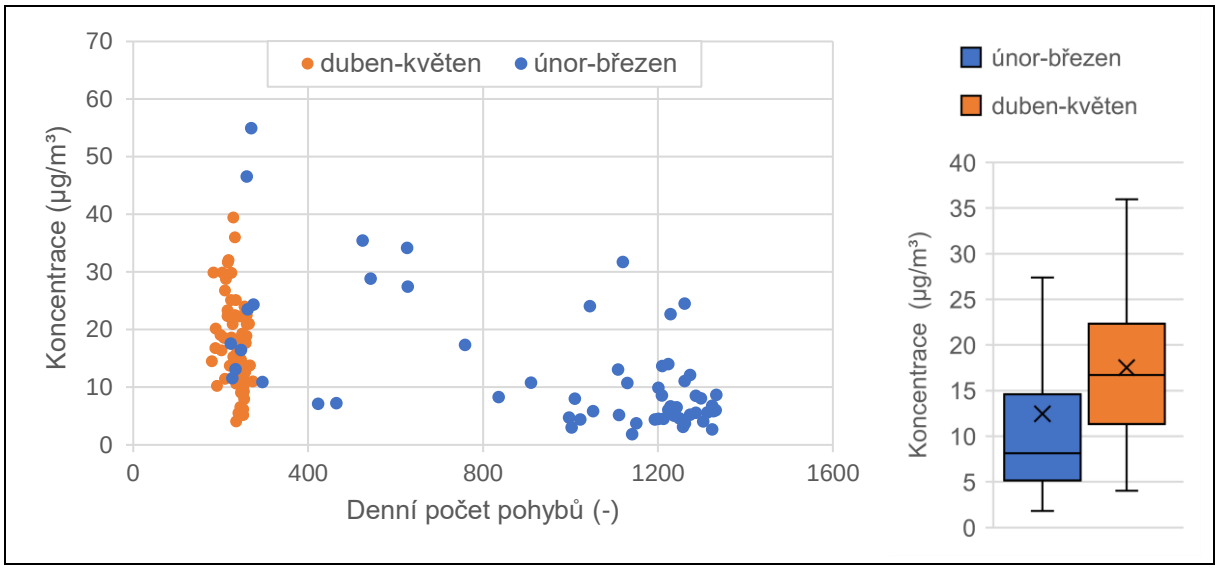
Obrázek 50: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (FRA, únor-květen 2020)



Obrázek 51: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO_2 (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (FRA, únor-květen 2020)



Obrázek 52: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací $PM_{2,5}$ (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (FRA, únor-květen 2020)



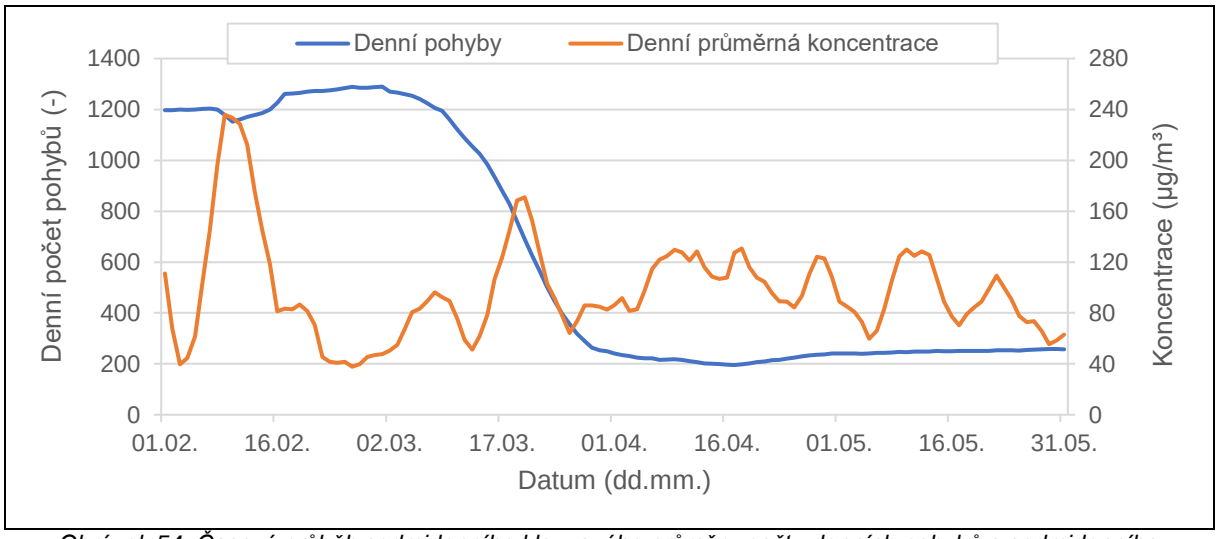
Obrázek 53: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací PM_{10} (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (FRA, únor-květen 2020)

Tabulka 20 ukazuje výsledky testování hypotéz pro jednotlivé látky, že medián výběru dat odpovídajícího období únor-březen 2020 je vyšší, než medián výběru za období duben-květen 2020.

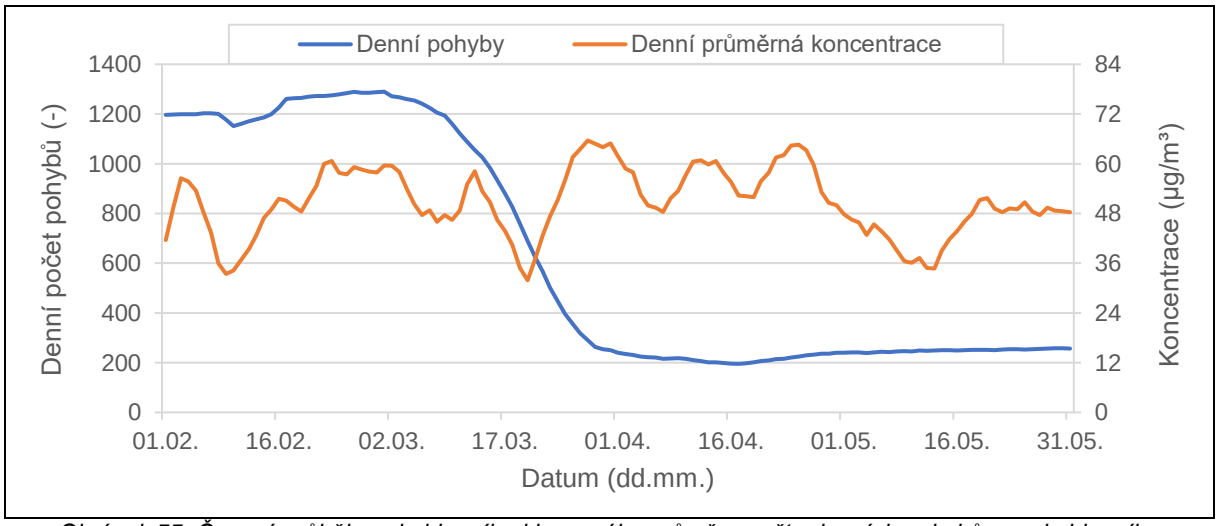
Tabulka 20: Výsledky testování hypotéz o poklesu hodnot denních průměrných koncentrací jednotlivých látek (FRA, únor-březen/duben-květen 2020)

Látka	**p-hodnota**	**p >0,05?**	**Verdikt**
CO	0,0317	Ne	Nulová hypotéza se zamítá
O_3	0,9479	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá
NO	0,0148	Ne	Nulová hypotéza se zamítá
NO_2	0,0034	Ne	Nulová hypotéza se zamítá
$PM_{2,5}$	0,0019	Ne	Nulová hypotéza se zamítá
PM_{10}	0,0000	Ne	Nulová hypotéza se zamítá

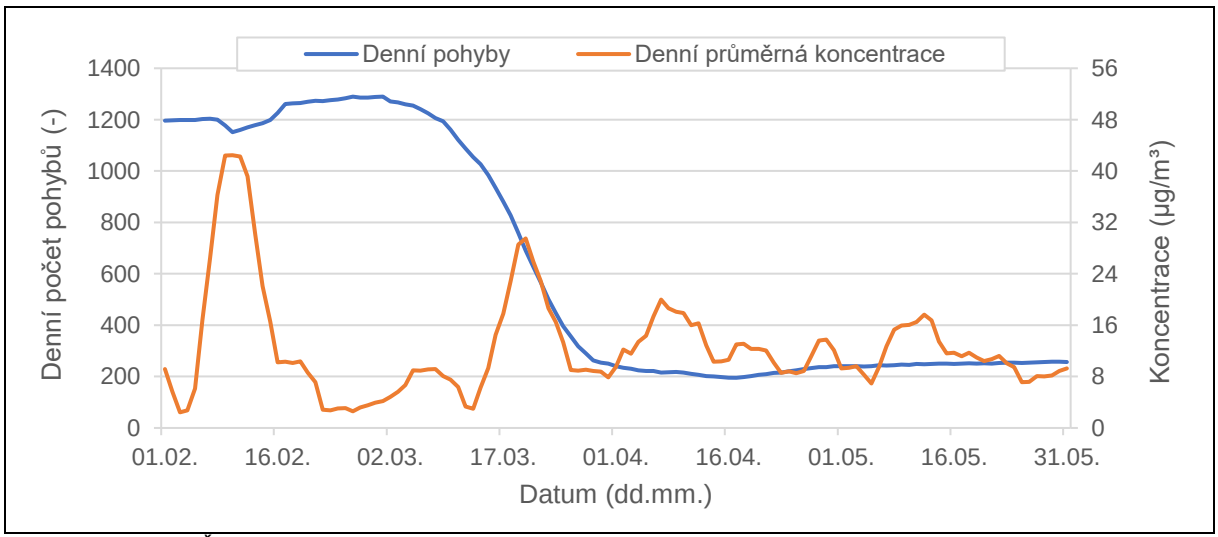
Následující grafy (obr. 54 až 59) zobrazují časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace dané naměřené látky během období únor-květen 2020.



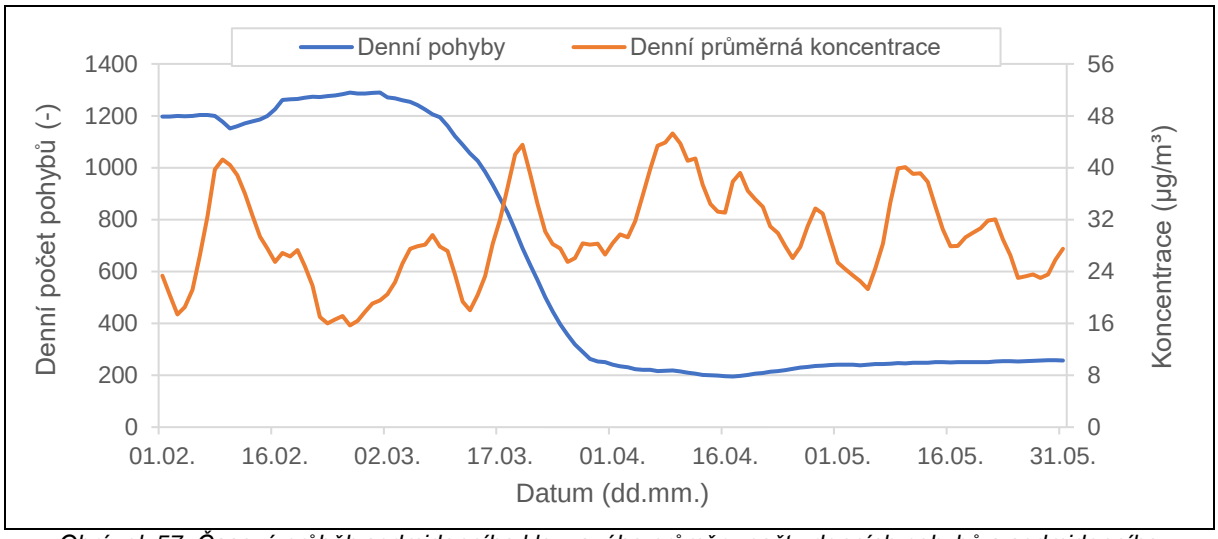
Obrázek 54: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace CO (FRA, únor-květen 2020)



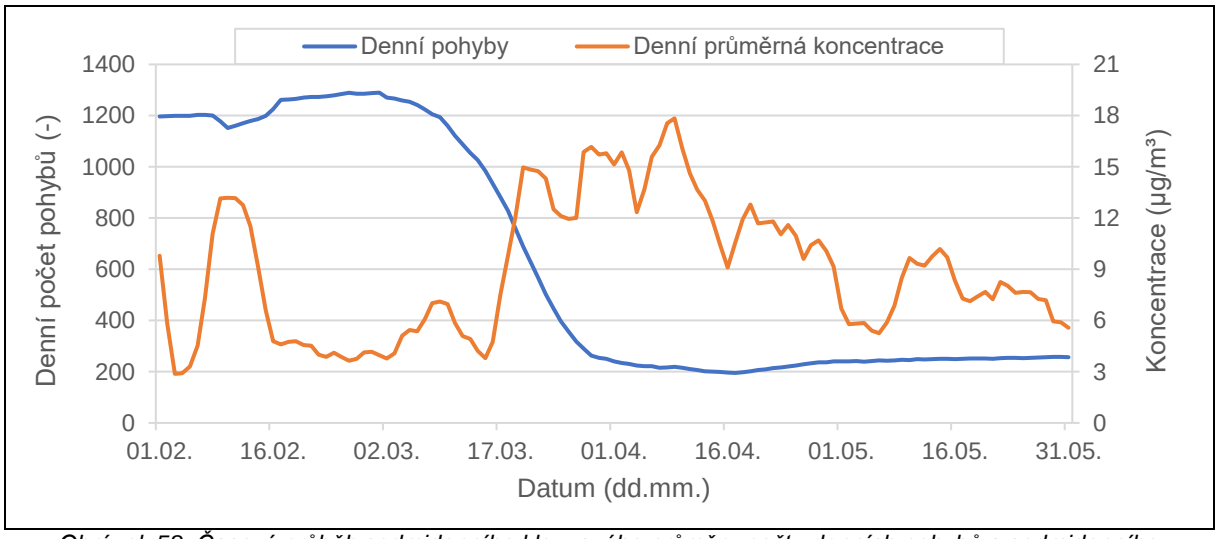
Obrázek 55: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace O_3 (FRA, únor-květen 2020)



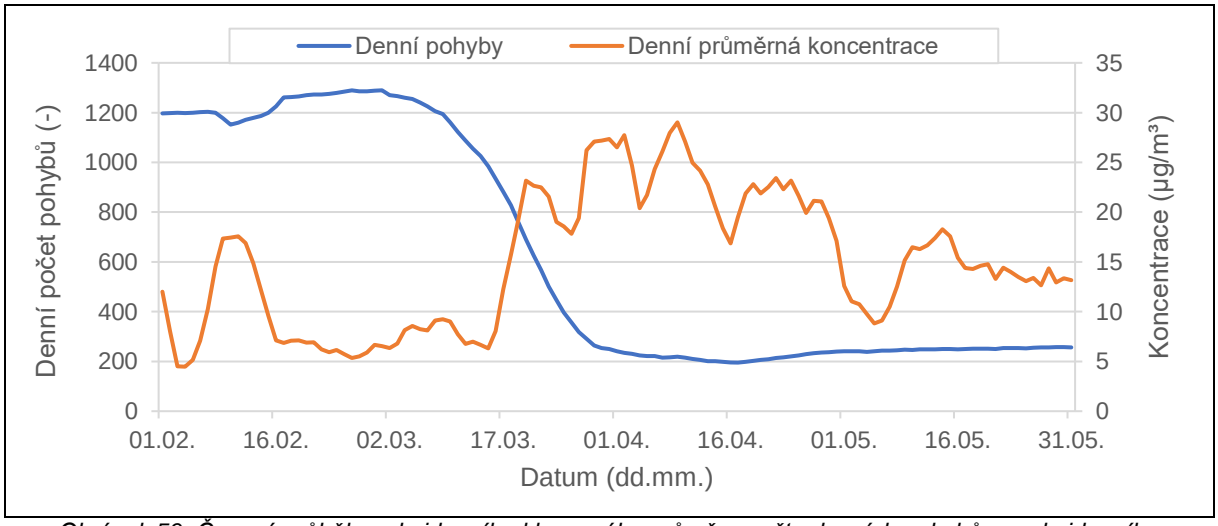
Obrázek 56: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace NO (FRA, únor-květen 2020)



Obrázek 57: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace NO_2 (FRA, únor-květen 2020)

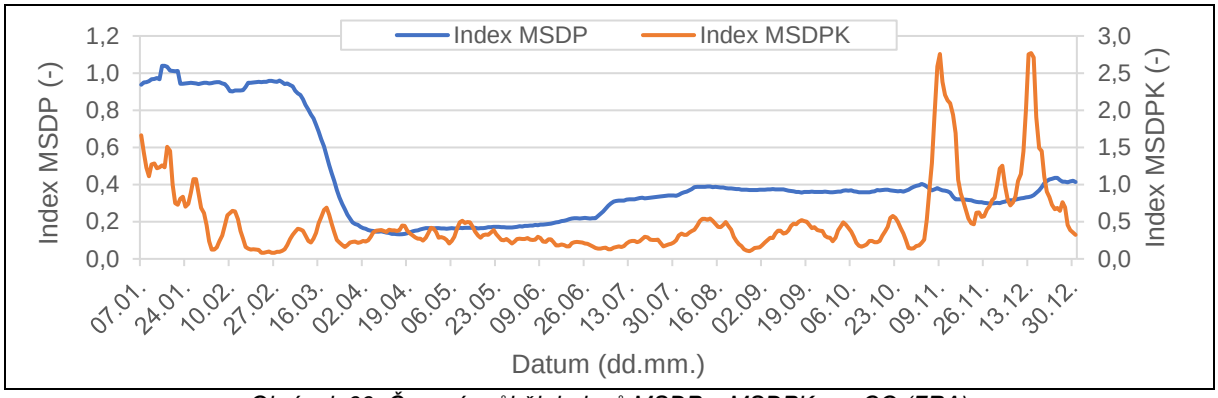


Obrázek 58: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace $PM_{2,5}$ (FRA, únor-květen 2020)

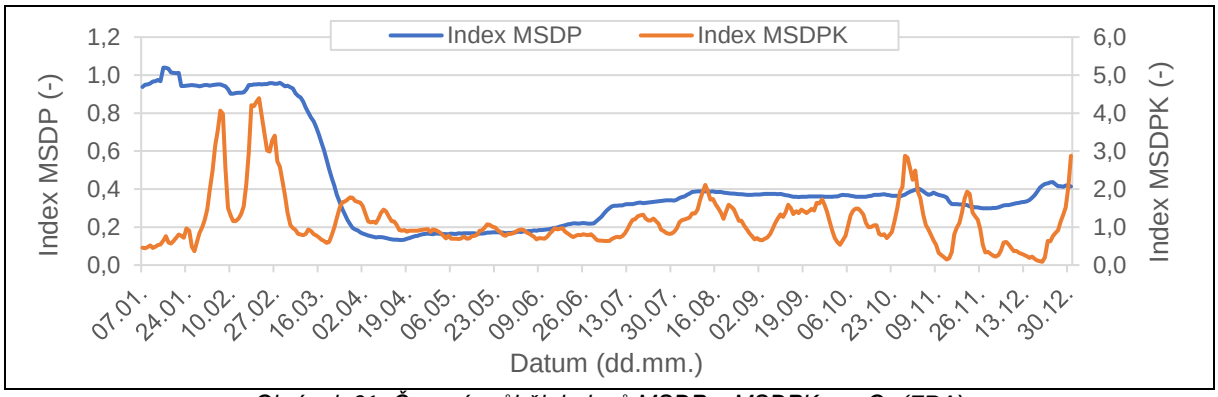


Obrázek 59: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace PM_{10} (FRA, únor-květen 2020)

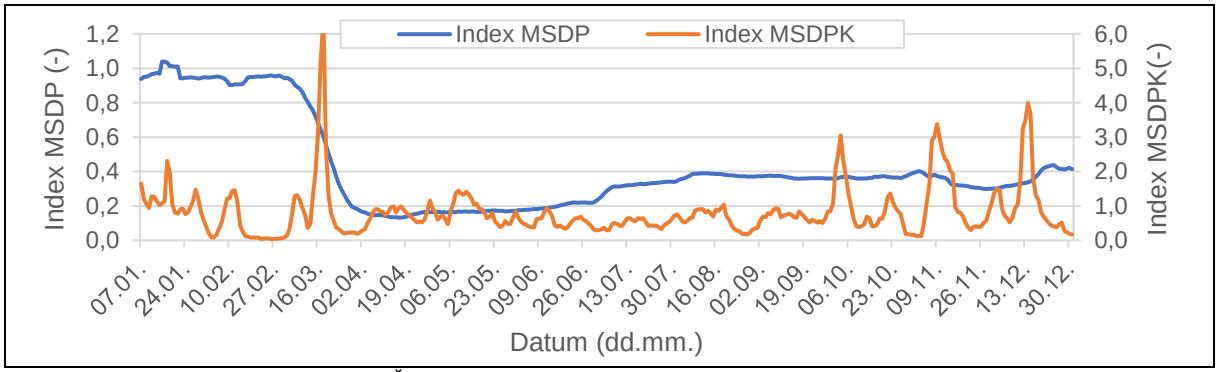
Následující grafy (obr. 60 až 64) zobrazují časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro jednotlivé zkoumané látky.



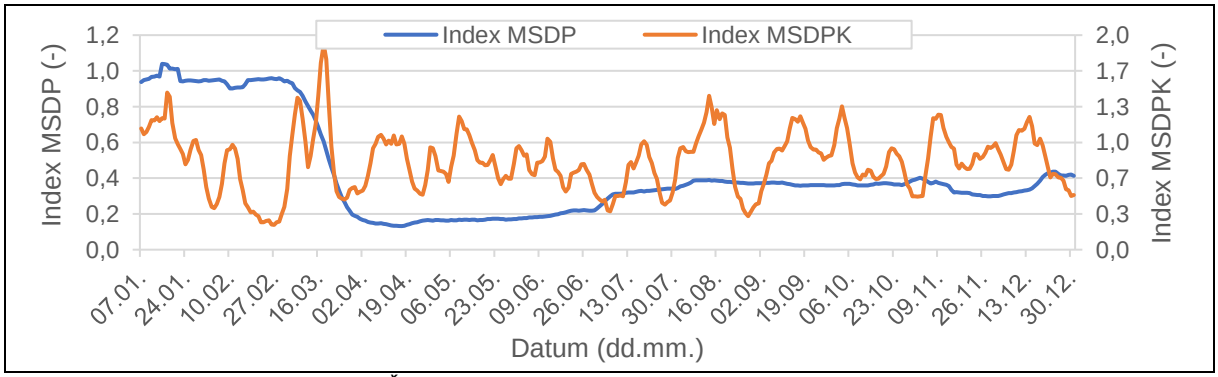
Obrázek 60: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro CO (FRA)



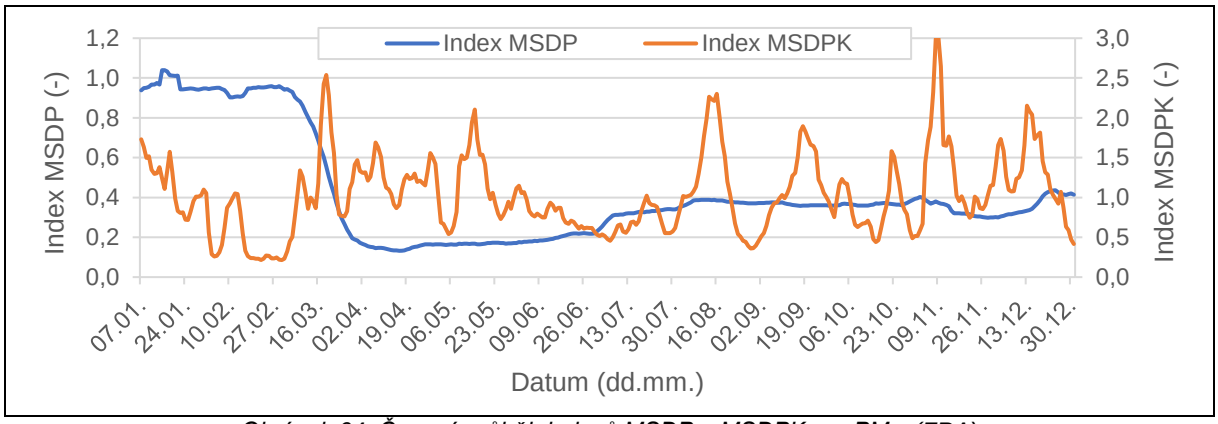
Obrázek 61: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro O_3 (FRA)



Obrázek 62: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro NO (FRA)

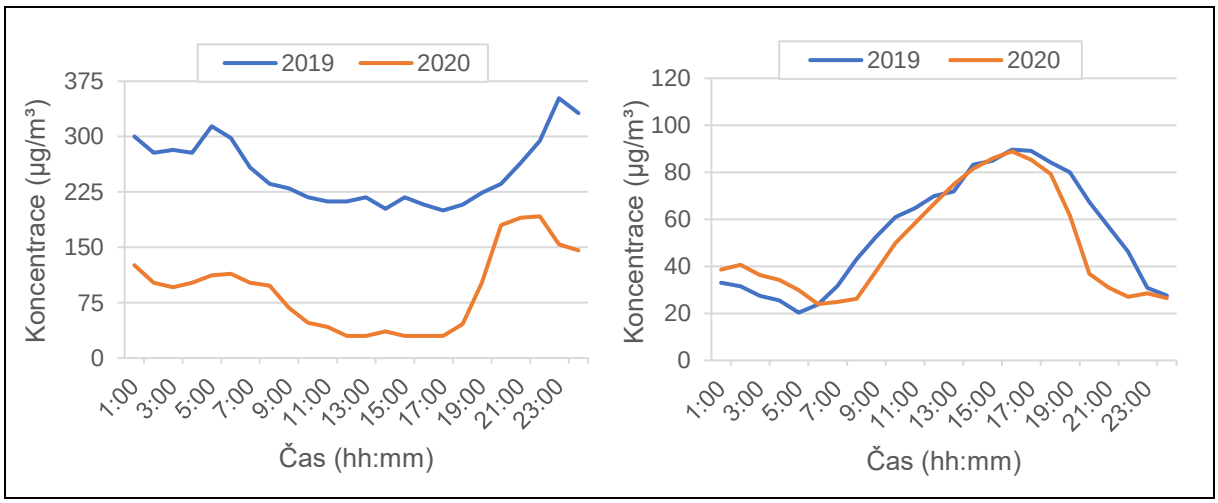


Obrázek 63: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro NO_2 (FRA)

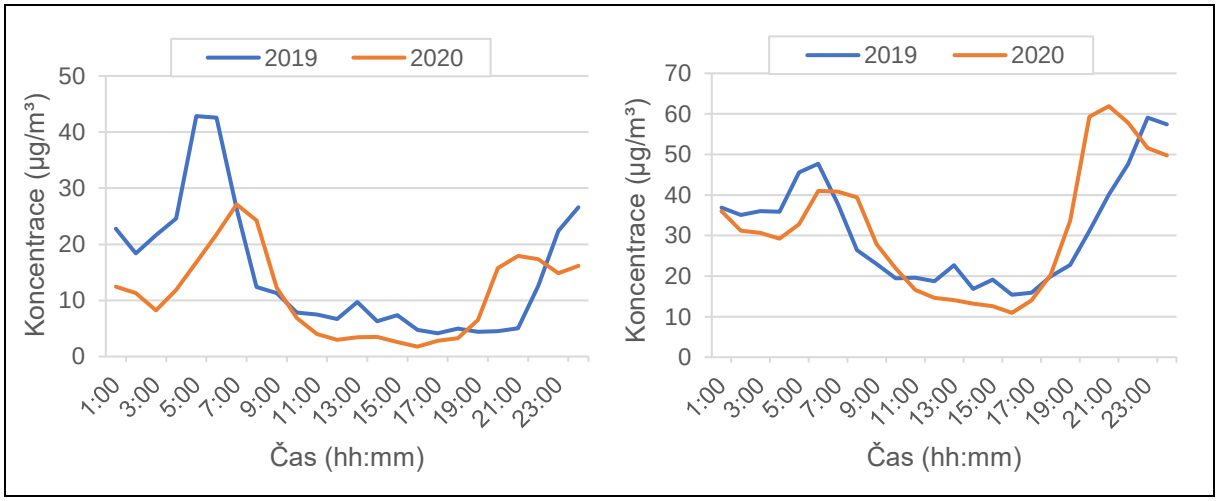


Obrázek 64: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro PM_{10} (FRA)

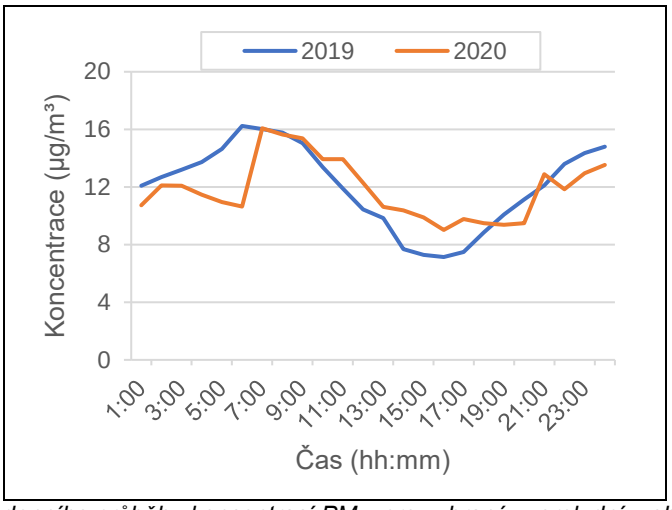
Následující grafy (obr. 65 až 67) zobrazují průměrný denní průběh koncentrací zkoumaných látek na základě zprůměrování dat pro vybrané dny (15. den měsíců březen-červenec) s barevným rozlišením podle roku (2019/2020).



Obrázek 65: Srovnání denního průběhu koncentrací CO (vlevo) a O_3 (vpravo) pro vybraný vzorek dní z období březen-červenec 2019/2020 (FRA)



Obrázek 66: Srovnání denního průběhu koncentrací NO (vlevo) a NO_2 (vpravo) pro vybraný vzorek dní z období březen-červenec 2019/2020 (FRA)



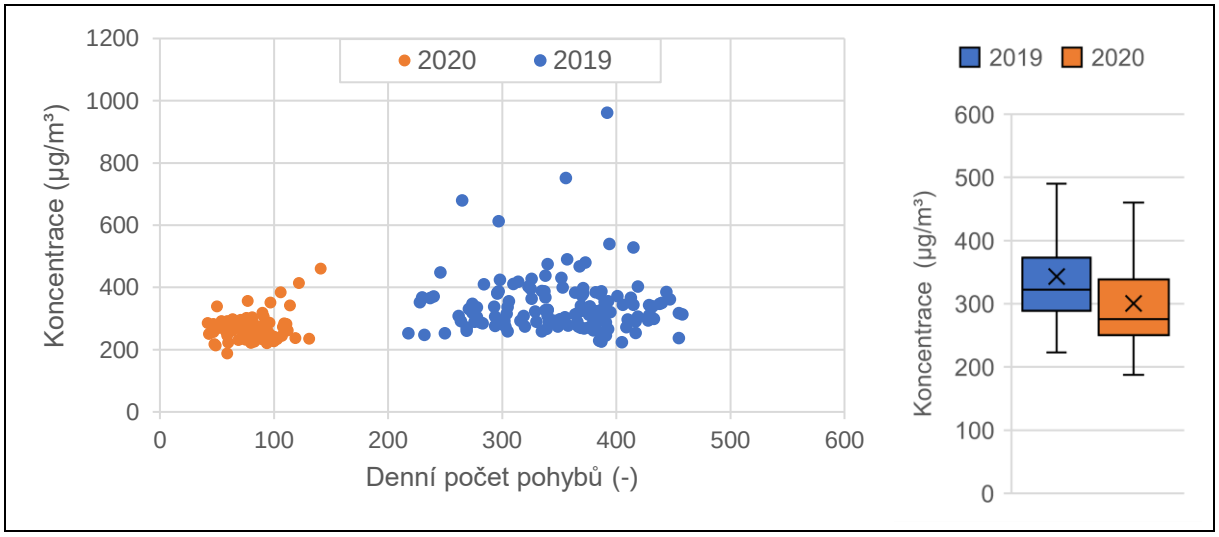
Obrázek 67: Srovnání denního průběhu koncentrací PM_{10} pro vybraný vzorek dní z období březen-červenec 2019/2020 (FRA)

5.3 Praha

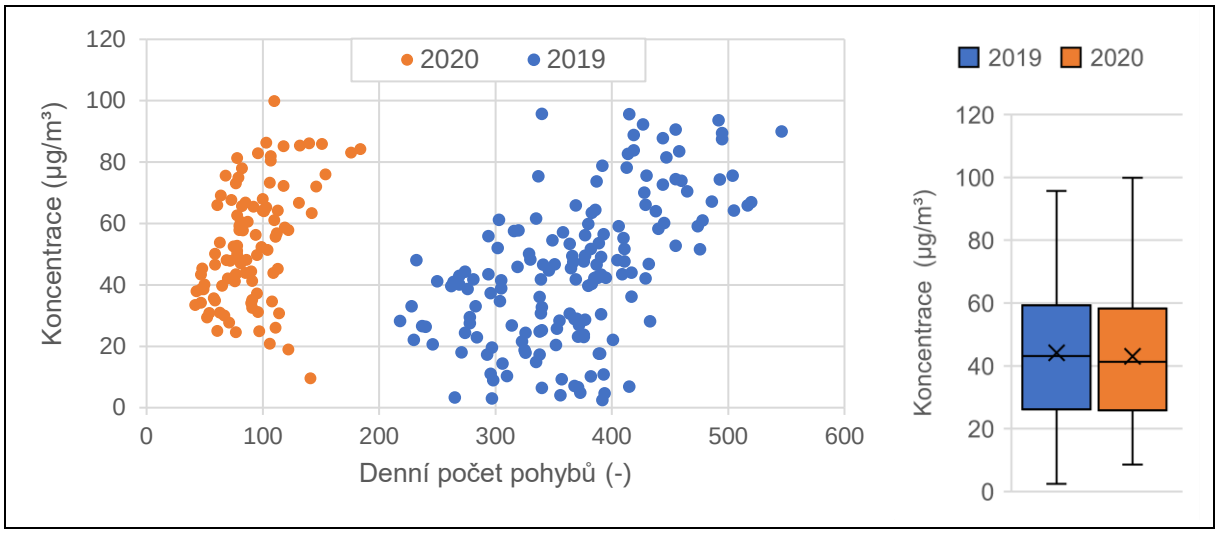
Jak již bylo zmíněno výše, obsah této podkapitoly je oproti předchozím dvěma rozšířený o výsledky LTO emisního modelu popsaného v podkapitole 4.2.

5.3.1 Základní analýza dat

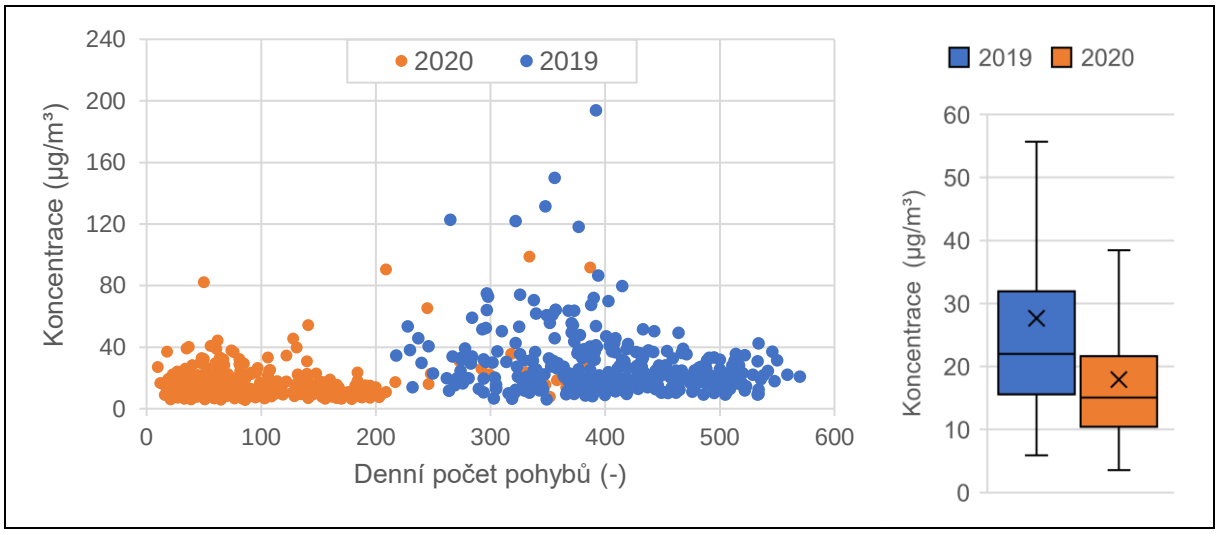
Následující grafy (obr. 68 až 74) zobrazují srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací dané látky (vlevo) včetně zpracovaného krabicového diagramu (vpravo) a barevného rozlišení zkoumaných období (roky 2019 a 2020).



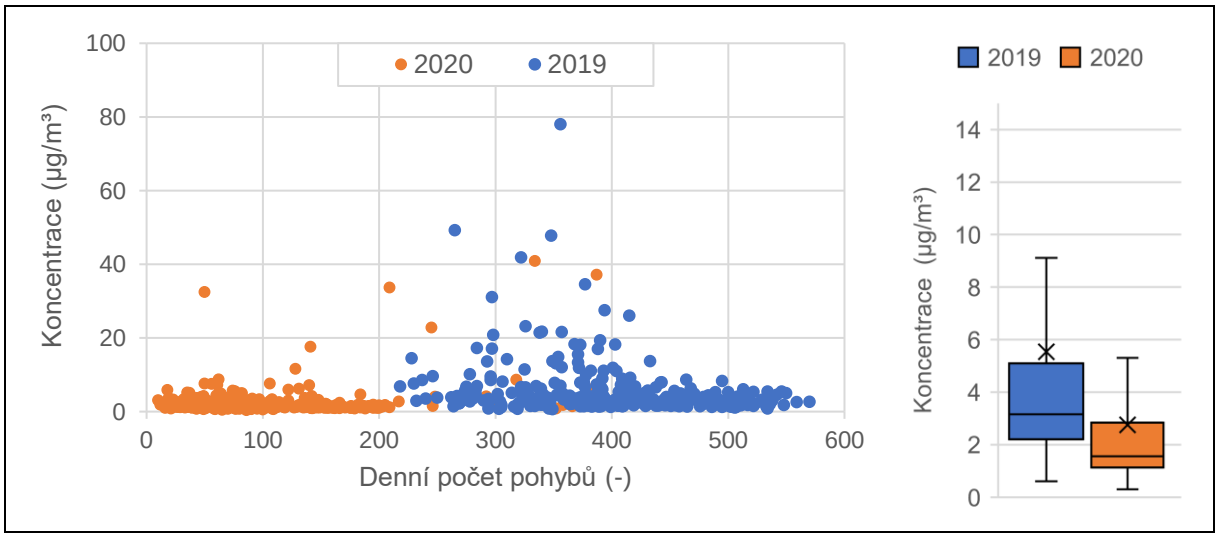
Obrázek 68: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací CO (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, 2019-2020)



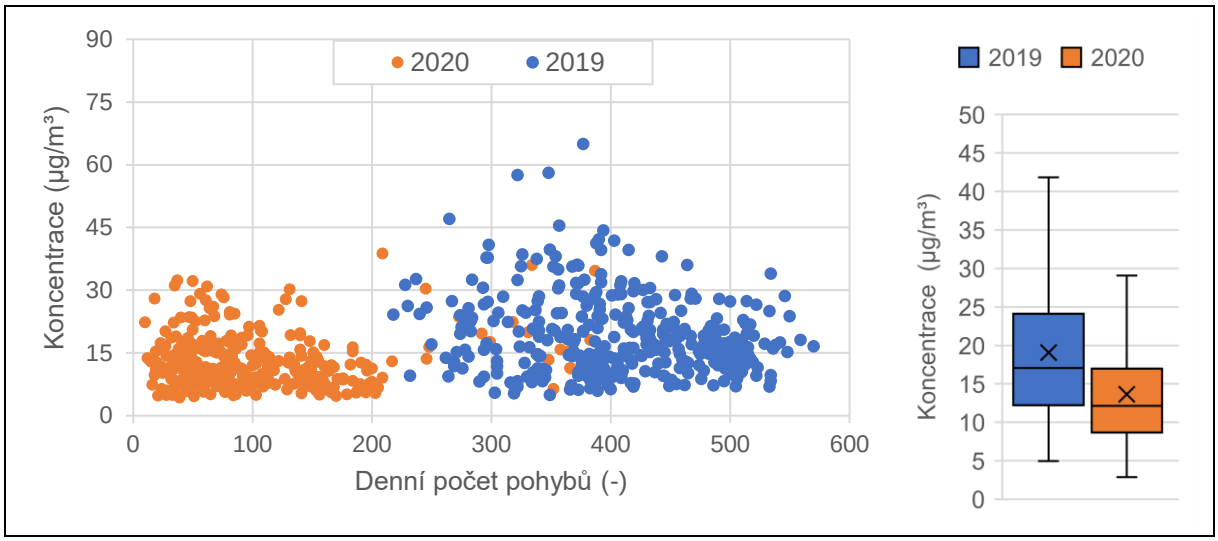
Obrázek 69: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací O_3 (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, 2019-2020)



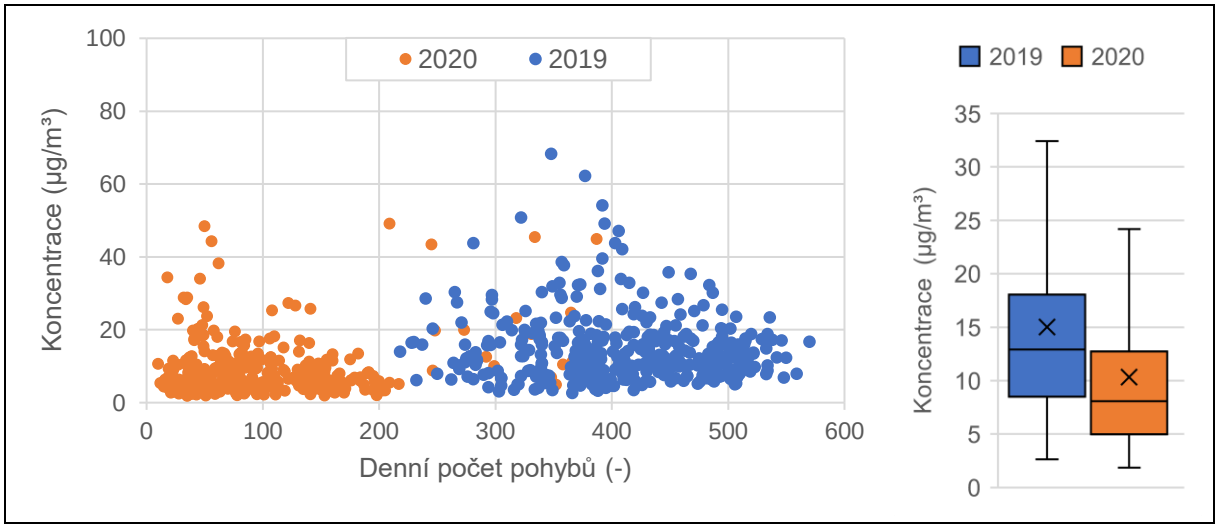
Obrázek 70: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO_X (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, 2019-2020)



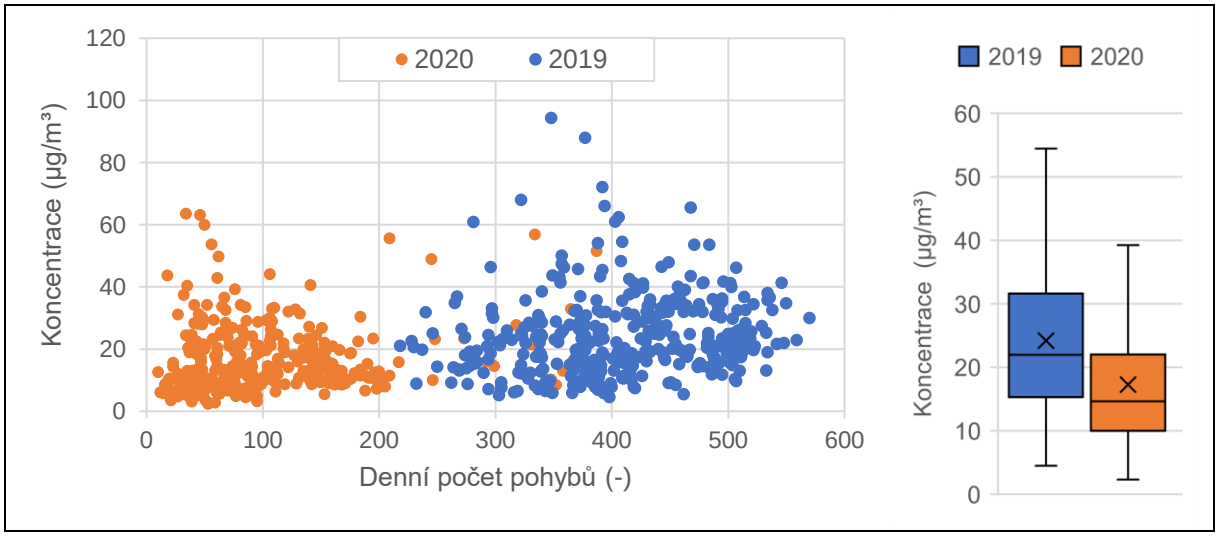
Obrázek 71: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, 2019-2020)



Obrázek 72: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO_2 (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, 2019-2020)



Obrázek 73: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací $PM_{2,5}$ (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, 2019-2020)



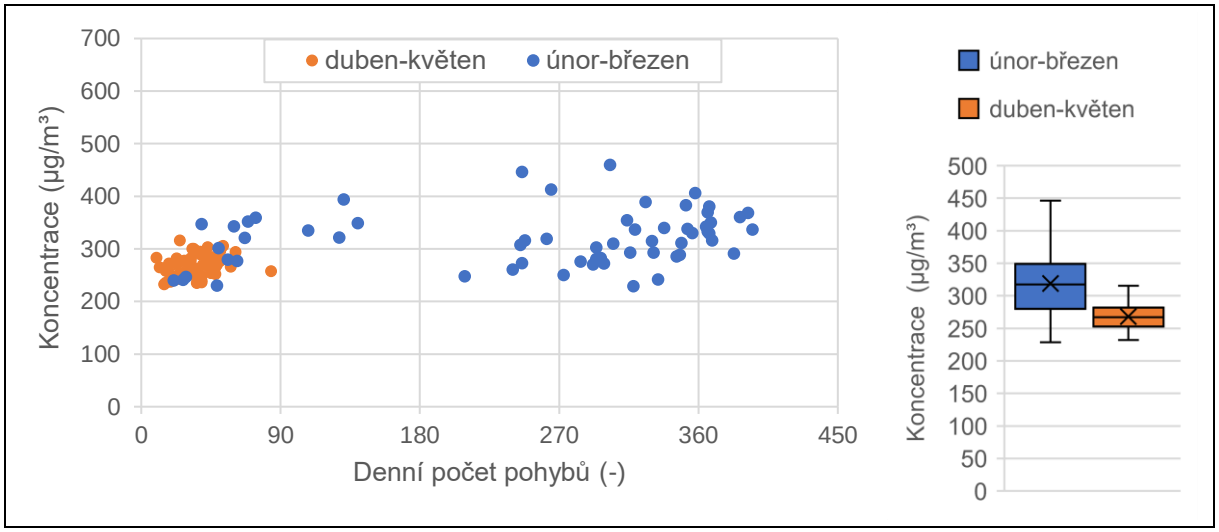
Obrázek 74: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací PM_{10} (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, 2019-2020)

Tabulka 21 obsahuje výsledky testování hypotéz pro jednotlivé látky, že medián výběru dat odpovídajícího roku 2019 je vyšší, než medián výběru za rok 2020.

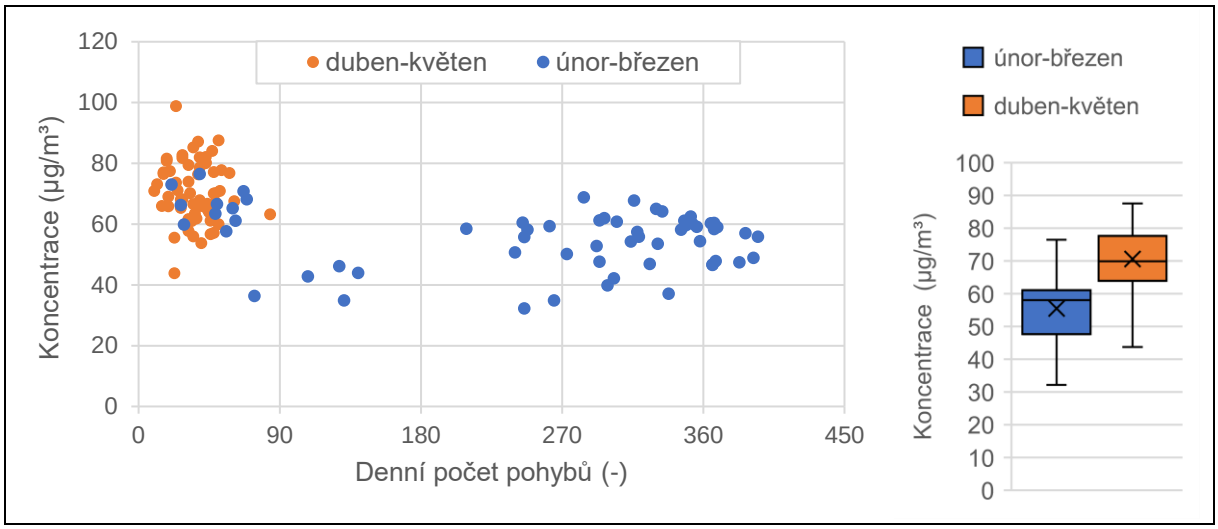
Tabulka 21: Výsledky testování hypotéz o meziročním poklesu hodnot denních průměrných koncentrací jednotlivých látek (PRG, 2019-2020)

Látka	p-hodnota	p >0,05?	Verdikt
CO	1,0000	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá
O_3	0,6221	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá
NO	1,0000	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá
NO_2	1,0000	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá
NO_X	1,0000	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá
$PM_{2,5}$	1,0000	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá
PM_{10}	1,0000	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá

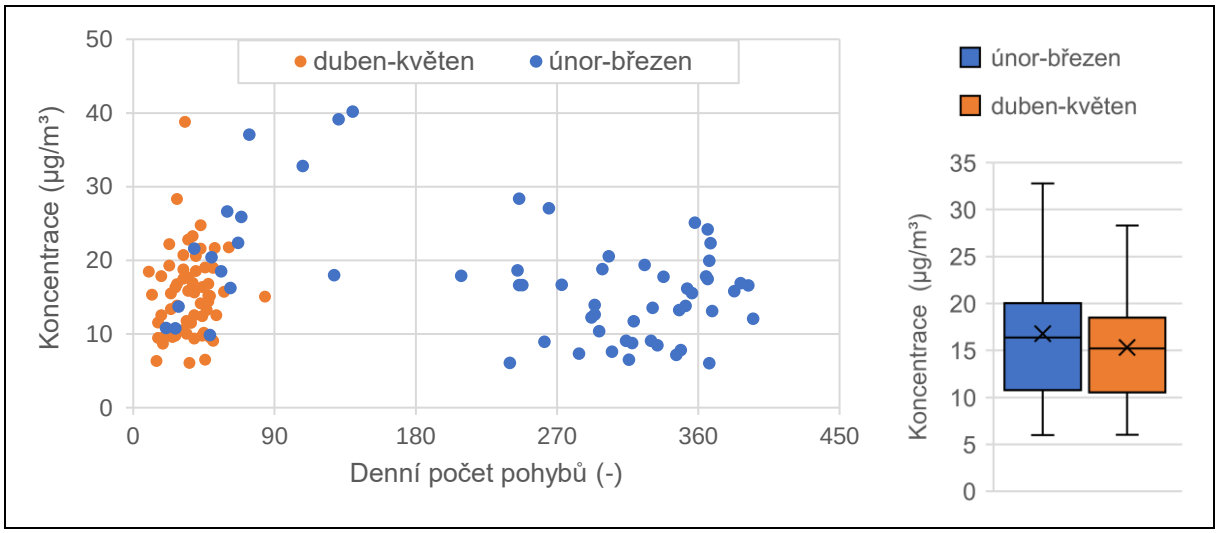
Následující grafy (obr. 75 až 81) zobrazují srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací dané látky (vlevo) včetně zpracovaného krabicového diagramu (vpravo) a barevného rozlišení zkoumaných období (únor-březen 2020 a duben-květen 2020).



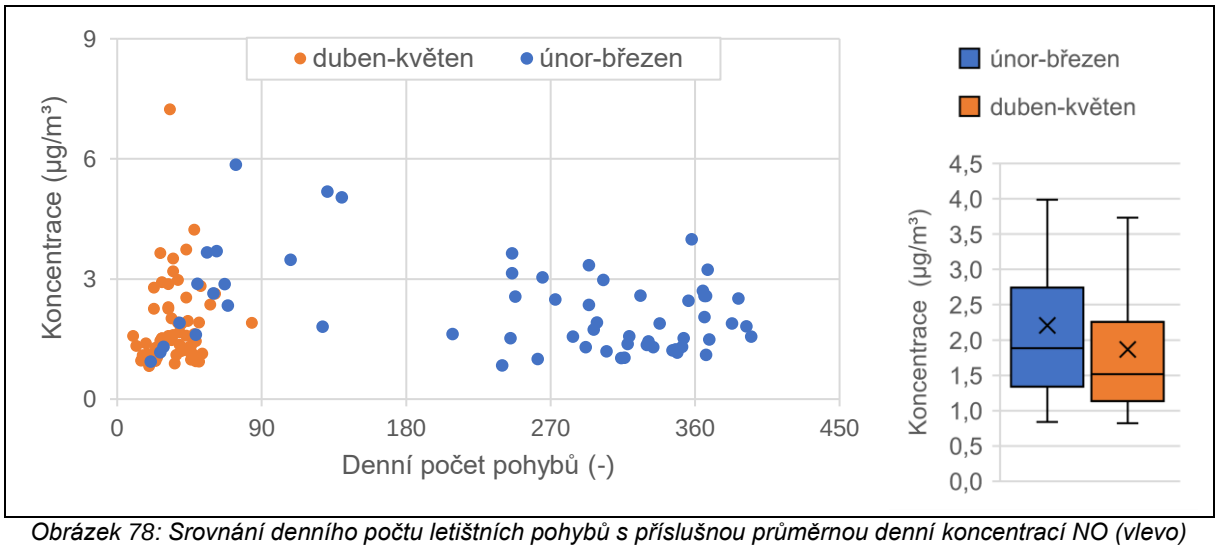
Obrázek 75: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací CO (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, únor-květen 2020)



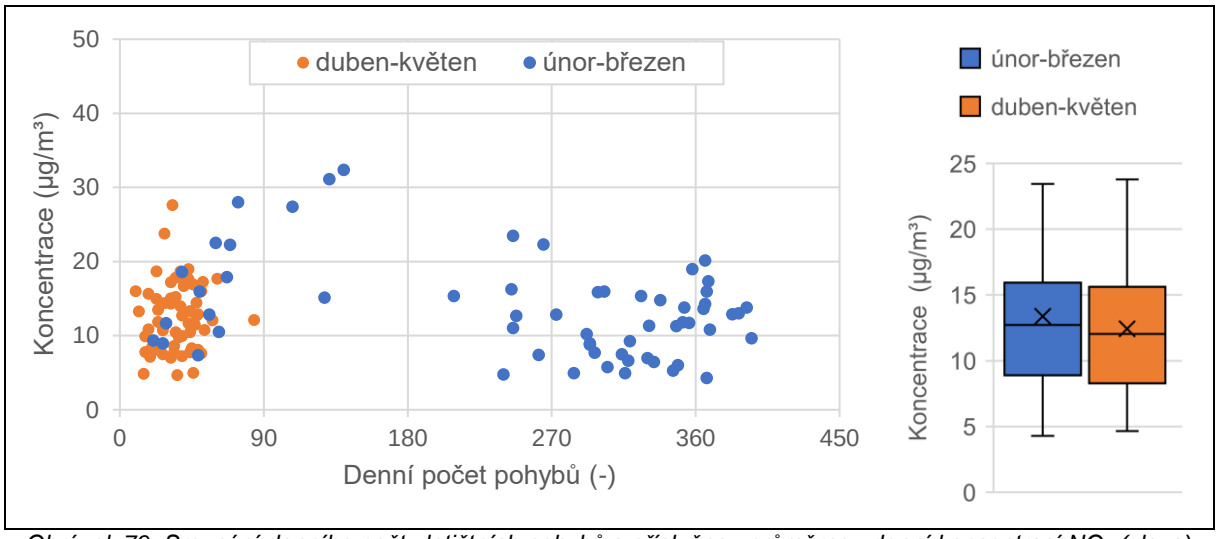
Obrázek 76: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací O_3 (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, únor-květen 2020)



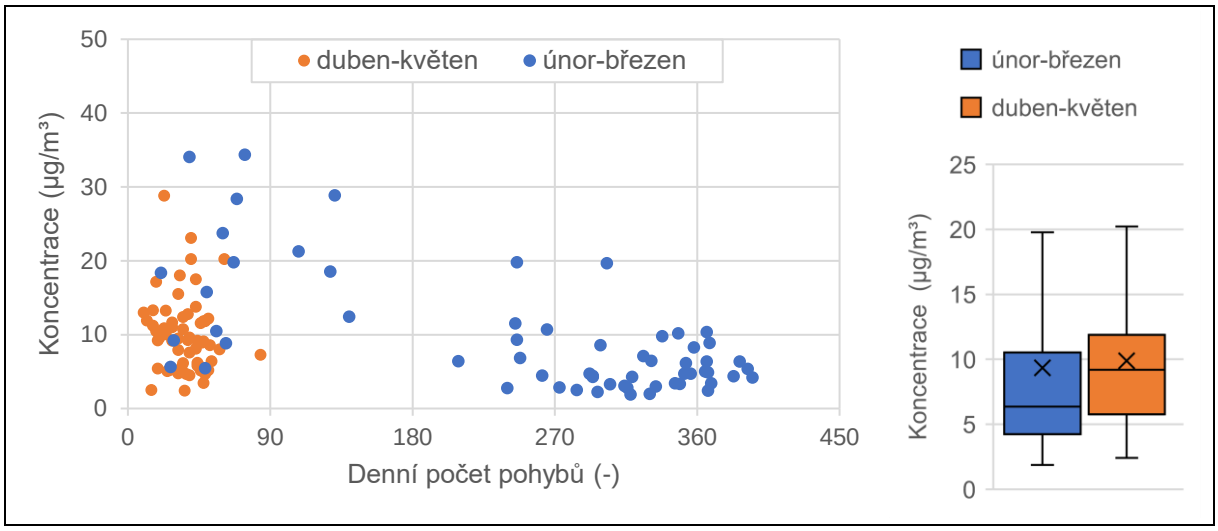
Obrázek 77: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO_X (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, únor-květen 2020)



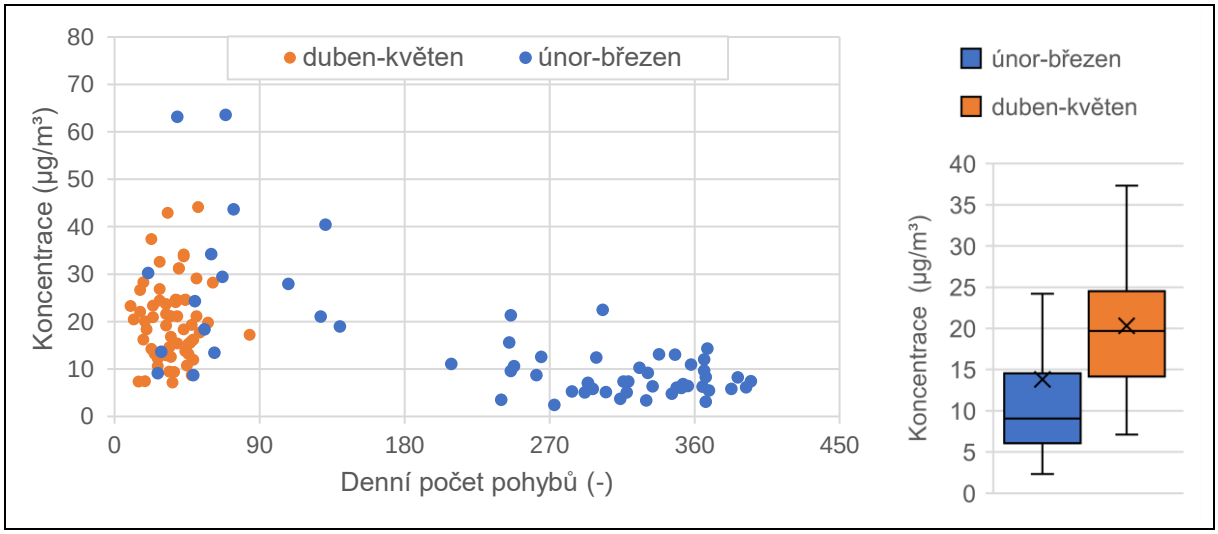
Obrázek 78: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, únor-květen 2020)



Obrázek 79: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO_2 (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, únor-květen 2020)



Obrázek 80: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací $PM_{2,5}$ (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, únor-květen 2020)



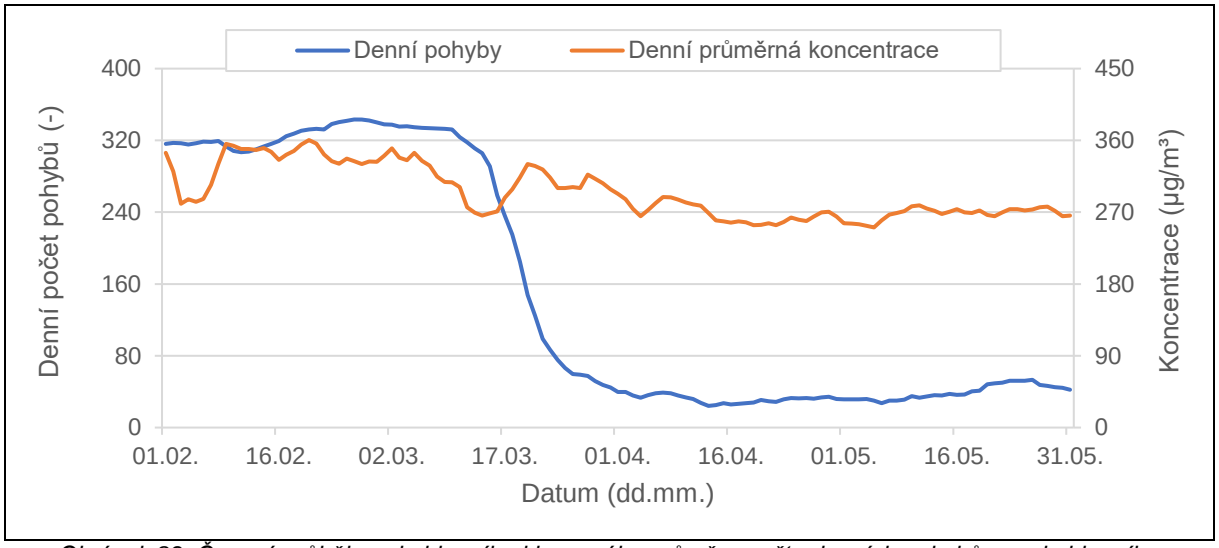
Obrázek 81: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací PM_{10} (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, únor-květen 2020)

Tabulka 22 ukazuje výsledky testování hypotéz pro jednotlivé látky, že medián výběru dat odpovídajícího období únor-březen 2020 je vyšší, než medián výběru za období duben-květen 2020.

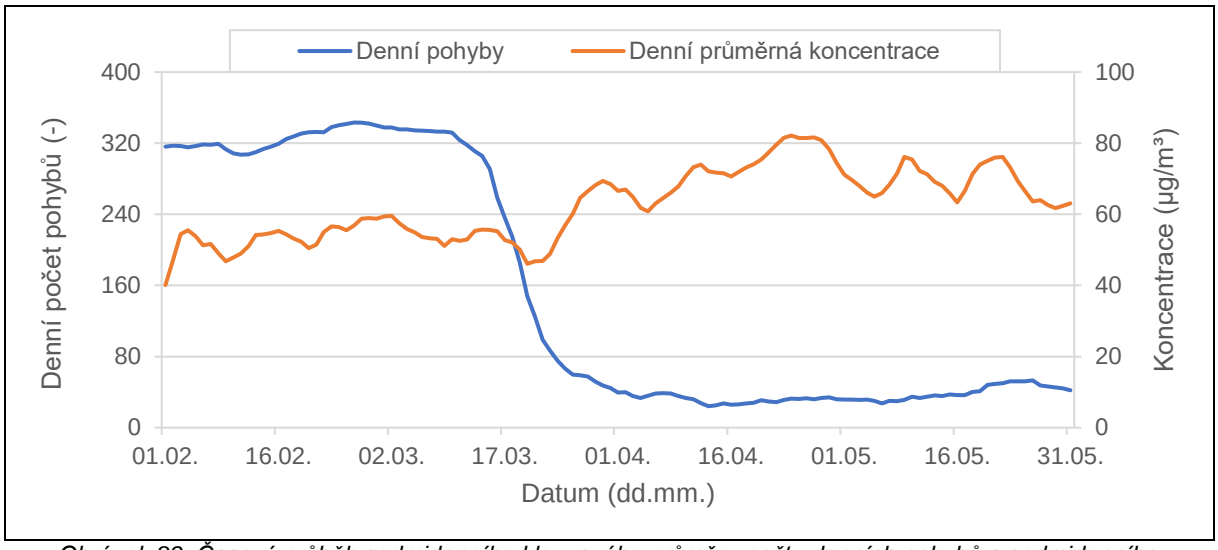
Tabulka 22: Výsledky testování hypotéz o poklesu hodnot denních průměrných koncentrací jednotlivých látek (PRG, únor-březen/duben-květen 2020)

Látka	p-hodnota	p >0,05?	Verdikt
CO	1,0000	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá
O_3	0,0000	Ne	Nulová hypotéza se zamítá
NO	0,9820	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá
NO_2	0,6112	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá
NO_X	0,7620	Ano	Nulová hypotéza se nezamítá
$PM_{2,5}$	0,0098	Ne	Nulová hypotéza se zamítá
PM_{10}	0,0000	Ne	Nulová hypotéza se zamítá

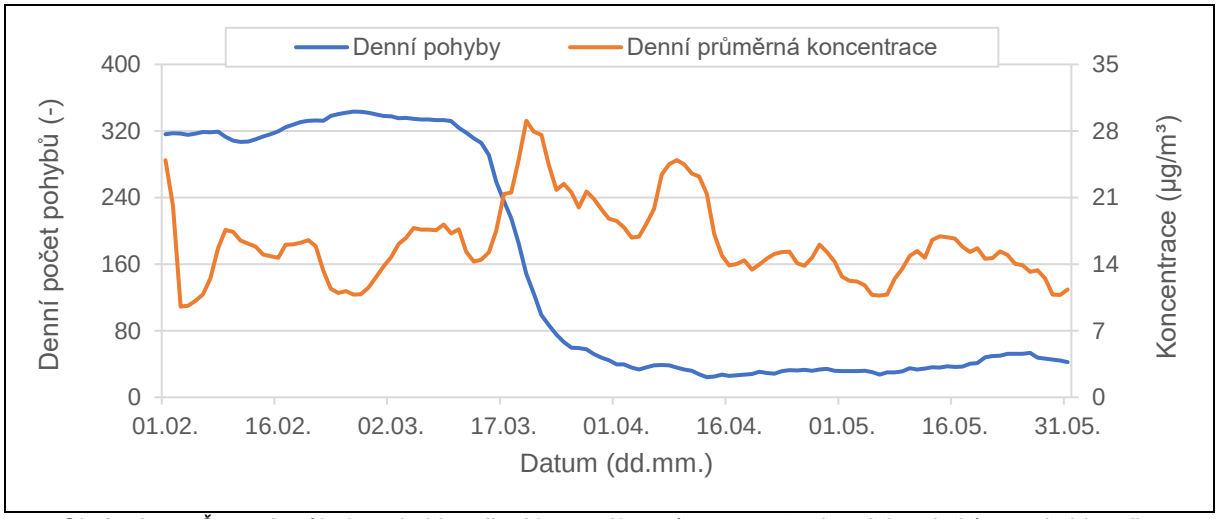
Následující grafy (obr. 82 až 88) zobrazují časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace dané naměřené látky během období únor-květen 2020.



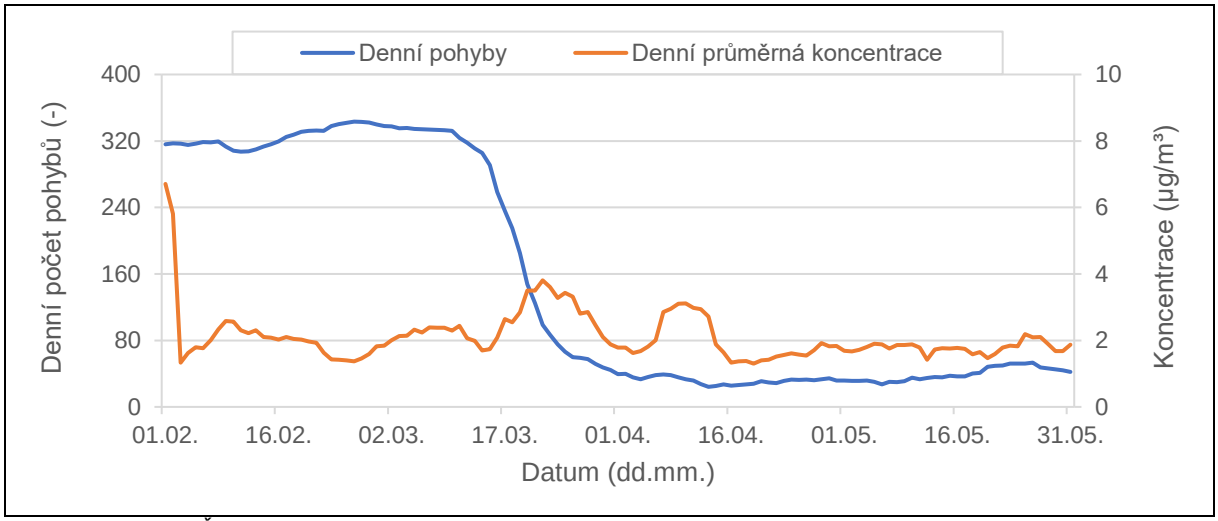
Obrázek 82: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace CO (PRG, únor-květen 2020)



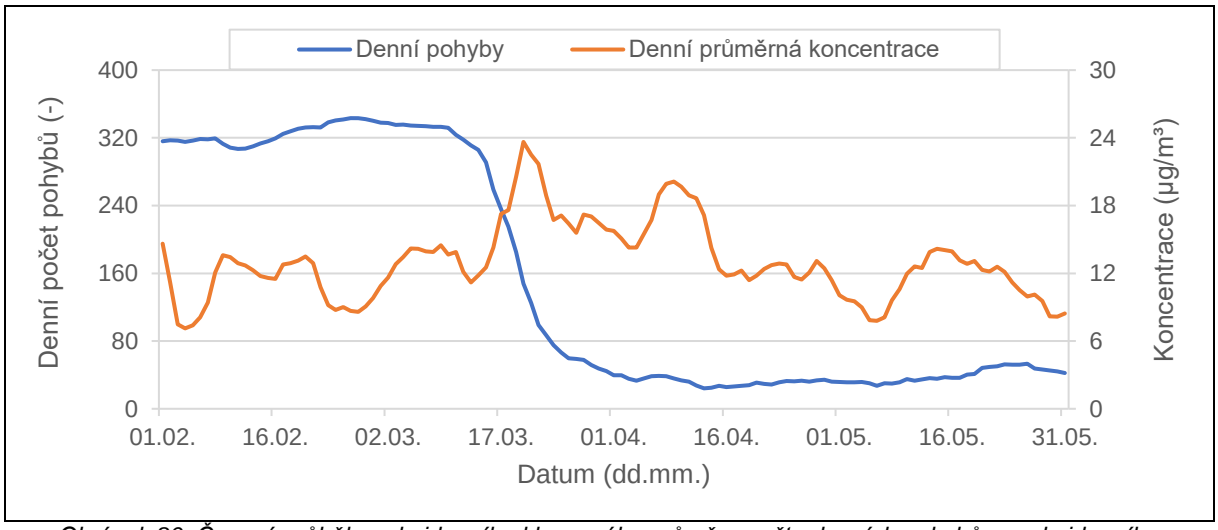
Obrázek 83: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace O_3 (PRG, únor-květen 2020)



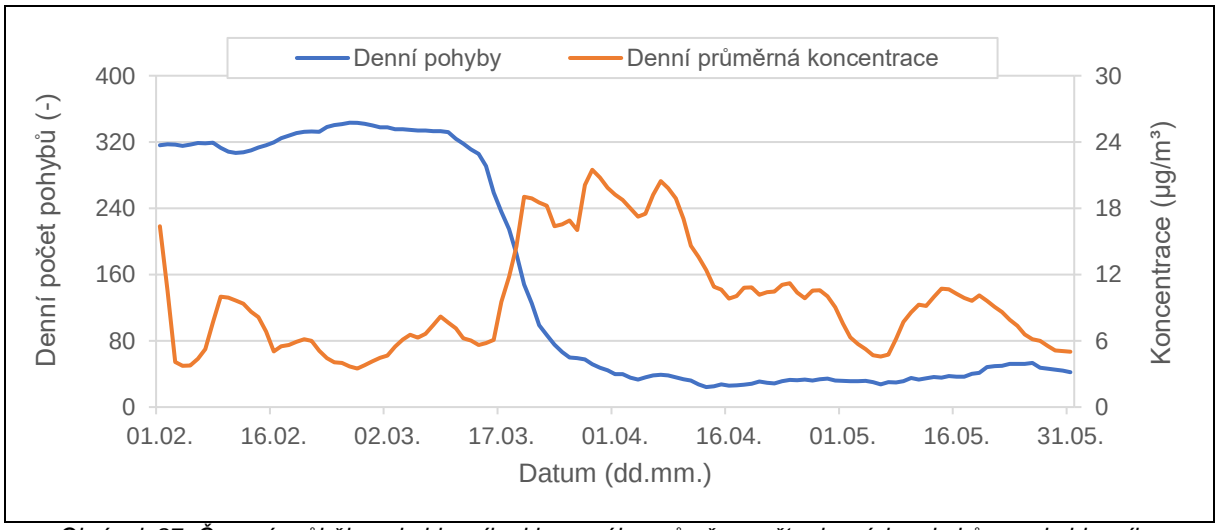
Obrázek 84: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace NO_X (PRG, únor-květen 2020)



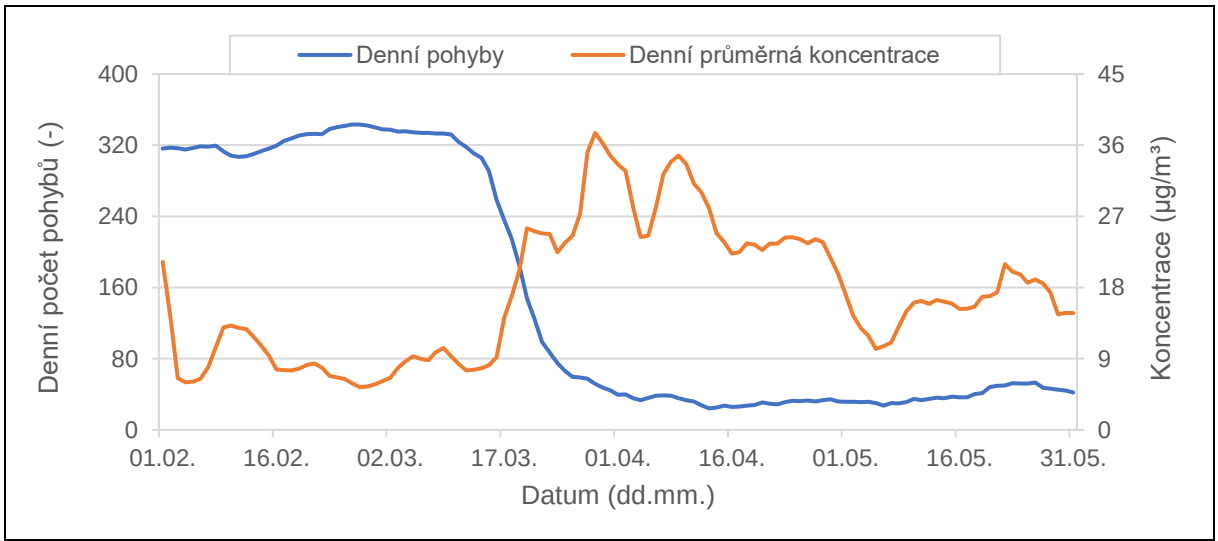
Obrázek 85: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace NO (PRG, únor-květen 2020)



Obrázek 86: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace NO_2 (PRG, únor-květen 2020)

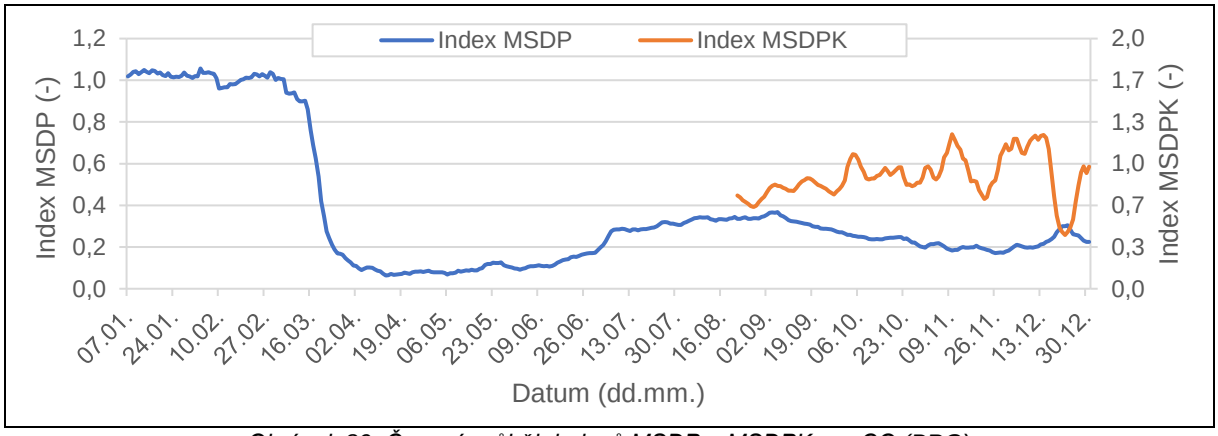


Obrázek 87: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace $PM_{2,5}$ (PRG, únor-květen 2020)

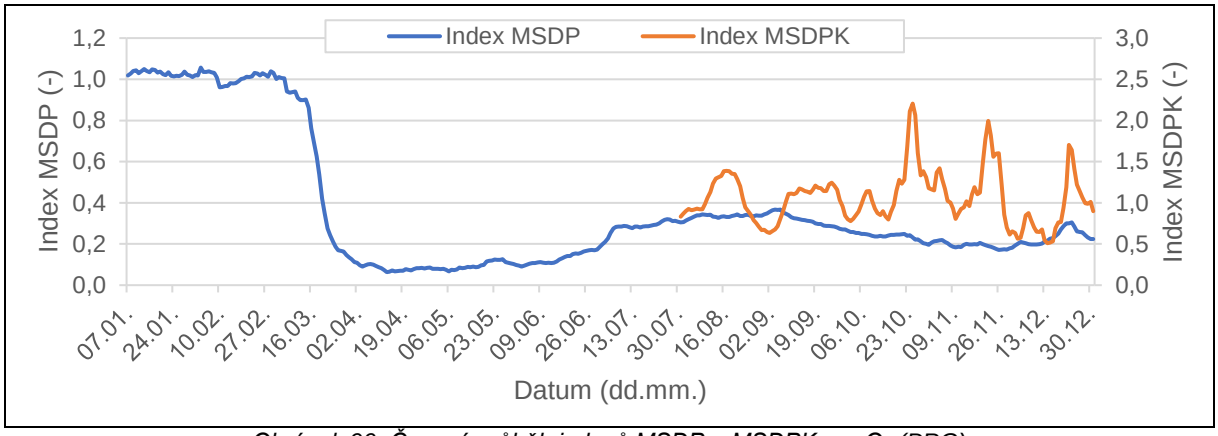


Obrázek 88: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace PM_{10} (PRG, únor-květen 2020)

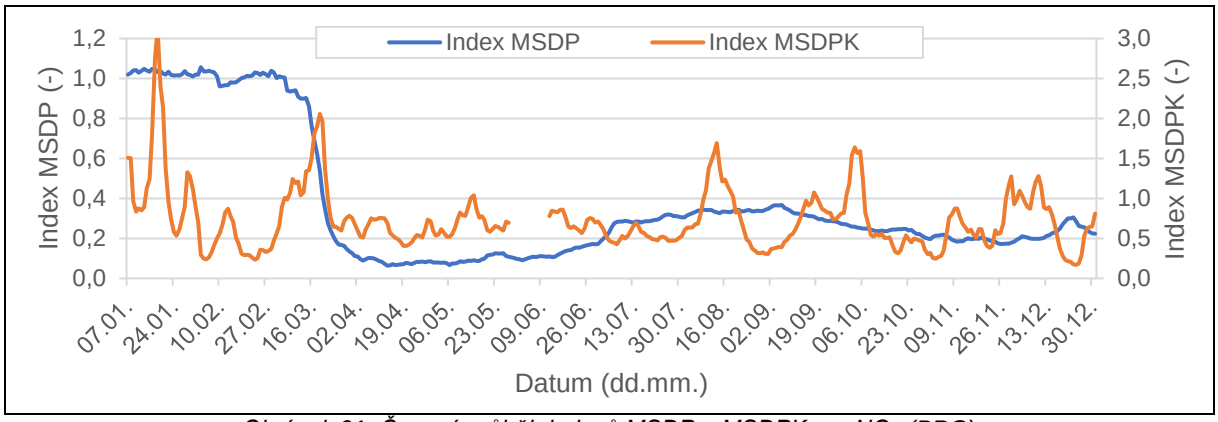
Následující grafy (obr. 89 až 95) zobrazují časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro jednotlivé zkoumané látky.



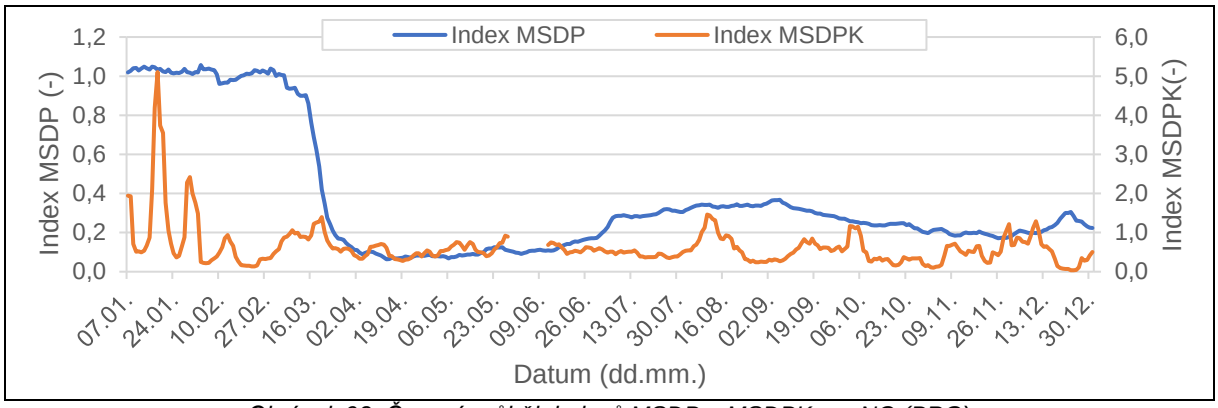
Obrázek 89: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro CO (PRG)



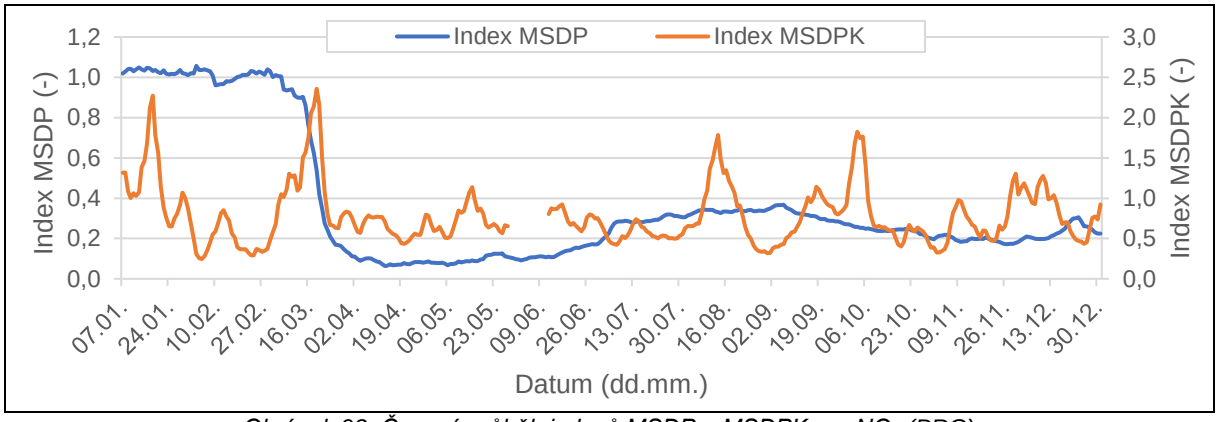
Obrázek 90: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro O_3 (PRG)



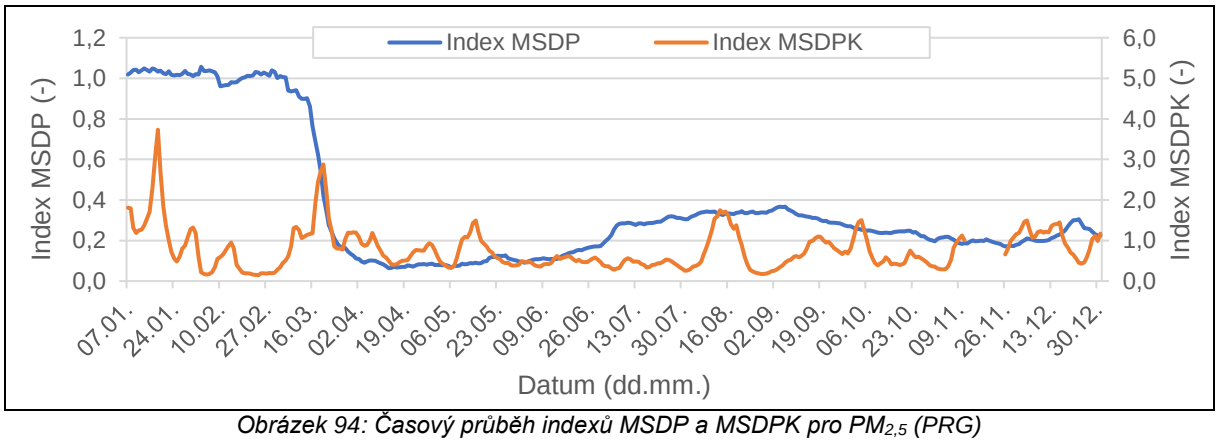
Obrázek 91: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro NO_X (PRG)



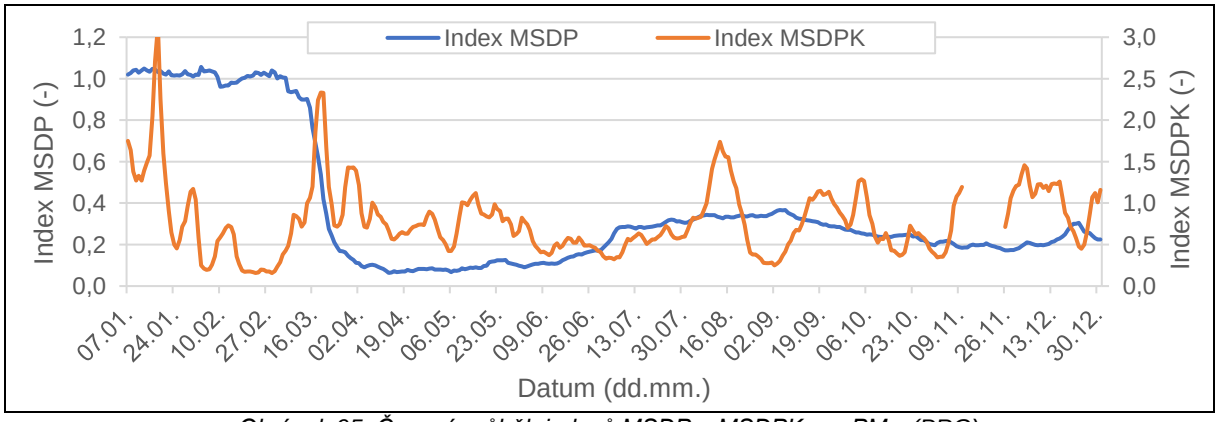
Obrázek 92: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro NO (PRG)



Obrázek 93: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro NO_2 (PRG)

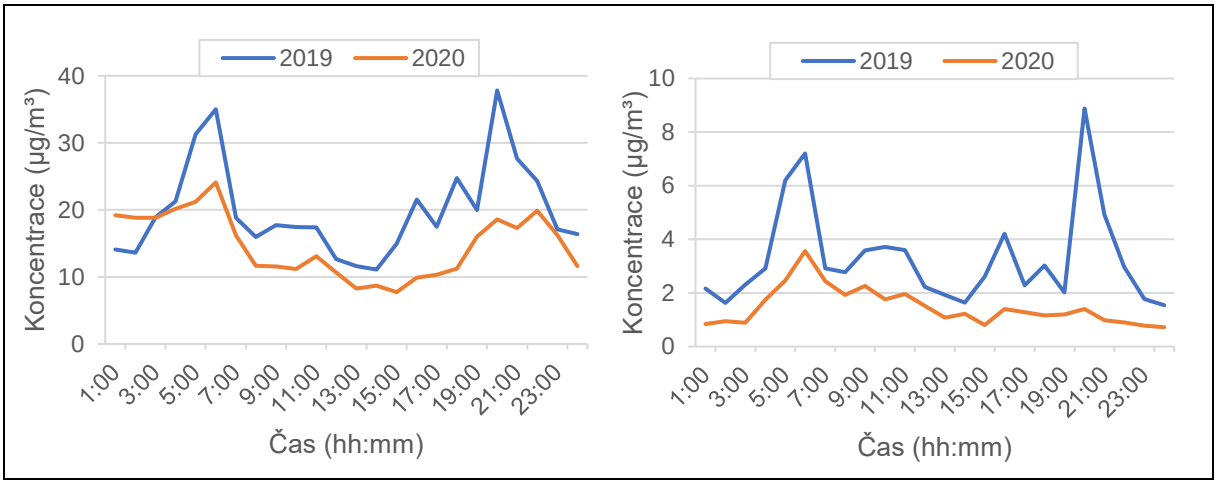


Obrázek 94: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro $PM_{2,5}$ (PRG)

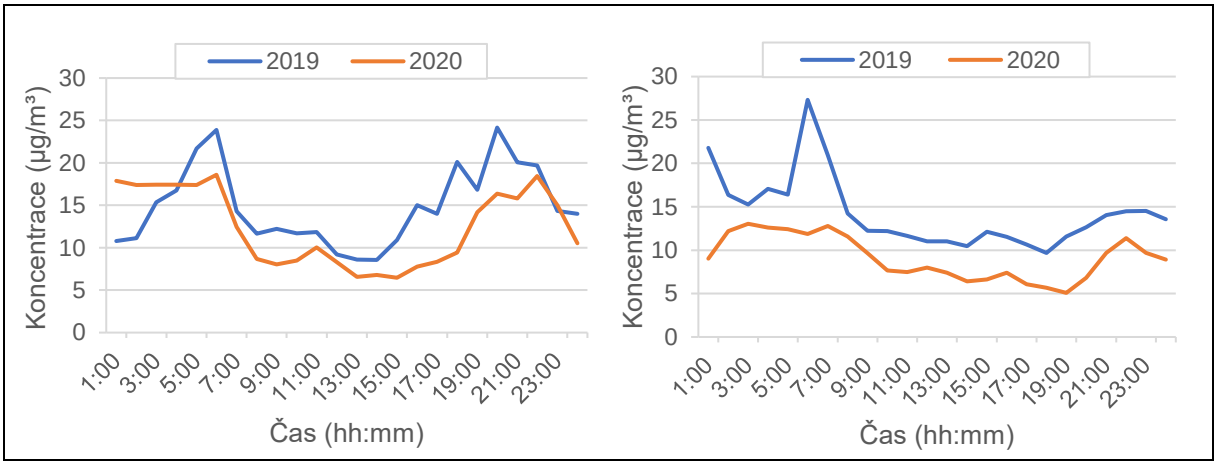


Obrázek 95: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro PM_{10} (PRG)

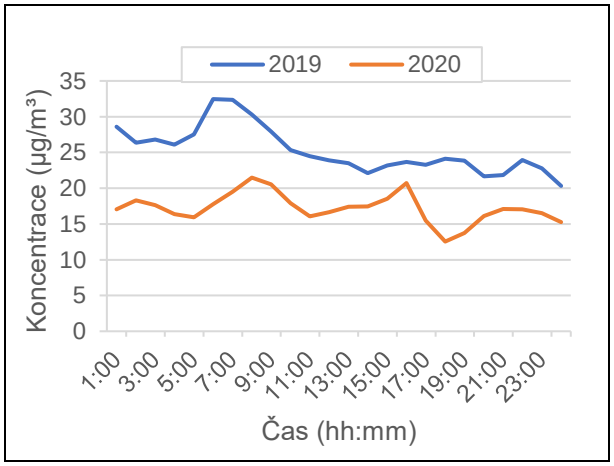
Následující grafy (obr. 96 až 98) zobrazují průměrný denní průběh koncentrací zkoumaných látek na základě zprůměrování dat pro vybrané dny (15. den měsíců březen-červenec) s barevným rozlišením podle roku (2019/2020).



Obrázek 96: Srovnání denního průběhu koncentrací NO_X (vlevo) a NO (vpravo) pro vybraný vzorek dní z období březen-červenec 2019/2020 (PRG)



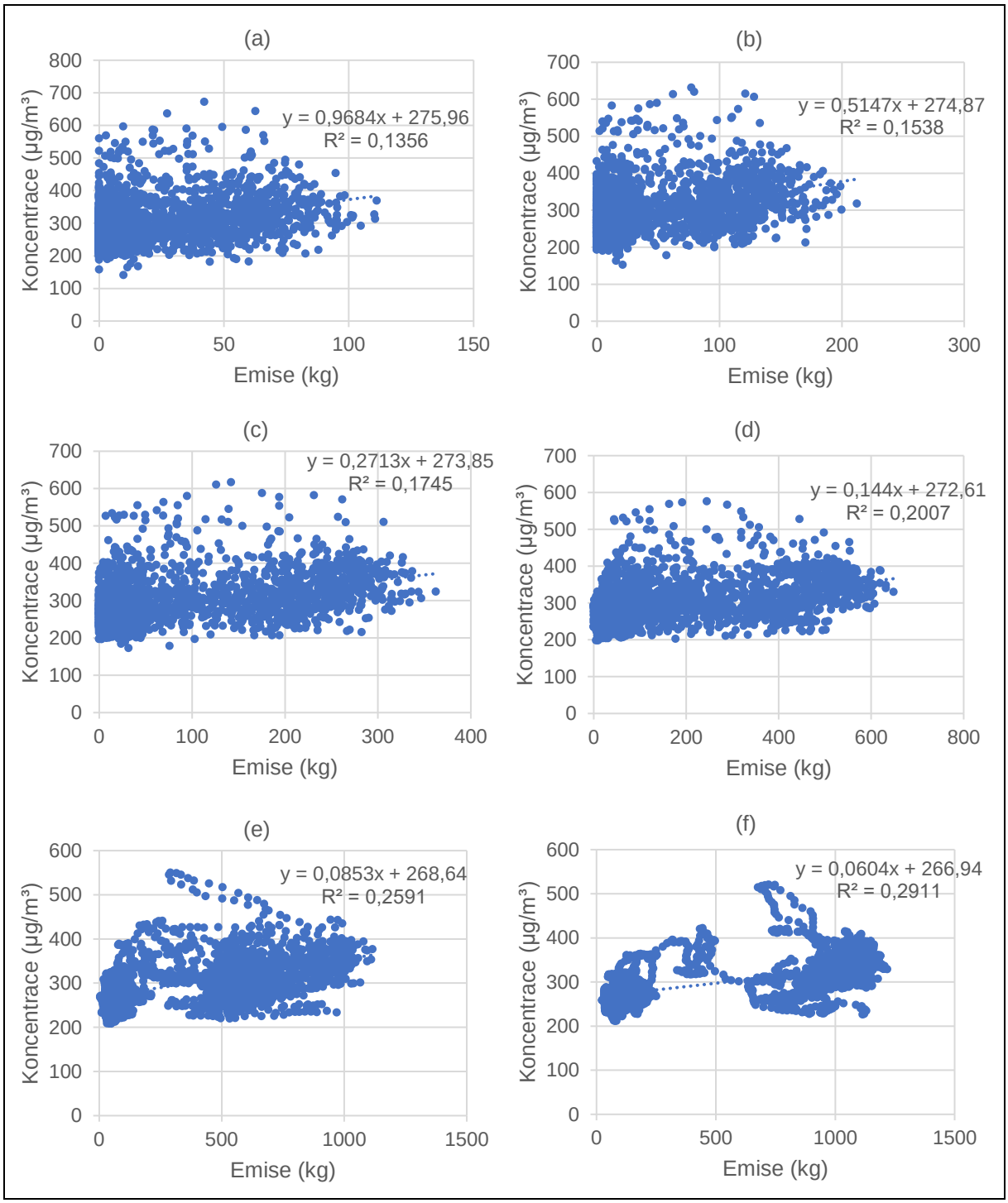
Obrázek 97: Srovnání denního průběhu koncentrací NO_2 (vlevo) a $PM_{2,5}$ (vpravo) pro vybraný vzorek dní z období březen-červenec 2019/2020 (PRG)



Obrázek 98: Srovnání denního průběhu koncentrací PM_{10} pro vybraný vzorek dní z období březen-červenec 2019/2020 (PRG)

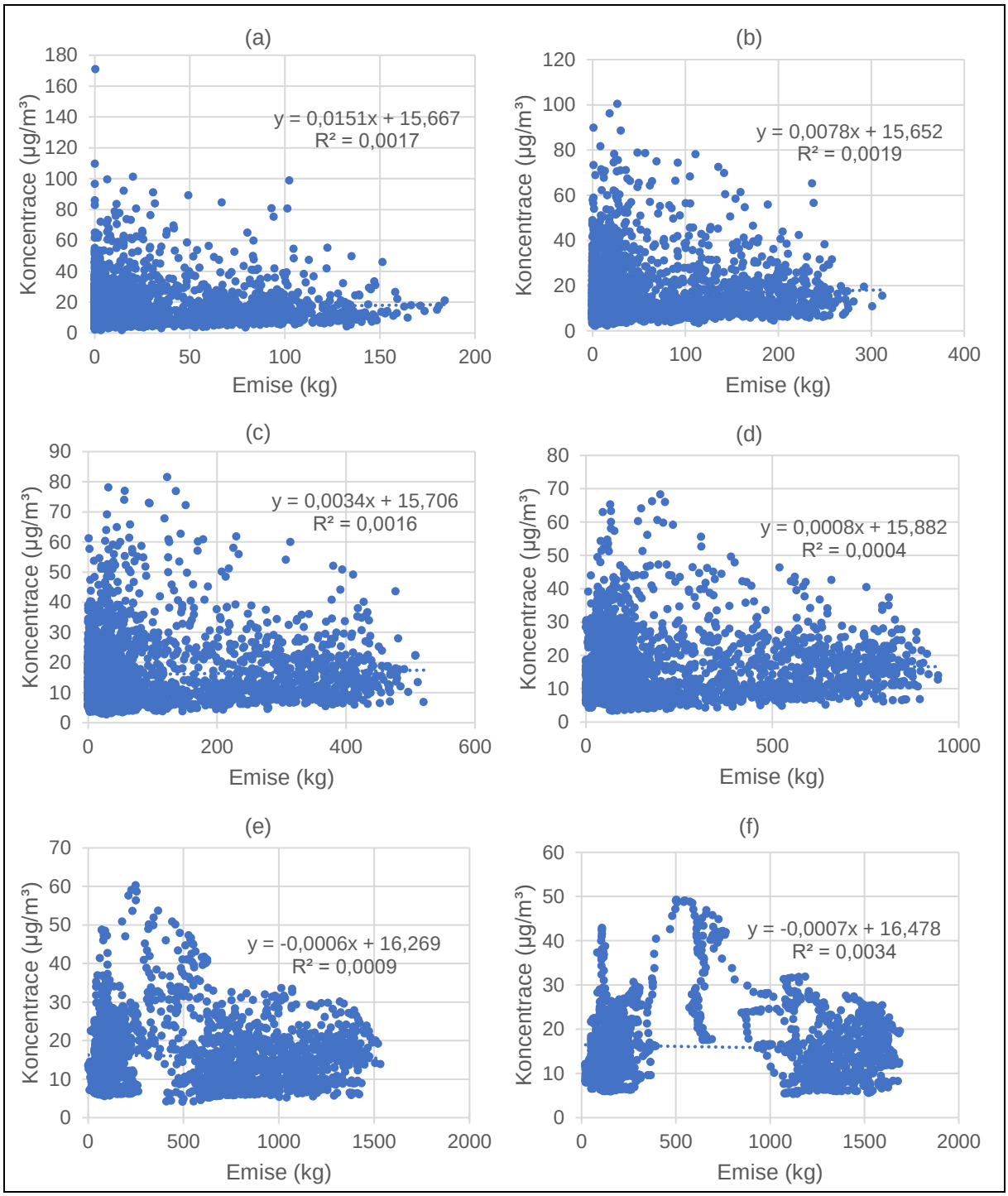
5.3.2 Výsledky LTO emisního modelu

Grafy na obr. 99 ukazují závislost průměrné naměřené koncentrace CO v ovzduší za posledních τ hodin na součtu emisí za posledních τ hodin pro vybrané hodnoty časového parametru τ včetně výsledného korelačního koeficientu (hodnoty z období únor-květen 2020).



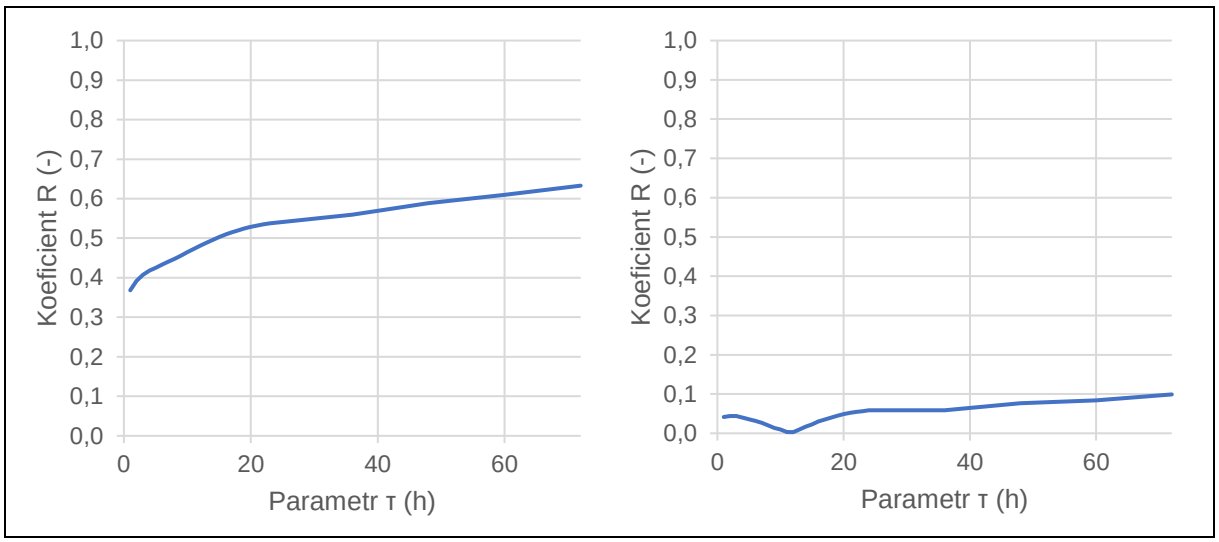
Obrázek 99: Srovnání součtu vypočítaných emisí CO za posledních τ hodin a průměrné naměřené koncentrace za odpovídající časové období pro τ=1 (a), τ=2 (b), τ=4 (c), τ=8 (d), τ=16 (e) a τ=24 (f) (za období únor-květen 2020)

Grafy na obr. 100 ukazují závislost průměrné naměřené koncentrace NO_X v ovzduší za posledních τ hodin na součtu emisí za posledních τ hodin pro vybrané hodnoty časového parametru τ včetně výsledného korelačního koeficientu (hodnoty z období únor-květen 2020).



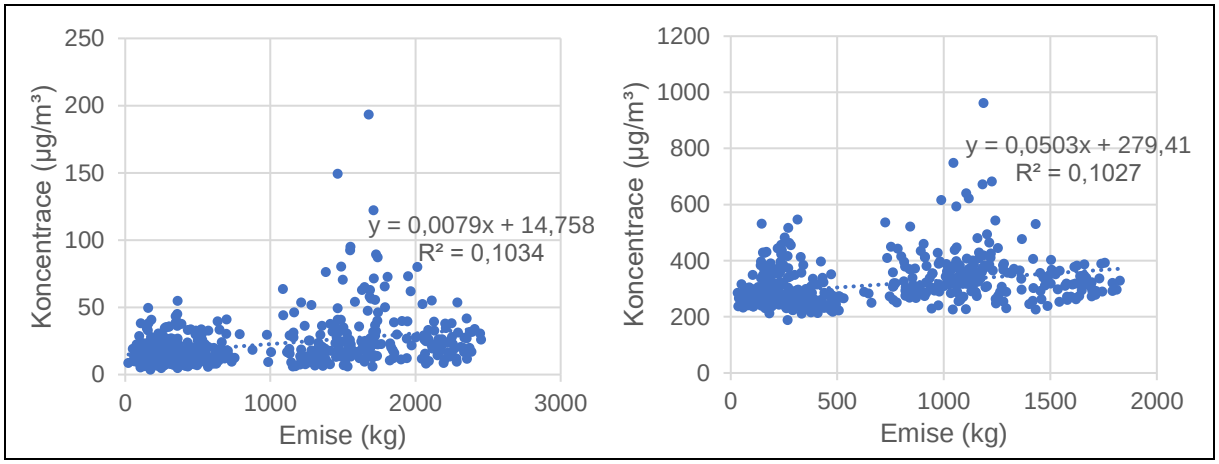
Obrázek 100: Srovnání součtu vypočítaných emisí NO_X za posledních τ hodin a průměrné naměřené koncentrace za odpovídající časové období pro τ=1 (a), τ=2 (b), τ=4 (c), τ=8 (d), τ=16 (e) a τ=24 (f) (za období únor-květen 2020)

Grafy na obr. 101 zobrazují průběh hodnot korelačního koeficientu R v závislosti na zvoleném časovém parametru τ pro CO (vlevo) a NO_X (vpravo) za období únor-květen roku 2020.



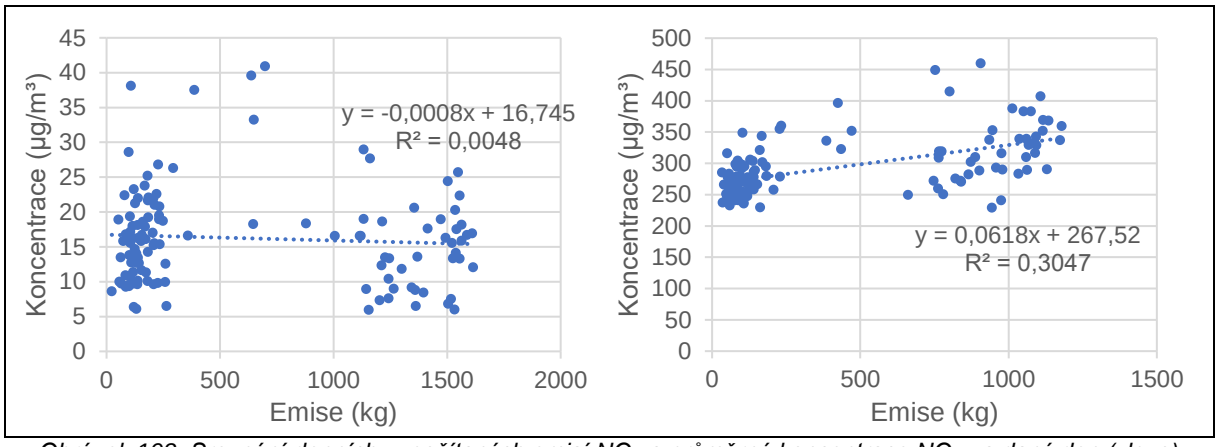
Obrázek 101: Srovnání průběhu hodnot korelačního koeficientu R lineární regrese v závislosti na zvolené hodnotě časového parametru τ pro CO (vlevo) a NO_X (vpravo) (za období únor-květen 2020)

Grafy na obr. 102 zobrazují srovnání denních vypočítaných emisí NO_X a průměrné koncentrace NO_X za daný den (vlevo) a srovnání denních vypočítaných emisí CO a průměrné koncentrace CO za daný den (vpravo) za období srpen 2019 až prosinec 2020.



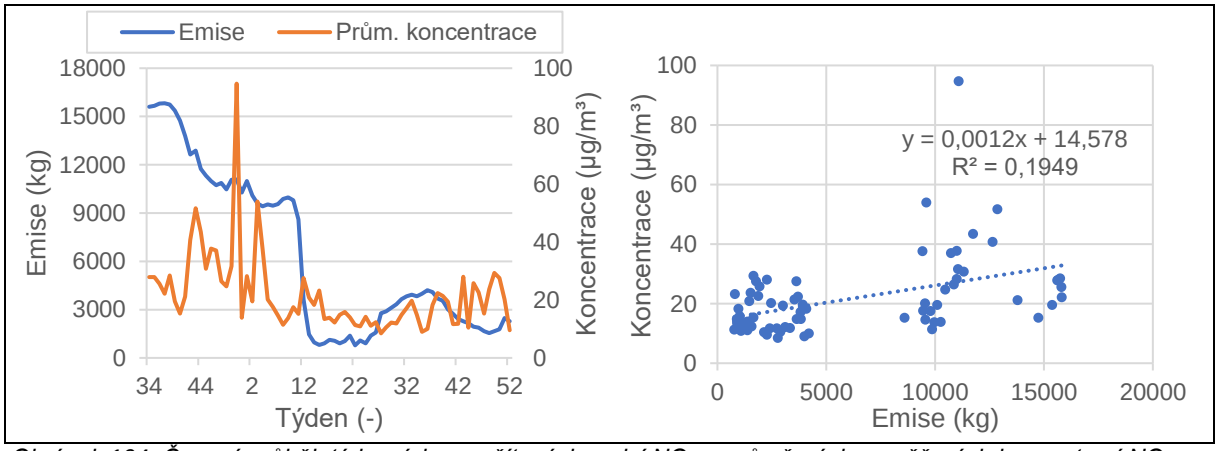
Obrázek 102: Srovnání denních vypočítaných emisí NO_X a průměrné koncentrace NO_X za daný den (vlevo) a denních vypočítaných emisí CO a průměrné koncentrace CO za daný den (vpravo) (srpen 2019-prosinec 2020)

Grafy na obr. 103 zobrazují srovnání denních vypočítaných emisí NO_X a průměrné koncentrace NO_X za daný den (vlevo) a srovnání denních vypočítaných emisí CO a průměrné koncentrace CO za daný den (vpravo) za období únor-květen roku 2020.



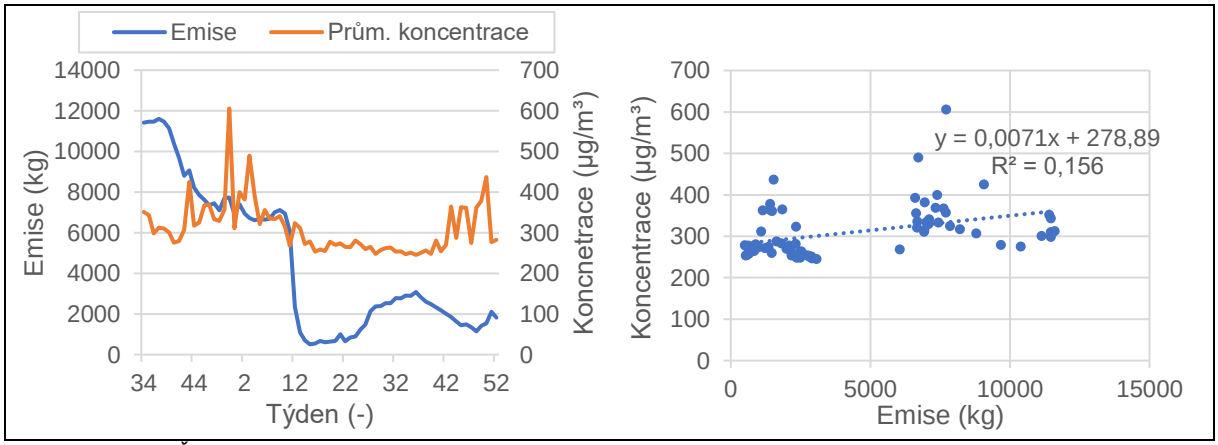
Obrázek 103: Srovnání denních vypočítaných emisí NO_X a průměrné koncentrace NO_X za daný den (vlevo) a denních vypočítaných emisí CO a průměrné koncentrace CO za daný den (vpravo) (únor-květen 2020)

Grafy na obr. 104 zobrazují časový průběh týdenních vypočítaných emisí NO_X a průměrných koncentrací NO_X za daný týden (vlevo) a srovnání hodnot těchto dvou veličin (vpravo).



Obrázek 104: Časový průběh týdenních vypočítaných emisí NO_X a průměrných naměřených koncentrací NO_X za daný týden (vlevo) a následné srovnání hodnot těchto veličin (vpravo) (srpen 2019-prosinec 2020)

Grafy na obr. 105 zobrazují časový průběh týdenních vypočítaných emisí CO a průměrných koncentrací CO za daný týden (vlevo) a srovnání hodnot těchto dvou veličin (vpravo).



Obrázek 105: Časový průběh týdenních vypočítaných emisí CO a průměrných naměřených koncentrací CO za daný týden (vlevo) a následné srovnání hodnot těchto veličin (vpravo) (srpen 2019-prosinec 2020)

6 Diskuze výsledků

V předchozí kapitole byly představeny výsledky praktické části práce získané na základě postupu řešení popsaného v kapitole 4. Účelem této kapitoly je interpretace těchto výsledků a diskuze všech závěrů relevantních ke konkrétním řešeným cílům práce. Pro lepší přehlednost byl před každou část věnující se danému přístupu analýzy dat přidán titulek.

Základní analýza dat – Meziroční srovnání kvality ovzduší na letištích

V případě pražského letiště došlo u všech látek s výjimkou O_3 (tj. u CO, NO_X (NO a NO_2), $PM_{2,5}$ a PM_{10}) k meziročnímu zlepšení, tj. jejich průměrné denní koncentrace byly v roce 2020 obecně nižší, než v roce 2019. Tento závěr vychází jednak z vytvořených krabicových diagramů na obr. 68 až 74 a jednak ze statistického testování těchto dat (viz tab. 21). Otázkou však zůstává, zda bylo toto zlepšení způsobeno slabším provozem na letišti v roce 2020 v souvislosti s pandemií, nebo zda se jednalo spíše o vliv jiných faktorů (ostatní letištní či mimoletištní zdroje emisí). Částečné závěry lze vyvodit posouzením bodových grafů na obr. 68 až 74, kdy se při zanedbání barevného rozlišení datových bodů prakticky pro všechny zkoumané látky ukazuje, že případná závislost mezi počtem denních pohybů na letišti a příslušnou průměrnou denní koncentrací dané látky buďto existuje jen velice slabě, nebo vůbec. Toto vychází například z toho, že nějaká obecná hodnota denní průměrné koncentrace dané látky byla často zaznamenaná ve dnech s různým počtem denních letištních pohybů.

Meziroční zlepšení kvality ovzduší potvrzují i data pro amsterdamské a frankfurtské letiště. V případě amsterdamského letiště (grafy na obr. 15 až 20) se jedná stejně jako u pražského letiště o zlepšení z hlediska nižších denních průměrných koncentrací u všech zkoumaných látek (NO_X (NO a NO_2), $PM_{2,5}$, PM_{10}) s výjimkou CO, u nějž nebyla zaznamenána prakticky žádná meziroční změna. Meziroční zlepšení potvrzuje i statistické testování dat, kdy pro žádnou látku nebyla na dané hladině významnosti zamítnuta stanovená nulová hypotéza; tyto výsledky jsou v tab. 17. V případě frankfurtského letiště (grafy na obr. 42 až 47) došlo stejně jako u pražského letiště k meziročnímu zlepšení u denních průměrných koncentrací CO, NO a NO_2, přičemž nedošlo prakticky k žádné změně u O_3 a PM_{10} a v případě $PM_{2,5}$ došlo dokonce k mírnému meziročnímu zhoršení (byť dostupnost dat pro tuto látku za rok 2019 byla omezená, tudíž se jedná o srovnání pouze druhé poloviny roku, nikoli celého roku). Stejně jako u amsterdamského letiště ani zde nedošlo pro žádnou látku k zamítnutí testované nulové hypotézy (viz tab. 19). Na základě těchto výsledků lze stanovit závěr, že na všech zkoumaných letištích došlo v roce 2020 oproti roku 2019 ke zlepšení kvality ovzduší. Nejvíce bylo toto zlepšení patrné u oxidů dusíku (NO, NO_2, NO_X). V případě CO, $PM_{2,5}$ a PM_{10} došlo ke zlepšení na dvou ze tří letišť, přičemž v případě CO byla na amsterdamském letišti meziroční stagnace,

zatímco na frankfurtském letišti byla meziroční stagnace u PM_{10} a meziroční zhoršení u $PM_{2,5}$. U obou letišť (na pražském a frankfurtském), kde byly měřeny koncentrace O_3, nebyla zaznamenaná prakticky žádná meziroční změna. Pravděpodobným vysvětlením je, že O_3 je sekundární polutant, jehož vznik podléhá jinému mechanismu, než je tomu u ostatních látek.

Základní analýza dat – Srovnání mezi obdobími únor-březen a duben-květen 2020

Domněnka, že zlepšení kvality ovzduší na pražském letišti v roce 2020 nebylo primárně způsobené poklesem letištního provozu, je dále podporována výsledky analýzy dat za období únor-březen a duben-květen roku 2020, kdy byla tato dvě období srovnána stejným způsobem jako u meziročního srovnání. Výsledné bodové grafy a krabicové diagramy na obr. 75 až 81 a výsledky statistického testování dat v tab. 22 ukazují, že v případě všech látek s výjimkou CO a částečně NO a NO_X nedošlo mezi sledovanými obdobími k výraznějšímu snížení jejich průměrných denních koncentrací, a to přes prudký pokles letištního provozu, k němuž došlo během března roku 2020. V případě $PM_{2,5}$, PM_{10} a O_3 došlo dokonce k jejich zvýšení; u těchto látek byly rovněž statistickým testováním dat zamítnuty příslušné nulové hypotézy. U těchto dat pak lze zpozorovat ještě jednu skutečnost, a sice že přes poměrně úzký rozsah počtu denních letištních pohybů byl rozsah denních průměrných koncentrací řady látek mnohem větší. Toto lze interpretovat tak, že hodnoty průměrných denních koncentrací byly ovlivňované mnohem více různými faktory, než pouze počtem denních pohybů – velký rozsah hodnot mohl být například způsoben meteorologickými podmínkami či aktivitou jiných zdrojů emisí.

Stejně jako v případě pražského letiště byla u amsterdamského i frankfurtského letiště provedena stejným způsobem jako výše analýza dat za období únor-květen 2020. U grafů, respektive krabicových diagramů pro amsterdamské letiště (obr. 21 až 26) byl zaznamenán pokles mezi zkoumanými obdobími v případě NO_X, NO a NO_2; u CO došlo ke stagnaci a v případě $PM_{2,5}$ a PM_{10} došlo ke zhoršení. Statistické testování dat (výsledky v tab. 18) zamítlo nulovou hypotézu o zlepšení situace v případě CO a PM_{10}; u $PM_{2,5}$ sice k zamítnutí nedošlo, nicméně příslušná p-hodnota (0,0547) ležela i tak velmi blízko hranici zamítnutí, což je nutné brát v potaz. V případě krabicových diagramů odpovídajících frankfurtskému letišti (obr. 48 až 53) mezi zkoumanými obdobími nedošlo u žádné látky k významnému snížení jejích průměrných denních koncentrací; k viditelnému zhoršení došlo opět v případě $PM_{2,5}$ a PM_{10}. Statistické testování dat (viz tab. 20) dokonce zamítlo nulovou hypotézu o zlepšení situace u všech látek kromě O_3 (tj. u CO, NO, NO_2, $PM_{2,5}$ a PM_{10}). Závěry stanovené v tomto odstavci jsou v zásadě konzistentní se závěry v případě pražského letiště, a sice že prudký pokles letištního provozu během března 2020 nezpůsobil v následujících týdnech významné zlepšení kvality ovzduší z hlediska poklesu průměrných denních koncentrací měřených látek. Napříč všemi zkoumanými letišti bylo dokonce prokázáno zhoršení v případě denních

průměrných koncentrací $PM_{2,5}$ a PM_{10}. Výše zmíněný velký vertikální rozsah klastrů datových bodů pro období duben-květen 2020 v poměru k jejich malému horizontálnímu rozsahu byl zaznamenán i u těchto letišť, přičemž již formulované vysvětlení zůstává stejné i v tomto případě; tj. i pro malé rozmezí denního počtu pohybů existovala významná variabilita hodnot denních průměrných koncentrací, která mohla být způsobená vlivem ostatních podmínek nezávislých na letištním provozu jako takovém.

Základní analýza dat – Vývoj sledovaných veličin během útlumu letištního provozu

Bližší pohled na to, co se v čase dělo s průměrnými denními koncentracemi jednotlivých látek v době největšího poklesu letištního provozu, nabízejí v případě pražského letiště grafy na obr. 82 až 88, kdy byly hodnoty těchto veličin pro lepší přehlednost vyhlazeny pomocí sedmidenního klouzavého průměru. Jak již bylo zmíněno výše, nejvíce reagovaly na pokles počtu denních letištních pohybů průměrné denní koncentrace CO, avšak ani u nich nedošlo k proporčně stejnému poklesu, který by naznačoval, že hodnoty těchto dvou veličin jsou významným způsobem provázané, tedy že průměrné denní koncentrace závisejí z velké části právě na tom, kolik bylo na letišti za daný den realizováno pohybů. U ostatních grafů je pak patrná již výše zmíněná stagnace koncentrací (především u oxidů dusíku obecně) či jejich případné zvýšení, které je nejpatrnější v případě O_3. Za zmínku zde stojí vývoj denních průměrných koncentrací $PM_{2,5}$ a PM_{10}, jejichž hodnoty byly mezi koncem března a počátkem května až dvojnásobné oproti zbytku sledovaného období, přičemž k jejich nárůstu poněkud paradoxně došlo v době, kdy letištní provoz klesal. Jak bude zmíněno níže, nejednalo se pouze o jev spojený s pražským letištěm.

Stejné grafy byly pro toto období vytvořené také v případě amsterdamského (obr. 27 až 32) a frankfurtského letiště (obr. 54 až 59). Zatímco v případě pražského letiště došlo v případě CO k poklesu sedmidenního klouzavého průměru denních průměrných koncentrací, u ostatních letišť byla u této látky zaznamenána spíše stagnace. U amsterdamského letiště byl zaznamenán velmi mírný pokles u NO_X, NO_2 a NO, přičemž v případě $PM_{2,5}$ a PM_{10} byl zhruba ve stejnou dobu jako u pražského letiště zaznamenán oproti očekávání nárůst jejich hodnot. Ke stejnému jevu došlo také v případě frankfurtského letiště. Pravděpodobné vysvětlení nabízí švýcarská studie zpracovaná v roce 2020 věnující se změně kvalitě ovzduší v okolí curyšského letiště v reakci na pandemii. I na tamním letišti byl ve stejné době zaznamenán podobný nárůst koncentrací PM_{10} v ovzduší. Podle studie byl příčinou tohoto jevu saharský písek, který byl tou dobou z Afriky větrem přenášen nad Evropu [54]. Tím je zároveň podporována hypotéza, že pokles letištního provozu v souvislosti s pandemií neměl dle zkoumaných dat rozhodující vliv na koncentrace těchto látek. V případě frankfurtského letiště

byla pro zbývající látky (tj. O_3, NO a NO_2) zaznamenána stagnace hodnot; u NO a částečně i CO pak méně fluktuovaly.

Základní analýza dat – Poměrová meziroční změna kvality ovzduší a letištního provozu

Dalším zvoleným přístupem z hlediska meziročního srovnání sedmidenního klouzavého průměru hodnot denních průměrných koncentrací jako takových bylo stanovení meziročního srovnávacího indexu MSDPK, přičemž byl sledován jeho průběh ve srovnání s indexem MSDP, který reprezentoval meziroční poměrnou změnu sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů. Toto v případě pražského letiště ukazují grafy na obr. 89 až 95. V případě CO a O_3 nemohl být index MSDPK zpracován v kompletním rozsahu kvůli nedostupnosti dat pro prvních sedm měsíců roku 2019. Pro ostatní látky (NO_X, NO, NO_2 a v omezené míře i $PM_{2,5}$ a PM_{10}) byly v období mezi koncem března a počátkem srpna jeho hodnoty obecně menší než jedna, což znamená, že meziročně došlo k poklesu denních průměrných koncentrací (respektive jejich sedmidenního klouzavého průměru). To se zároveň částečně překrývá s obdobím, kdy byly hodnoty indexu MSDP nejnižší, tj. na letišti byl meziročně nejvýraznější úbytek provozu. Po zbytek roku pak u těchto látek došlo k několika výkyvům hodnot indexu MSDPK nad jedna, přičemž doby těchto výkyvů byly velice podobné napříč látkami, což by mohlo naznačovat dočasné obecně zhoršené rozptylové podmínky jakožto příčinu. Nicméně je na místě doplnit, že i tak bylo tímto přístupem prokázáno meziroční zlepšení kvality ovzduší, což podporuje závěry vycházející z ostatních zvolených přístupů. Dlouhodobý pokles hodnot indexu MSDPK mezi koncem března a počátkem srpna napříč látkami pod jedna lze sice teoreticky spojit s obdobím nejvýraznějšího poklesu letištního provozu, nicméně s ohledem na výše uvedené závěry je otázkou, zda se zde spíše než o kauzalitu nejedná o korelaci, protože během stejného období z důvodu lockdownu došlo i k útlumu průmyslových a jiných aktivit, tudíž uvolňovaných emisí bylo během tohoto období obecně menší množství všude, nikoli pouze na letišti.

Časový vývoj hodnot indexů MSDPK a MSDP byl sledován i v případě amsterdamského (obr. 33 až 38) a frankfurtského letiště (obr. 60 až 64). U amsterdamského letiště se v případě CO hodnoty indexu MSDPK v době největšího útlumu letištního provozu (tj. nejnižších hodnot indexu MSDP) pohybovaly většinu času nad hodnotou jedna, což podporuje již dřívější zjištění, že u této látky zde nedošlo oproti jiným letištím k meziročnímu zlepšení. V případě frankfurtského letiště se hodnoty indexu MSDPK pro tuto látku držely pod hodnotou jedna již od začátku února, tedy více než měsíc předtím, než poklesl index MSDP. To naznačuje, že za tímto meziročním zlepšením mohla být jiná příčina. Nicméně si lze i tak povšimnout, že v době největšího útlumu letištního provozu byly hodnoty indexu MSDPK o něco stabilnější (tedy nedocházelo k jejich výrazným výkyvům), než v druhé polovině roku či na jeho počátku.

Hodnoty indexu MSDPK pro NO_X, NO a NO_2 se v případě amsterdamského letiště pohybovaly během období největšího útlumu letištního provozu (od konce března do konce července) s výjimkou jediného výkyvu během dubna pod hodnotou jedna. V případě frankfurtského letiště to stejné platilo v případě NO a v menší míře také u NO_2 (kde se však index MSDPK častěji „dotýkal" hodnoty jedna). U tohoto letiště byl také sledován průběh hodnot indexu MSDPK v případě O_3, kdy se během období největšího poklesu letištního provozu jeho hodnota pohybovala kolem jedné. Zde se však pravděpodobně jedná o efekt okolních zdrojů emisí daný situací letiště, přičemž srovnání s pražským letištěm, které by poskytlo další informace, není kvůli nedostupnosti tamních dat pro O_3 za první polovinu roku 2019 možné. U obou letišť pak hodnoty indexu MSDPK v případě PM_{10} a $PM_{2,5}$ žádným způsobem nereagovaly na pokles letištního provozu, přičemž v případě frankfurtského letiště nebyla pro $PM_{2,5}$ za toto období dostupná kompletní data, tudíž index nemohl být vypočítán pro celý rok. Závěry vycházející z této analýzy podporují do jisté míry dříve stanovené závěry pro pražské letiště. Nejvíce podobný napříč všemi letišti byl časový vývoj indexů MSDPK pro oxidy dusíku obecně; u ostatních látek panovaly napříč letišti odlišnosti, například v podobě absence meziročního zlepšení v případě CO na amsterdamském letišti či mírného meziročního poklesu koncentrací PM_{10} a $PM_{2,5}$ v případě pražského letiště. Tyto odlišnosti lze do jisté míry vysvětlit odlišnou situací jednotlivých letišť v kontextu blízkosti k dalším zdrojům emisí těchto látek.

Základní analýza dat – Meziroční srovnání denního průběhu koncentrací škodlivin

Z hlediska sledování meziroční změny kvality ovzduší bylo také možné sledovat na vybraném vzorku dní průměrný denní průběh koncentrací dané látky v ovzduší; tomuto se v případě pražského letiště věnují grafy na obr. 96 až 98. V případě NO_X, NO, NO_2 byly pro rok 2019 dobře patrné ranní a večerní vrcholy koncentrací. Tyto byly s výjimkou večerního vrcholu u NO zachovány i v případě roku 2020, přičemž zatímco doba ranního vrcholu zůstala všude stejná, večerní vrcholy u NO_X a NO_2 byly oproti roku 2019 mírně opožděné. V případě koncentrací $PM_{2,5}$ byl pro rok 2019 opět patrný ranní vrchol a méně výrazný večerní vrchol, přičemž tyto byly do jisté míry zachovány i pro rok 2020, kdy rovněž došlo k meziročnímu poklesu koncentrací v průběhu dne. U koncentrací PM_{10} byl v roce 2019 patrný pouze ranní vrchol, který však byl méně výrazný než u ostatních látek; i zde ovšem došlo v roce 2020 k meziročnímu poklesu koncentrací v průběhu dne. V případě posledních dvou zmiňovaných látek došlo k mírnému opoždění doby výskytu ranního vrcholu. Kvůli nedostupnosti dat pro CO a O_3 nebylo možné u těchto látek vytvořit stejné srovnání. Tyto poznatky podporují zjištění, že na pražském letišti došlo v roce 2020 ke zlepšení kvality ovzduší oproti předchozímu roku.

Stejným způsobem, jako v případě pražského letiště, byla analyzována data pro stejné vybrané dny v případě amsterdamského (obr. 39 až 41) i frankfurtského letiště (obr. 65 až 67).

U amsterdamského letiště lze v případě CO pro rok 2020 zpozorovat obecně zvýšené koncentrace v průběhu dne ve srovnání s rokem 2019. To odpovídá předchozím závěrům, že na tomto letišti nedošlo meziročně k poklesu průměrných denních koncentrací této látky. Naproti tomu u frankfurtského letiště je pro tuto látku velice silně patrný meziroční pokles. Denní průběh koncentrací NO_X, NO a NO_2 je pro rok 2020 v případě amsterdamského letiště rovněž mírně vyšší, přičemž nejvýrazněji se tento rozdíl projevuje u ranních vrcholů koncentrace. Naopak u frankfurtského letiště je opět patrný meziroční pokles, přičemž u NO i NO_2 je patrný nižší ranní i večerní vrchol. Průběh koncentrací $PM_{2,5}$ v případě amsterdamského a pro PM_{10} i u frankfurtského letiště v průběhu dne byl meziročně prakticky stejný, přičemž pro rok 2020 jsou u obou látek v případě amsterdamského letiště patrné snížené koncentrace v odpoledních hodinách oproti předchozímu roku, zatímco v případě PM_{10} u frankfurtského letiště byl odpolední pokles výraznější pro rok 2019. Z hlediska meziročního srovnání denního průběhu koncentrací v případě O_3 na frankfurtském letišti bylo zpozorováno, že obě látky dosáhly ve večerních hodinách zhruba stejné hodnoty, přičemž růst i následný pokles koncentrací byl rychlejší v případě roku 2020. Toto podporuje předchozí závěry o tom, že meziročně nedošlo k významné změně z hlediska koncentrací O_3 v ovzduší.

Základní analýza dat – Shrnutí a diskuze

Na základě výše prezentovaných výsledků analýzy dat lze shrnout podstatné závěry. V roce 2020 došlo vlivem zavedení protipandemických opatření v mnoha zemích světa k masivnímu poklesu úrovně letecké dopravy, což se projevilo významným útlumem v provozu na všech třech sledovaných mezinárodních letištích. Ze zkoumaných látek, u nichž došlo k meziročnímu zlepšení situace, hodnocené pomocí jejich denních průměrných koncentrací, se v případě všech tří zkoumaných letišť jednalo o oxidy dusíku (NO, NO_2, respektive NO_X obecně), v omezené míře pak také o CO a PM ($PM_{2,5}$ a PM_{10}). Meziročně pak nedošlo u žádného letiště k prakticky jakékoli změně u O_3. Při další analýze bylo zjištěno, že pokles koncentrací těchto látek nesouvisel zcela s útlumem letištního provozu, jelikož koncentrace látek nereagovaly bezprostředně na útlum letištního provozu v jarních měsících roku 2020. Tento pokles byl pravděpodobně důsledkem celkového vývoje situace kolem aktivity více různých zdrojů emisí, včetně těch mimo letiště. Použitá data byla analyzována různými přístupy, tudíž lze o výsledcích analýzy hovořit jako o spolehlivých. Jejich spolehlivost podporuje i skutečnost, že vycházejí z analýzy dat pro více letišť.

Tyto závěry jsou rovněž částečně podporované některými již publikovanými studiemi ze světa. Například podle již výše zmíněné švýcarské studie zpracované pro letiště v Curychu došlo po útlumu letištního provozu ke snížení koncentrací NO_2 (44 %), ovšem nikoli proporčně k redukci celkových emisí NO_X na letišti (87 %). Podle autora studie tedy emise z curyšského letiště

neměly rozhodující vliv na kvalitu ovzduší v okolí, jelikož výrazněji se projevila změna emisí z okolních pozemních komunikací. Konkrétní změnu koncentrací PM nebylo možno posoudit kvůli již zmíněnému fenoménu saharského písku [54]. Další studie zpracovaná tchajwanskými výzkumníky pracovala s daty z měřicí stanice vzdálené zhruba dva kilometry od letiště v Tchaj-peji. Podle jejich výsledků tamní meziroční úbytek letištního provozu o zhruba 80 % v důsledku pandemie způsobil na této stanici proporcionálně menší meziroční pokles koncentrací NO_X a PM, a to pouze o zhruba 15 %; u CO pak nebyla zaznamenána žádná významná změna. Autoři toto vysvětlili přítomností jiných zdrojů znečištění, jejichž aktivita údajně zůstávala stejná i během pandemie [55]. Ani jedna z dosud zmíněných studií tedy letištním emisím nepřipsala rozhodující význam z pohledu zlepšení místní kvality ovzduší během pandemie. Čínská studie v důsledku omezení letištního provozu po vypuknutí pandemie prokázala pokles koncentrací NO_X, NO, NO_2, PM a CO naměřených v bezprostředním okolí letiště v Šanghaji (na okraji letištního areálu) i ve Wuchanu (zhruba jeden kilometr od letiště), přičemž u tohoto letiště byl zaznamenán významný pokles koncentrací těchto látek během 24 hodin od kompletního uzavření letiště (k tomu u žádného ze tří sledovaných letišť v práci nedošlo). U obou letišť byl zároveň zaznamenán nárůst koncentrací O_3, což autoři vysvětlují například sníženým množstvím NO v ovzduší či zvýšeným množstvím slunečního záření v důsledku nižších koncentrací PM [56].

Nicméně je na místě brát v potaz limitace použité metodiky. Aby bylo možné přesněji interpretovat všechny výsledky, je nutná hlubší znalost situace daného letiště včetně co nejpřesnějšího přehledu okolních zdrojů emisí a jejich aktivity, na základě čehož by bylo možné přesněji odhadnout vliv letištního provozu na místní kvalitu ovzduší. V blízkosti sledovaných měřicích stanic se totiž například často nacházely rychlostní komunikace, které měly jistě vliv na naměřené koncentrace. V rámci použité metodiky pak byla u každého letiště použita data pouze z jedné stanice, přičemž nebyla využita data z okolních stanic, která by bylo možné vzájemně porovnat v rámci hlubší analýzy. Další aspekt práce, který však nemusí být apriori limitací, je výběr zkoumaných parametrů. Kvalita ovzduší na letištích byla hodnocena pomocí denních průměrných koncentrací dané látky, zatímco letištní provoz byl charakterizován počtem denních pohybů. Analýza využívající tyto ukazatele sice poskytla relevantní výsledky, ovšem je možné, že při volbě jiných indikátorů (např. počet pohybů za poslední 2 dny či denní maximální koncentrace) by byly některé výsledky jiné. Nicméně nelze tvrdit, že výsledné závěry by byly natolik odlišné, že skutečně použité ukazatele by ztratily smysl. Podstatnou limitací této práce pak byla její závislost na externích datech. Ta byla v pár případech nekompletní – buďto koncentrace dané látky nebyly na konkrétním letišti měřeny vůbec (např. O_3 v Amsterdamu), nebo bylo jejich měření zahájeno až v průběhu sledovaného období, a tudíž část jejich dat chyběla, což byl případ CO a O_3 v Praze nebo $PM_{2,5}$ ve Frankfurtu. Tím

pádem nebylo možné realizovat kompletní srovnání všech látek napříč všemi letišti, ovšem vliv na konečné výsledky nebyl zásadní.

LTO emisní model – Srovnání emisí a průměrných koncentrací dle časového okénka

V rámci podrobnější analýzy emisí CO a NO_X byl v případě pražského letiště kromě základní analýzy dat, jejíž postup byl shodný pro všechna tři zkoumaná letiště a jejíž výsledky byly rozebrány výše, využit i jednoduchý emisní model založený na mírně upraveném ICAO LTO cyklu. Jeho základní princip byl již popsán výše, v kapitole 4.3, nicméně pro připomenutí lze uvést, že se jednalo o srovnání součtu vypočítaných emisí za posledních τ hodin s průměrnou naměřenou koncentrací dané látky za stejné časové období. Pohled na toto srovnání nabízely grafy na obr. 99 (CO) a 100 (NO_X), které zároveň sledovaly efekt různého nastavení časového parametru τ během období únor-květen 2020, které bylo vybráno proto, že zahrnovalo jednak běžný provoz a jednak nejsilnější útlum provozu spojený se zavedenými protiepidemickými opatřeními. Tento účinek bylo možné sledovat různými způsoby – například lineární regresí či sledováním hodnot korelačního koeficientu R v závislosti na hodnotě parametru τ. V případě CO (obr. 99) hodnota korelačního koeficientu R s rostoucí hodnotou τ mírně rostla, například pro $\tau = 1$ byla jeho hodnota $R = 0{,}3682$, zatímco pro $\tau = 8$ byla $R = 0{,}4480$. Na základě toho lze uvažovat, že účinek emisí CO na místní kvalitu ovzduší (zde udávanou pomocí průměrné naměřené koncentrace) během zkoumaného období je patrnější, pokud jsou počítány i dříve vzniklé emise. To stejné však nelze říci v případě emisí NO_X kvůli mnohem nižším pozorovaným hodnotám korelačního koeficientu R (např. pro $\tau = 8$ byla jeho hodnota $R = 0{,}02$; viz obr. 100); k objasnění tohoto by bylo potřeba další zkoumání. Detailní průběh korelačních koeficientů R pro obě látky je zobrazený na obr. 101.

U grafů pro obě látky (obr. 99 a 100) bylo zpozorováno, že při hodnotách zhruba $\tau \geq 16$ docházelo k vzniku klastrů datových bodů (toto je dobře patrné např. u grafů f) obr. 99 a 100) propojených jakýmisi „ocásky“ tvořenými jednotlivými body. Vzhled těchto grafů již nebyl konzistentní s předchozími grafy odpovídajícími nižším hodnotám parametru τ, kdy datové body tvořily poměrně kompaktní obraz (jak je popsáno níže), přičemž i při jednoduchém vizuálním posouzení již byla zřejmá nevhodnost aplikování lineární regrese, což bylo v přímém rozporu s jedním ze základních předpokladů modelu, podle nějž by lineární regrese měla být možná. Domněnku o nevhodnosti lineární regrese podporuje i skutečnost, že v případě NO_X měly vzniklé regresní přímky zápornou směrnici, což odporuje ostatním případům, kde byla regresní přímka rostoucí (mj. v souladu s původními předpoklady). Z toho lze usoudit, že tento přístup hodnocení vlivu emisí na místní kvalitu ovzduší založený na posuzování závislosti průměrné naměřené koncentrace na množství vzniklých emisí je navzdory výše uvedenému tvrzení vhodné volit pouze pro omezené časové okno v minulosti. Možným vysvětlením by

mohla být skutečnost, že tento přístup je citlivý na okolní podmínky, jejichž proměnlivost je pravděpodobnější v případě delšího časového okna (respektive vyšších hodnot parametru τ), kdy dochází k většímu ovlivnění naměřených koncentrací, a tedy vypouštěné emise samotné je již takto přímým způsobem neovlivňují – byť určitý vliv nejspíše stále existuje.

Při zaměření se na zbývající grafy, tedy ty, které odpovídají nižším nastaveným hodnotám parametru τ (tj. grafy a) až d) na obr. 99 a 100) než ty, které byly v předchozím odstavci označeny za nevyhovující, lze v nich pro obě látky spatřit podobné charakteristiky z hlediska uspořádání datových bodů. Většina datových bodů se nacházela v jednom hlavním klastru, přičemž v obou případech se v zásadě jednalo o klastr obdélníkového tvaru, zatímco ten odpovídající NO_X měl navíc blízko osy y výraznější „hrb“, jehož vysvětlení by mohlo spočívat ve větším podílu datových bodů odpovídajících malému množství vypočítaných emisí v případě NO_X. Nejvýraznější jsou tyto klastry v případě grafů c) a d) obou látek, tj. pro $\tau = 4$ a $\tau = 8$. Pro obě látky pak lze nad oběma klastry spatřit řadu datových bodů, které lze vysvětlit netypicky vysokými hodnotami průměrné naměřené koncentrace pro dané množství emisí. O tom, že pro dané množství emisí lze obecně naměřit různou koncentraci dané látky v ovzduší, svědčí vertikální rozsah klastrů. Protože grafy zahrnují data za čtyři měsíce (únor až květen 2020), je zřejmé, že během této doby panovaly na letišti různé podmínky, které způsobily tento vertikální rozsah včetně nevýrazné horní meze klastrů. Poměrně výrazná je však u většiny klastrů (především pak u těch pro NO_X a vyšší hodnoty τ) jejich spodní mez, kterou lze interpretovat jako nejnižší očekávatelnou průměrnou koncentraci dané látky v ovzduší při určitém množství emisí. Pokud bychom ji proložili přímkou, měla by prakticky ve všech případech kladný sklon, tudíž lze říci, že pro obě látky během zkoumaného období s rostoucím množstvím emisí uvolněných za aktuální časové období (při konstantní hodnotě parametru τ) obecně rostla minimální očekávatelná koncentrace dané látky v ovzduší.

LTO emisní model – Srovnání denních emisí a denních průměrných koncentrací

Kromě předchozího přístupu bylo také možné srovnávat celkové denní vypočítané emise s průměrnou naměřenou koncentrací za daný den. Toto bylo provedeno pro dvě časová období. Pro období srpen 2019 až prosinec 2020 (viz obr. 102) byla výsledná regresní přímka v případě obou látek rostoucí, tj. s rostoucím množstvím emisí za daný den obecně rostla průměrná naměřená koncentrace dané látky v ovzduší, byť i tak nelze hovořit o zcela silné korelaci (pouze $R = 0{,}320$ pro CO a $R = 0{,}322$ pro NO_X – dle stupnice z [48] se jedná o střední stupeň závislosti). Možným vysvětlením je například přítomnost dalších zdrojů znečištění a proměnlivé meteorologické podmínky; další možností je však také nepřesnost samotného odhadu emisí. V případě období únor-květen 2020 (viz obr. 103) vyšla v případě CO silnější závislost ($R = 0{,}552$), naopak nižší pro NO_X ($R = 0{,}069$). Nárůstu hodnoty koeficientu

R v případě CO lze vysvětlit například tak, že s nástupem pandemie, respektive protipandemických opatření, došlo k útlumu aktivity jiných zdrojů emisí CO (např. řidší provoz na okolních pozemních komunikacích), a že tedy vliv emisí CO vzniklých na letišti na naměřené koncentrace byl o něco výraznější. Na druhou stranu však toto vysvětlení nelze použít u emisí NO_X, kde pro toto období dochází k nečekanému chování – např. směrnice regresní přímky je záporná, což je v rozporu s předpoklady i ostatními grafy. Pro vysvětlení tohoto je nutná další analýza nad rámec této práce.

LTO emisní model – Srovnání týdenních emisí a týdenních průměrných koncentrací

Dále byly stejným způsobem sledovány týdenní vypočítané emise, respektive jejich souvislost s týdenní průměrnou naměřenou koncentrací, a to opět za celkové období srpen 2019 až prosinec 2020. Pro obě látky vyšla kladná závislost, jinými slovy s rostoucím množstvím emisí za týden rostla i týdenní průměrná koncentrace dané látky v ovzduší. Kromě korelace hodnot obou veličin byl sledován i jejich časový průběh. Je zřejmé, že prudký pokles hodnot týdenních emisí počínající kolem 12. týdne roku 2020 jak pro NO_X (viz obr. 104), tak i CO (viz obr. 105) souvisí s počátkem útlumu leteckého provozu v souvislosti s nástupem pandemie. Ani pro jednu látku bezprostředně poté nedošlo k proporčně podobnému poklesu průměrných týdenních koncentrací. V případě NO_X (obr. 104) však lze říci, že jejich hodnoty po zbytek roku méně kolísaly – například srovnáme-li pro roky 2019 a 2020 období zhruba od týdne 34 do konce roku. Vůbec nejméně pak kolísaly mezi týdny 18-30, přičemž během této doby byly zároveň jejich hodnoty na vůbec nejnižší úrovni (zhruba 10-12 µg/m³). Tento interval zhruba koresponduje s obdobím, kdy byly týdenní emise NO_X na nejnižší úrovni (týdny 15-26). Za povšimnutí zde stojí zhruba třítýdenní prodleva mezi těmito intervaly. Se stejným zpožděním poté došlo k mírnému nárůstu týdenních průměrných koncentrací po předchozím nárůstu týdenních emisí zhruba od zhruba 27. týdne. V případě CO (obr. 105) došlo po zhruba 14. týdnu roku 2020 k mírnému poklesu týdenních průměrných koncentrací a následné fluktuaci kolem hodnoty 260 µg/m³, přičemž oproti NO_X zde nedošlo k žádné změně v souvislosti s nárůstem průměrných týdenních emisí CO po 27. týdnu. Nejspíše až v souvislosti s nástupem podzimu (zhruba od 42. týdne, tj. zhruba poloviny října) a s tím např. spojených zhoršených rozptylových podmínek došlo opět k větší fluktuaci týdenních průměrných koncentrací CO a jejich nárůstu na téměř původní hodnoty. Vzhledem k tomu, že po prudkém poklesu týdenních emisí nedošlo k podobně silnému poklesu průměrných týdenních koncentrací CO ani NO_X, lze usoudit, že emise ze samotného letištního provozu neměly během sledovaného období rozhodující vliv na místní kvalitu ovzduší, ale že se zde jednalo o kombinaci více různých zdrojů emisí, včetně těch mimo samotné letiště. To také podporuje závěry vycházející ze základní analýzy dat rozebírané výše.

LTO emisní model – Shrnutí a diskuze

Poznatky poskytnuté výše popsaným emisním modelem jsou v kontextu cílů práce přínosné. Hlavní účel modelu byl ověřit, jak moc spolu souvisejí koncentrace dané látky v ovzduší a emise této látky vypouštěné letadly na letišti – jednalo se tedy v zásadě o doplňující analýzu dat ke stávajícím použitým přístupům v rámci základní analýzy. Právě tato zmiňovaná souvislost je totiž zásadním předpokladem pro to, aby bylo možné posuzovat dopady poklesu letištního provozu během pandemie na místní kvalitu ovzduší. Model ukázal, že skutečně existuje určitý vztah mezi množstvím vypouštěných emisí za určité časové období a průměrnou naměřenou koncentrací za toto období. Při interpretaci výsledků však také vyšlo najevo, že pro přesnější stanovení dopadů emisí z letadel na letištích na místní kvalitu ovzduší je nutné brát v úvahu i ostatní zdroje emisí. Model rovněž nebral v úvahu aktuální meteorologické podmínky, jejichž neznalost měla na správnou interpretaci výsledků jistě také vliv. V neposlední řadě mohly být výsledky ovlivněné nepřesnostmi v samotné metodice stanovení emisí jednotlivých pohybů, a to např. z hlediska způsobu stanovení jednotlivých emisních indexů pro konečné výpočty či časů dílčích provozních režimů v rámci LTO cyklu; především co se týče doby pojíždění. Ta byla převzata jako průměr za dané období, což nereflektovalo individuální pohyby a různé provozní situace na letišti. Samotný LTO cyklus ve své původní podobě je velmi obecným a pro získání spolehlivějších odhadů emisí je nutná jeho úprava, ke které do určité míry došlo v rámci této práce. Kromě toho je také nutné mít na paměti, že model nezahrnoval všechny letištní pohyby, ale pouze 99 % všech letištních pohybů za období 2019-2020. Jedná se sice o spíše marginální rozdíl, nicméně případné zahrnutí všech letištních pohybů v rámci budoucí úpravy modelu by mělo jistě pozitivní účinek. Všechny zmíněné nedostatky modelu je možné do budoucna vzít v potaz a řešit je při dalším zkoumání. Pro potřeby této práce, kdy účelem tohoto modelu bylo především poskytnutí obecných podpůrných poznatků, bylo jeho použití při jeho aktuálním nastavení dostačující a jeho výsledky lze brát jako spolehlivé.

7 Závěr

Práce nejprve poskytla potřebné teoretické základy v problematice znečištění ovzduší včetně jeho spojitosti s letištním provozem. Nejprve byly popsány jednotlivé látky sledované v rámci této práce, a to s důrazem na jejich vznik v rámci provozu letecké dopravy a jejich zdravotní dopady na člověka, respektive životní prostředí. Poté byla představena problematika kvality ovzduší z pohledu požadavků daných národní i evropskou legislativou a také z hlediska používaných metod pro měření koncentrací sledovaných látek. Dosud diskutovaná problematika byla posléze propojena s otázkou provozu letišť, kdy byl kladen důraz především na jednotlivé letištní zdroje emisí. V praktické části práce byla analyzována data pro tři evropská mezinárodní letiště za roky 2019 a 2020, přičemž nejprve byl představen postup zpracování použitých dat a poté zvolené přístupy jejich následné analýzy. Výsledky této analýzy potvrdily obecné zlepšení kvality ovzduší na všech zkoumaných letištích v pandemickém roce (2020) ve srovnání s rokem před pandemií (2019). Jasný podíl útlumu letištního provozu v podobě poklesu počtu denních letištních pohybů na tomto zlepšení nebyl prokázán, což lze vysvětlit přítomností ostatních zdrojů znečištění ovzduší jak na letišti, tak v jeho okolí. Pro pražské letiště pak kromě této základní analýzy proběhla pro CO a NO_X dodatečná analýza dat s použitím emisního modelu založeného na modifikovaném ICAO LTO cyklu. Jeho výsledky potvrdily určitý vztah mezi emisemi z letadel na letišti a místní kvalitou ovzduší, přičemž tato závislost byla stejně jako u výše zmíněné základní analýzy dat omezená přítomností dalších znečišťujících zdrojů, které je nutné vzít v potaz při budoucím zkoumání.

Práce se zabývala poměrně nedávným fenoménem, a sice bezprecedentním útlumem letecké dopravy způsobeným pandemií v kontextu jeho dopadů na místní ovzduší v okolí letišť. Lze předpokládat, že v následujících letech bude tato problematika pro svoji ojedinělost předmětem vědeckého zkoumání. O tom svědčí i skutečnost, že v současné době již dochází k publikaci prvních studií na toto téma. Tato práce může k tomuto zkoumání přispět jako zdroj možných přístupů, jak analyzovat data relevantní k této otázce. Její výsledky pak mohou rovněž posloužit jako reference pro srovnání s případnými budoucími studiemi zpracovanými pro letiště zkoumaná v této práci. V otázce volby přístupů analýzy dat pro navazující výzkumnou činnost pak může být přínosné například využití principů emisního modelu založeného na modifikovaném ICAO LTO cyklu. Do budoucna lze parametry tohoto modelu rozšířit o emise z ostatních letištních zdrojů či zdrojů v blízkosti letiště; například s využitím emisních inventářů zpracovaných místními úřady či různých provozních informací poskytnutých letištěm. Při výpočtech samotných emisí letištních pohybů je pak ideální využívat v maximální možné míře data z reálného provozu. Kromě toho lze v případě dalšího zkoumání v budoucnu zohlednit také meteorologické podmínky.

Seznam použitých zdrojů

[1] VALLERO, Daniel. *Fundamentals of Air Pollution*. 4th edition. Londýn: Academic Press, 2008. ISBN 978-0-12-373615-4.

[2] MASIOL, Mauro a Roy M. HARRISON. Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review. *Atmospheric Environment* [online]. 2014, 95, 409-455 [cit. 2021-09-17]. ISSN 1352-2310. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosenv.2014.05.070

[3] THOMAS, Mary Rani, Nirmal VISWAM a Rohan POTHUMSETTY. HEALTH BENEFITS OF SHIFTING FROM BHARAT STAGE FOUR TO BHARAT STAGE SIX. *International Journal of Behavioural and Healthcare Research* [online]. 2020, 7(1) [cit. 2022-07-29]. ISSN 1755-3539. Dostupné z: doi:10.1504/IJBHR.2020.10031203

[4] BRANIŠ, Martin a Iva HŮNOVÁ, ed. *Atmosféra a klima: aktuální otázky ochrany ovzduší*. V Praze: Karolinum, 2009. ISBN 978-80-246-1598-1.

[5] Letecký předpis L16 – Ochrana životního prostředí – Svazek II – Emise letadlových motorů. In: *Letecká informační služba ŘLP ČR* [online]. Ministerstvo dopravy České republiky, 1. 1. 2019 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-16/L-16ii/data/print/L16-ii_cely.pdf

[6] DALEY, Ben. *Air Transport and the Environment*. Ashgate, 2010. ISBN 978-0-7546-7286-9.

[7] PubChem. *Nitric oxide: Compound summary* [online]. 2021 [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Nitric-oxide

[8] PubChem. *Nitrogen dioxide: Compound summary* [online]. 2021 [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/3032552

[9] PubChem. *Ozone: Compound summary* [online]. 2021 [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Ozone

[10] United States Environmental Protection Agency (EPA). *What is Ozone?* [online]. 2021 [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: https://www.epa.gov/ozone-pollution-and-your-patients-health/what-ozone

[11] European Union Aviation Safety Agency (EASA). *European Aviation Environmental Report 2019* [online]. 2019 [cit. 2022-06-06]. ISBN 978-92-9210-214-2. Dostupné z: https://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/usr_uploaded/219473_EASA_EAER_2019_WEB_LOW-RES.pdf

[12] RILEY, Karie, Rich COOK, Edward CARR a Bryan MANNING. A systematic review of the impact of commercial aircraft activity on air quality near airports. *City and Environment*

Interactions [online]. 2021, 11 [cit. 2021-10-16]. ISSN 2590-2520. Dostupné z: doi:10.1016/j.cacint.2021.100066

[13] PubChem. *Carbon dioxide: Compound summary* [online]. 2021 [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Carbon-dioxide

[14] International Civil Aviation Organization (ICAO). *ICAO Carbon Emissions Calculator Methodology* [online]. 11. verze. 2018 [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: https://www.icao.int/environmental-protection/CarbonOffset/Documents/Methodology%20ICAO%20Carbon%20Calculator_v11-2018.pdf

[15] PubChem. *Sulfur dioxide: Compound summary* [online]. 2021 [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Sulfur-dioxide

[16] HOSPODKA, Jakub a Stanislav PLENINGER. *Vliv letecké dopravy na atmosféru: problematika začlenění leteckých společností do EU ETS*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2015. ISBN 978-80-01-05824-4.

[17] Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 2008/50/ES ze dne 21. května 2008 o kvalitě vnějšího ovzduší a čistším ovzduší pro Evropu. In: *EUR-Lex* [právní informační systém]. Úřad pro publikace Evropské unie [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:02008L0050-20150918&from=EN

[18] Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 2016/2284 ze dne 14. prosince 2016 o snížení národních emisí některých látek znečišťujících ovzduší, o změně směrnice 2003/35/ES a o zrušení směrnice 2001/81/ES. In: *EUR-Lex* [právní informační systém]. Úřad pro publikace Evropské unie [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016L2284&from=en

[19] Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší. In: *Zákony pro lidi* [online]. AION CS, 2010-2022 [cit. 2022-07-24]. Dostupné z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-201

[20] Vyhláška č. 330/2012 Sb., o způsobu posuzování a vyhodnocení úrovně znečištění, rozsahu informování veřejnosti o úrovni znečištění a při smogových situacích. In: *Zákony pro lidi* [online]. AION CS, 2010-2022 [cit. 2022-07-24]. Dostupné z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-330

[21] Směrnice Komise (EU) č. 2015/1480 ze dne 28. srpna 2015, kterou se mění několik příloh směrnice Evropského parlamentu a Rady 2004/107/ES a 2008/50/ES, kterými se stanoví pravidla pro referenční metody, ověřování údajů a umístění míst odběru vzorků při posuzování kvality vnějšího ovzduší. In: *EUR-Lex* [právní informační systém]. Úřad pro publikace Evropské unie [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L1480&from=EN

[22] Vyhláška č. 415/2012 Sb., o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. In: *Zákony pro lidi* [online]. AION CS, 2010-2022 [cit. 2022-07-24]. Dostupné z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-415

[23] ScienceDirect. *Gravimetric Method – an overview* [online]. 2022 [cit. 2022-07-22]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/gravimetric-method

[24] RTI International. *Standard Operating Procedure for Particulate Matter (PM) Gravimetric Analysis* [online]. 8.7.2008 [cit. 2022-07-22]. Dostupné z: https://www3.epa.gov/ttnamti1/files/ambient/pm25/spec/RTIGravMassSOPFINAL.pdf

[25] International Civil Aviation Organization (ICAO). *Doc 9889: Airport Air Quality Manual* [online]. 2nd edition. Montréal: ICAO, 2020 [cit. 2021-04-07]. ISBN 978-92-9258-963-9. Dostupné z: https://www.icao.int/publications/Documents/9889_cons_en.pdf

[26] WINTHER, Morten a Kristin RYPDAL. *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019: 1.A.3.a, 1.A.5.b Aviation* [online]. Lucemburk: Úřad pro publikace Evropské unie, 2019 [cit. 2021-12-12]. Dostupné z: https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-a-aviation/view

[27] International Civil Aviation Organization (ICAO). *Local Air Quality Technology Standards* [online]. 2022 [cit. 2022-07-13]. Dostupné z: https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/LAQ_TechnologyStandards.aspx

[28] FREGNANI, José T. a Bento S. MATTOS. Aviation and Electrical Road Vehicles. In: *16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference* [online]. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2016, 2016-06-13 [cit. 2022-07-28]. ISBN 978-1-62410-440-4. Dostupné z: doi:10.2514/6.2016-3754

[29] FLEUTI, Emanuel, Peter HOFMANN a Caterina TALERICO. *ALAQS project – Airport Local Air Quality, Sensitivity Analysis Zurich Airport 2004* [online]. Curych: EUROCONTROL, 2006 [cit. 2021-10-16]. Dostupné z: https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/library/033_ALAQS_Sensitivity_Analysis_Zurich_Airport_2004.pdf

[30] GOLLNICK, Volker a Dieter SCHMITT. *Air Transport System*. Vídeň: Springer, 2016. ISBN 978-3-7091-1879-5.

[31] PADHRA, Anil. Emissions from auxiliary power units and ground power units during intraday aircraft turnarounds at European airports. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* [online]. 2018, 63, 433-444 [cit. 2021-10-16]. ISSN 1361-9209. Dostupné z: doi:10.1016/j.trd.2018.06.015

[32] Federal Aviation Administration (FAA). *Aviation Emissions and Air Quality Handbook* [online]. 3. verze. FAA Office of Environment and Energy (AEE), 2015 [cit. 2022-07-26]. Dostupné z: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/regulations_policies/policy_guidance/envir_policy/airquality_handbook/Air_Quality_Handbook_Appendices.pdf

[33] KERNER, Libor, Viktor SÝKORA a Ludvík KULČÁK. *Provozní aspekty letišť*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02841-0.

[34] International Civil Aviation Organization (ICAO). *Doc 8643 - Aircraft Type Designators* [online]. 2021 [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: https://www.icao.int/publications/doc8643/pages/search.aspx

[35] Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ). *Informace o kvalitě ovzduší v ČR: Seznam lokalit, kde se měří znečištění ovzduší* [online]. 2021 [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/locality/pollution_locality/loc_ALER_CZ.html

[36] Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ). *Informace o kvalitě ovzduší v ČR: Tabulka měřicího programu* [online]. 2021 [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/locality/pollution_locality/mp_ALERA_CZ.html

[37] EUROCONTROL Aviation Intelligence Unit Portal. *Airport traffic: Daily IFR arrivals and departures by airport* [online]. 2021 [cit. 2021-07-10]. Dostupné z: https://ansperformance.eu/download/xls/Airport_Traffic.xlsx

[38] Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM). *Luchtmeetnet dataset* [online]. 2022 [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: https://data.rivm.nl/data/luchtmeetnet/

[39] Luchtmeetnet.nl. *Meetpunten* [online]. 2022 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: https://www.luchtmeetnet.nl/meetpunten

[40] Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG). *Messdatenportal* [online]. 2021 [cit. 2021-12-02]. Dostupné z: https://www.hlnug.de/messwerte/datenportal

[41] Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG). *Messdatenportal: Frankfurt-Flughafen-Ost* [online]. 2022 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: https://www.hlnug.de/messwerte/datenportal/messstelle/2/4/1901

[42] HUDECOVÁ, Šárka. Matematická statistika – přednáška 6. In: *Katedra pravděpodobnosti a matematické statistiky MFF UK* [online]. 2012 [cit. 2022-07-11]. Dostupné z: https://www2.karlin.mff.cuni.cz/~hudecova/education/archive11/download/chem_predn/predn_slides_06.pdf

[43] Microsoft. *Create a box and whisker chart* [online]. 2022 [cit. 2022-07-11]. Dostupné z: https://support.microsoft.com/en-us/office/create-a-box-and-whisker-chart-62f4219f-db4b-4754-aca8-4743f6190f0d

[44] NAGY, Ivan a Pavla PECHERKOVÁ. *Statistika* [online]. Praha: FD ČVUT [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: https://www.fd.cvut.cz/personal/nagyivan/Statistika/Statistika.pdf

[45] MathWorks. *Wilcoxon rank sum test – MATLAB ranksum* [online]. 2022 [cit. 2022-07-11]. Dostupné z: https://www.mathworks.com/help/stats/ranksum.html

[46] HOFREITER, Milan. *Identifikace systémů I*. Praha: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04228-1.

[47] BARTSCH, Hans-Jochen a Zdeněk TICHÝ. *Matematické vzorce*. Vyd. 4. Praha: Academia, 2006. ISBN 80-200-1448-9.

[48] HOLICKÝ, Milan. *Aplikace teorie pravděpodobnosti a matematické statistiky*. Praha: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 978-80-01-05803-9.

[49] EUROCONTROL Aviation Intelligence Unit Portal. *Taxi-time planning values* [online]. 2021 [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: https://ansperformance.eu/download/xls/Taxi_times_Planning_Data_S14_W20.xlsx

[50] European Union Aviation Safety Agency (EASA). *ICAO Aircraft Engine Emissions Databank* [online]. 2021 [cit. 2021-12-10]. Dostupné z: https://www.easa.europa.eu/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank

[51] Federal Office of Civil Aviation (FOCA). *FOCA Aircraft Piston Engine Database* [online]. 2021 [cit. 2021-12-10]. Dostupné z: https://www.bazl.admin.ch/dam/bazl/en/dokumente/Fachleute/Regulationen_und_Grundlagen/foca_aircraft_piston_engine_database.xlsx.download.xlsx/FOCA_Aircraft_Piston_Engine_Database.xlsx

[52] Federal Office of Civil Aviation (FOCA). *FOCA Helicopter Emissions Table* [online]. 2021 [cit. 2021-12-17]. Dostupné z: https://www.bazl.admin.ch/dam/bazl/en/dokumente/Fachleute/Regulationen_und_Grundlagen/helicopter_emissionstable.xls.download.xls/helicopter_emissionstable.xls

[53] Swedish Defence Research Agency (FOI). *The Environmental Impact of Aircraft* [online]. 2021 [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: https://www.foi.se/en/foi/research/aeronautics-and-space-issues/environmental-impact-of-aircraft.html

[54] FLEUTI, Emanuel. Effects of COVID-19-related air traffic restrictions on local air quality at Zurich airport. *Journal of Airport Management* [online]. Henry Stewart Publications, 2020, 15(1), 59-70

[cit. 2021-09-17]. ISSN 1750-1946. Dostupné z: https://www.flughafen-zuerich.ch/-/jssmedia/airport/portal/dokumente/das-unternehmen/politics-and-responsibility/environmental-protection/technische-berichte/jam0270_airqualitycovid19.pdf?vs=1

[55] NGO, Tuan Hung, Wen Chi PAN a Alexander WAITS. Reduction in Aviation Volume due to COVID-19 and Changes in Air Pollution near the International Airport in Taiwan. *Aerosol and Air Quality Research* [online]. 2022, 22(4) [cit. 2022-08-02]. ISSN 1680-8584. Dostupné z: doi:10.4209/aaqr.210297

[56] XU, Hao, Kai XIAO, Jun PAN, et al. Evidence of aircraft activity impact on local air quality: A study in the context of uncommon airport operation. *Journal of Environmental Sciences* [online]. 2023, 125, 603-615 [cit. 2022-08-02]. ISSN 1001-0742. Dostupné z: doi:10.1016/j.jes.2022.02.039

Seznam použitých obrázků

Obrázek 1: Spojitost mezi koncentracemi vybraných látek a přízemního ozonu [4] 16

Obrázek 2: Ilustrace měřítka velikosti pevných částic (přeloženo z [11]) 17

Obrázek 3: Blokové schéma zařízení měřícího koncentrace NO a NO_2 (přeloženo z [1]) 25

Obrázek 4: Schéma zařízení měřícího koncentrace CO (přeloženo z [1]) 26

Obrázek 5: Schéma zařízení měřícího koncentrace O_3 [4] 27

Obrázek 6: Jednotlivé provozní režimy LTO cyklu pro podzvukové proudové letouny (přeloženo z [28]) 30

Obrázek 7: Emise dle jednotlivých zdrojů pro NO_X (vlevo) a CO (vpravo) na letišti Curych, 2004 (přeloženo z [29]) 32

Obrázek 8: Proces spalování paliva v proudovém motoru (přeloženo z [26]) 32

Obrázek 9: Datový model praktické části bakalářské práce 40

Obrázek 10: Mapa pražského letiště s vyznačenou polohou měřicí stanice ALERA (OpenStreetMap) 42

Obrázek 11: Mapa amsterdamského letiště s vyznačenou polohou měřicí stanice BHS (OpenStreetMap) 44

Obrázek 12: Mapa frankfurtského letiště s vyznačenou polohou měřicí stanice FFO (OpenStreetMap) 45

Obrázek 13: Algoritmus přípravy dat o denních letištních IFR pohybech 46

Obrázek 14: Algoritmus doplnění hodnot pomocí lineární interpolace 47

Obrázek 15: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací CO (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (AMS, 2019-2020) 62

Obrázek 16: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO_X (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (AMS, 2019-2020) 62

Obrázek 17: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (AMS, 2019-2020) 63

Obrázek 18: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO_2 (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (AMS, 2019-2020) 63

Obrázek 19: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací $PM_{2,5}$ (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (AMS, 2019-2020) 63

Obrázek 20: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací PM_{10} (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (AMS, 2019-2020) 64

Obrázek 21: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací CO (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (AMS, únor-květen 2020) 65

Obrázek 22: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO_X (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (AMS, únor-květen 2020) 65

Obrázek 23: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (AMS, únor-květen 2020) 65

Obrázek 24: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO_2 (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (AMS, únor-květen 2020) 66

Obrázek 25: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací $PM_{2,5}$ (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (AMS, únor-květen 2020) 66

Obrázek 26: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací PM_{10} (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (AMS, únor-květen 2020) 66

Obrázek 27: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace CO (AMS, únor-květen 2020) 67

Obrázek 28: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace NO_X (AMS, únor-květen 2020) 68

Obrázek 29: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace NO (AMS, únor-květen 2020) 68

Obrázek 30: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace NO_2 (AMS, únor-květen 2020) 68

Obrázek 31: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace $PM_{2,5}$ (AMS, únor-květen 2020) 69

Obrázek 32: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace PM_{10} (AMS, únor-květen 2020) 69

Obrázek 33: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro CO (AMS) 69

Obrázek 34: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro NO_X (AMS) 70

Obrázek 35: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro NO (AMS) 70

Obrázek 36: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro NO_2 (AMS) 70

Obrázek 37: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro $PM_{2,5}$ (AMS) 70

Obrázek 38: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro PM_{10} (AMS) 71

Obrázek 39: Srovnání denního průběhu koncentrací CO (vlevo) a NO_X (vpravo) pro vybraný vzorek dní z období březen-červenec 2019/2020 (AMS) 71

Obrázek 40: Srovnání denního průběhu koncentrací NO (vlevo) a NO_2 (vpravo) pro vybraný vzorek dní z období březen-červenec 2019/2020 (AMS) 71

Obrázek 41: Srovnání denního průběhu koncentrací $PM_{2,5}$ (vlevo) a PM_{10} (vpravo) pro vybraný vzorek dní z období březen-červenec 2019/2020 (AMS) 72

Obrázek 42: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací CO (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (FRA, 2019-2020) 72

Obrázek 43: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací O_3 (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (FRA, 2019-2020) 73

Obrázek 44: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (FRA, 2019-2020) 73

Obrázek 45: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO_2 (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (FRA, 2019-2020) 73

Obrázek 46: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací $PM_{2,5}$ (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (FRA, 2019-2020) 74

Obrázek 47: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací PM_{10} (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (FRA, 2019-2020) 74

Obrázek 48: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací CO (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (FRA, únor-květen 2020) 75

Obrázek 49: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací O_3 (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (FRA, únor-květen 2020) 75

Obrázek 50: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (FRA, únor-květen 2020) 76

Obrázek 51: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO_2 (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (FRA, únor-květen 2020) 76

Obrázek 52: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací $PM_{2,5}$ (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (FRA, únor-květen 2020) 76

Obrázek 53: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací PM_{10} (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (FRA, únor-květen 2020) 77

Obrázek 54: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace CO (FRA, únor-květen 2020) 78

Obrázek 55: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace O_3 (FRA, únor-květen 2020) 78

Obrázek 56: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace NO (FRA, únor-květen 2020) 78

Obrázek 57: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace NO_2 (FRA, únor-květen 2020) 79

Obrázek 58: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace $PM_{2,5}$ (FRA, únor-květen 2020) 79

Obrázek 59: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace PM_{10} (FRA, únor-květen 2020) 79

Obrázek 60: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro CO (FRA) 80

Obrázek 61: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro O_3 (FRA) 80

Obrázek 62: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro NO (FRA) 80

Obrázek 63: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro NO_2 (FRA) 80

Obrázek 64: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro PM_{10} (FRA) 81

Obrázek 65: Srovnání denního průběhu koncentrací CO (vlevo) a O_3 (vpravo) pro vybraný vzorek dní z období březen-červenec 2019/2020 (FRA) 81

Obrázek 66: Srovnání denního průběhu koncentrací NO (vlevo) a NO_2 (vpravo) pro vybraný vzorek dní z období březen-červenec 2019/2020 (FRA) 81

Obrázek 67: Srovnání denního průběhu koncentrací PM_{10} pro vybraný vzorek dní z období březen-červenec 2019/2020 (FRA) 82

Obrázek 68: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací CO (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, 2019-2020) 82

Obrázek 69: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací O_3 (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, 2019-2020) 83

Obrázek 70: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO_X (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, 2019-2020) 83

Obrázek 71: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, 2019-2020) 83

Obrázek 72: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO_2 (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, 2019-2020) 84

Obrázek 73: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací $PM_{2,5}$ (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, 2019-2020) 84

Obrázek 74: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací PM_{10} (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, 2019-2020) 84

Obrázek 75: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací CO (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, únor-květen 2020)..... 85

Obrázek 76: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací O_3 (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, únor-květen 2020)..... 86

Obrázek 77: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO_X (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, únor-květen 2020)..... 86

Obrázek 78: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, únor-květen 2020)..... 86

Obrázek 79: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací NO_2 (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, únor-květen 2020)..... 87

Obrázek 80: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací $PM_{2,5}$ (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, únor-květen 2020)..... 87

Obrázek 81: Srovnání denního počtu letištních pohybů s příslušnou průměrnou denní koncentrací PM_{10} (vlevo) a příslušný krabicový diagram (vpravo) (PRG, únor-květen 2020)..... 87

Obrázek 82: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace CO (PRG, únor-květen 2020) 88

Obrázek 83: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace O_3 (PRG, únor-květen 2020)..... 89

Obrázek 84: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace NO_X (PRG, únor-květen 2020)..... 89

Obrázek 85: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace NO (PRG, únor-květen 2020) 89

Obrázek 86: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace NO_2 (PRG, únor-květen 2020) 90

Obrázek 87: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace $PM_{2,5}$ (PRG, únor-květen 2020) 90

Obrázek 88: Časový průběh sedmidenního klouzavého průměru počtu denních pohybů a sedmidenního klouzavého průměru denní průměrné koncentrace PM_{10} (PRG, únor-květen 2020) 90

Obrázek 89: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro CO (PRG) 91

Obrázek 90: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro O_3 (PRG) 91

Obrázek 91: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro NO_X (PRG) 91

Obrázek 92: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro NO (PRG) 92

Obrázek 93: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro NO_2 (PRG) 92

Obrázek 94: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro $PM_{2,5}$ (PRG) 92

Obrázek 95: Časový průběh indexů MSDP a MSDPK pro PM_{10} (PRG) 92

Obrázek 96: Srovnání denního průběhu koncentrací NO_X (vlevo) a NO (vpravo) pro vybraný vzorek dní z období březen-červenec 2019/2020 (PRG) 93

Obrázek 97: Srovnání denního průběhu koncentrací NO_2 (vlevo) a $PM_{2,5}$ (vpravo) pro vybraný vzorek dní z období březen-červenec 2019/2020 (PRG) 93

Obrázek 98: Srovnání denního průběhu koncentrací PM_{10} pro vybraný vzorek dní z období březen-červenec 2019/2020 (PRG) 93

Obrázek 99: Srovnání součtu vypočítaných emisí CO za posledních τ hodin a průměrné naměřené koncentrace za odpovídající časové období pro τ=1 (a), τ=2 (b), τ=4 (c), τ=8 (d), τ=16 (e) a τ=24 (f) (za období únor-květen 2020) 94

Obrázek 100: Srovnání součtu vypočítaných emisí NO_X za posledních τ hodin a průměrné naměřené koncentrace za odpovídající časové období pro τ=1 (a), τ=2 (b), τ=4 (c), τ=8 (d), τ=16 (e) a τ=24 (f) (za období únor-květen 2020) 95

Obrázek 101: Srovnání průběhu hodnot korelačního koeficientu R lineární regrese v závislosti na zvolené hodnotě časového parametru τ pro CO (vlevo) a NO_X (vpravo) (za období únor-květen 2020) 96

Obrázek 102: Srovnání denních vypočítaných emisí NO_X a průměrné koncentrace NO_X za daný den (vlevo) a denních vypočítaných emisí CO a průměrné koncentrace CO za daný den (vpravo) (srpen 2019-prosinec 2020) 96

Obrázek 103: Srovnání denních vypočítaných emisí NO_X a průměrné koncentrace NO_X za daný den (vlevo) a denních vypočítaných emisí CO a průměrné koncentrace CO za daný den (vpravo) (únor-květen 2020) 97

Obrázek 104: Časový průběh týdenních vypočítaných emisí NO_X a průměrných naměřených koncentrací NO_X za daný týden (vlevo) a následné srovnání hodnot těchto veličin (vpravo) (srpen 2019-prosinec 2020) 97

Obrázek 105: Časový průběh týdenních vypočítaných emisí CO a průměrných naměřených koncentrací CO za daný týden (vlevo) a následné srovnání hodnot těchto veličin (vpravo) (srpen 2019-prosinec 2020) 97

Seznam použitých tabulek

Tabulka 1: Účinky expozice CO v závislosti na jeho koncentraci [3] [1] 12

Tabulka 2: Mezní hodnoty koncentrací zkoumaných látek v ovzduší v rámci EU [17] 21

Tabulka 3: Přehled referenčních metod měření koncentrací vybraných látek v ovzduší v rámci EU [17] 21

Tabulka 4: Přehled provozních režimů LTO cyklu pro podzvukové proudové letouny [25] 30

Tabulka 5: Přehled emisí vybraných látek pro provoz APU dle doletu letadla [25] 34

Tabulka 6: Ukázka dat naměřených stanicí ALERA 43

Tabulka 7: Ukázka dat o denních letištních IFR pohybech od EUROCONTROL [37] 43

Tabulka 8: Stupnice pro slovní interpretaci hodnoty korelačního koeficientu R [48] 53

Tabulka 9: Provozní režimy modifikovaného LTO cyklu 54

Tabulka 10: Přehled použitých časů taxi-in/taxi-out pro LKPR [49] 54

Tabulka 11: Dostupné hodnoty LTO emisí a spotřeby paliva pro vybrané zástupce turbovrtulových motorů [25] . 56

Tabulka 12: Přehled provozních režimů LTO cyklu pro turbovrtulové letouny dle FOI [53] 56

Tabulka 13: Výsledky zpětného výpočtu hodnot palivových toků 58

Tabulka 14: Zpětně spočítané emisní indexy pro CO pro všechny provozní režimy pro turbovrtulové motory 60

Tabulka 15: Zpětně spočítané emisní indexy pro NOX pro všechny provozní režimy pro turbovrtulové motory 60

Tabulka 16: Přehled hodnot TIM pro jednotlivé druhy motorů 60

Tabulka 17: Výsledky testování hypotéz o meziročním poklesu hodnot denních průměrných koncentrací jednotlivých látek (AMS, 2019-2020) 64

Tabulka 18: Výsledky testování hypotéz o poklesu hodnot denních průměrných koncentrací jednotlivých látek (AMS, únor-březen/duben-květen 2020) 67

Tabulka 19: Výsledky testování hypotéz o meziročním poklesu hodnot denních průměrných koncentrací jednotlivých látek (FRA, 2019-2020) 74

Tabulka 20: Výsledky testování hypotéz o poklesu hodnot denních průměrných koncentrací jednotlivých látek (FRA, únor-březen/duben-květen 2020) 77

Tabulka 21: Výsledky testování hypotéz o meziročním poklesu hodnot denních průměrných koncentrací jednotlivých látek (PRG, 2019-2020) 85

Tabulka 22: Výsledky testování hypotéz o poklesu hodnot denních průměrných koncentrací jednotlivých látek (PRG, únor-březen/duben-květen 2020) 88

Přílohy

Příloha č. 1: Seznam typů zahrnutých do LTO emisního modelu

Vysvětlivky:

J	Proudový motor
TP	Turbovrtulový motor
P	Pístový motor
H	Vrtulník

Typ	ICAO identifikátor	Druh pohonu	Počet motorů	Četnost výskytu	Podíl
BOEING 737-800	B738	J	2	58 735	29,29 %
AIRBUS A320	A320	J	2	29 313	14,62 %
AIRBUS A319	A319	J	2	15 994	7,98 %
ATR 72-200	AT72	TP	2	13 271	6,62 %
AIRBUS A321	A321	J	2	8 709	4,34 %
DE HAVILLAND DHC-8-400	DH8D	TP	2	7 393	3,69 %
BOEING 737-700	B737	J	2	6 837	3,41 %
EMBRAER ERJ-190	E190	J	2	5 724	2,85 %
AIRBUS A320NEO	A20N	J	2	4 145	2,07 %
BOEING 737-900	B739	J	2	4 026	2,01 %
CANADAIR CRJ-900	CRJ9	J	2	2 513	1,25 %
BOEING 737-400	B734	J	2	2 508	1,25 %
BEECH 400 Beechjet	BE40	J	2	2 241	1,12 %
BOEING 757-200	B752	J	2	2 030	1,01 %
CESSNA 560XL Citation Excel	C56X	J	2	1 992	0,99 %
AIRBUS A330-200	A332	J	2	1 866	0,93 %
CESSNA 510 Citation Mustang	C510	J	2	1 837	0,92 %
Bombardier (Airbus) CS300 (A220-300)	BCS3	J	2	1 820	0,91 %
PILATUS PC-12	PC12	TP	1	1 798	0,90 %
CESSNA 680 Citation Sovereign	C680	J	2	1 770	0,88 %
CESSNA 500 Citation	C500	J	2	1 384	0,69 %
AIRBUS A330-300	A333	J	2	1 375	0,69 %
EMBRAER ERJ-135	E135	J	2	1 182	0,59 %
EMBRAER ERJ-170	E170	J	2	1 070	0,53 %
BOEING 787-8	B788	J	2	1 008	0,50 %
BOEING 737 MAX8	B38M	J	2	922	0,46 %
GULFSTREAM Gulfstream 5	GLF5	J	2	917	0,46 %
AIRBUS A380-800	A388	J	4	889	0,44 %
BOEING 737-300	B733	J	2	888	0,44 %
CANADAIR CRJ-1000	CRJX	J	2	779	0,39 %
BOEING 737-500	B735	J	2	692	0,35 %

PIPER PA-46-500TP Malibu Meridian	P46T	TP	1	603	0,30 %
CIRRUS SR-22	SR22	P	1	536	0,27 %
GULFSTREAM G200	GALX	J	2	529	0,26 %
BOEING 777-300	B773	J	2	516	0,26 %
AIRBUS A318	A318	J	2	444	0,22 %
AIRBUS A321NEO	A21N	J	2	424	0,21 %
BOEING 767-300	B763	J	2	411	0,20 %
EMBRAER ERJ-195	E195	J	2	408	0,20 %
BEECH King Air 350	B350	TP	2	404	0,20 %
BOEING 717-200	B712	J	2	396	0,20 %
BOEING 767-400	B764	J	2	358	0,18 %
BOMBARDIER Challenger 300	CL30	J	2	327	0,16 %
GULFSTREAM G280	G280	J	2	324	0,16 %
EMBRAER EMB-505 Phenom 300	E55P	J	2	303	0,15 %
BOMBARDIER Challenger 600	CL60	J	2	291	0,15 %
DASSAULT Falcon 7X	FA7X	J	3	280	0,14 %
EMBRAER ERJ-170-200 Short Wing	E75S	J	2	268	0,13 %
BELL Bell 429 GlobalRanger	B429	H	2	267	0,13 %
BOMBARDIER Global 6000	GL6T	J	2	253	0,13 %
SUKHOI Superjet 100-95	SU95	J	2	246	0,12 %
GULFSTREAM G650	GLF6	J	2	231	0,12 %
BRITISH AEROSPACE BAe-125	H25B	J	2	223	0,11 %
Bombardier (Airbus) CS100 (A220-100)	BCS1	J	2	214	0,11 %
DASSAULT Falcon 2000	F2TH	J	2	211	0,11 %
BOEING 787-9	B789	J	2	202	0,10 %
BOMBARDIER BD-700 Global Express	GLEX	J	2	196	0,10 %
EMBRAER ERJ-170-200 Long Wing	E75L	J	2	194	0,10 %
BOEING 747-8	B748	J	4	194	0,10 %
CANADAIR CRJ-700	CRJ7	J	2	192	0,10 %
CESSNA 550 Citation S2	C550	J	2	173	0,09 %
ATR 42-300	AT43	TP	2	172	0,09 %
DASSAULT Falcon 900	F900	J	3	169	0,08 %
HONDA HA-420 HondaJet	HDJT	J	2	154	0,08 %
BEECH Beech 58 Baron	BE58	P	2	150	0,07 %
CESSNA C172	C172	P	1	144	0,07 %
HAWKER BEECHCRAFT 390 Premier 1	PRM1	J	2	128	0,06 %
AIRBUS A310	A310	J	2	124	0,06 %
EUROCOPTER EC-120	EC20	H	1	123	0,06 %
DIAMOND DA-42	DA42	P	2	117	0,06 %
GULFSTREAM Gulfstream 4	GLF4	J	2	108	0,05 %
PIPER PA-46-310P Malibu	PA46	P	1	108	0,05 %
BEECH Beech 99 Airliner	BE99	TP	2	106	0,05 %
BELL Bell 407	B407	H	1	106	0,05 %

LEARJET Learjet 45	LJ45	J	2	98	0,05 %
CESSNA Citation CJ2	C25A	J	2	97	0,05 %
CANADAIR CRJ-200	CRJ2	J	2	94	0,05 %
BOEING 737-600	B736	J	2	92	0,05 %
CESSNA Citation CJ3	C25B	J	2	91	0,05 %
ZLIN Z-143	Z43	P	1	89	0,04 %
BEECH 200 Super King Air	BE20	TP	2	89	0,04 %
PILATUS PC-24	PC24	J	2	89	0,04 %
CESSNA C208	C208	TP	1	88	0,04 %
AIRBUS A350-900	A359	J	2	82	0,04 %
MCDONNELL DOUGLAS MD-82	MD82	J	2	77	0,04 %
BELL 505 Jet Ranger X	B505	H	1	77	0,04 %
FOKKER F100	F100	J	2	76	0,04 %
BOEING 777-200	B772	J	2	76	0,04 %
BOEING 747-400	B744	J	4	74	0,04 %
SIKORSKY UH-60 Black Hawk	H60	H	2	73	0,04 %
BELL 427	B427	H	2	73	0,04 %
AIRCRAFT INDUSTRIES L-410	L410	TP	2	73	0,04 %
LEARJET Learjet 60	LJ60	J	2	62	0,03 %
				198 525	**99,00 %**

Příloha č. 2: Použité emisní a palivové charakteristiky letounů

Vysvětlivky:

EI	Emisní index
T/O	Vzlet
C/O	Stoupání
App	Přiblížení
Idle	Volnoběh

Typ	CO EI (g/kg)				NO_x EI (g/kg)				Palivový tok (kg/s)			
	T/O	C/O	App	Idle	T/O	C/O	App	Idle	T/O	C/O	App	Idle
A20N	0,264	0,335	3,880	23,268	26,709	15,795	9,624	4,894	0,824	0,684	0,237	0,085
A21N	0,260	0,250	2,512	20,592	39,169	25,454	10,508	5,443	1,036	0,849	0,280	0,099
A310	0,444	0,484	2,041	18,939	30,267	24,803	11,141	4,339	2,213	1,823	0,638	0,197
A318	0,433	0,478	4,305	32,873	17,928	14,450	7,263	3,588	1,012	0,830	0,292	0,102
A319	0,336	0,366	3,500	27,658	21,284	17,784	8,574	4,234	1,003	0,833	0,300	0,106
A320	0,427	0,457	2,613	19,252	25,988	21,638	9,548	4,695	1,063	0,884	0,314	0,118
A321	0,457	0,343	2,092	20,099	31,124	23,626	9,838	4,764	1,384	1,109	0,368	0,121
A332	0,203	0,253	1,590	24,398	35,227	25,652	11,348	4,705	2,950	2,385	0,781	0,243
A333	0,220	0,274	1,761	23,883	33,405	24,684	11,261	4,710	2,910	2,361	0,779	0,245
A359	0,381	0,400	1,230	19,459	46,930	35,469	11,675	4,585	2,832	2,303	0,797	0,285
A388	0,250	0,237	1,177	19,987	39,933	30,383	12,407	5,397	2,638	2,179	0,722	0,249
AT43	0,419	0,415	3,492	26,547	20,696	15,304	7,047	3,137	0,533	0,439	0,150	0,053
AT72	0,419	0,415	3,492	26,547	20,696	15,304	7,047	3,137	0,533	0,439	0,150	0,053
B350	0,395	0,391	3,292	25,027	16,653	12,314	5,670	2,524	0,546	0,449	0,154	0,054
B38M	0,166	0,146	1,240	15,048	47,420	21,768	11,114	4,642	0,968	0,791	0,263	0,093
B712	0,730	0,635	3,640	18,785	24,445	18,240	8,990	4,115	0,908	0,746	0,256	0,103
B733	0,900	0,917	3,433	30,433	19,267	16,667	8,700	4,100	1,052	0,875	0,313	0,119
B734	0,900	0,900	3,250	28,450	20,050	17,250	8,900	4,200	1,105	0,916	0,325	0,122
B735	0,900	0,925	3,450	30,600	19,200	16,650	8,700	4,100	1,050	0,873	0,313	0,119
B736	0,160	0,227	4,917	42,617	15,940	13,723	8,043	3,800	0,914	0,760	0,272	0,095
B737	0,173	0,178	3,990	36,715	18,433	15,213	8,470	4,028	1,050	0,865	0,300	0,101
B738	0,230	0,160	3,190	31,680	21,553	16,857	8,873	4,240	1,197	0,971	0,327	0,107
B739	0,230	0,160	3,190	31,680	21,553	16,857	8,873	4,240	1,197	0,971	0,327	0,107
B744	0,510	0,307	1,583	23,937	42,927	31,350	11,723	4,490	2,713	2,152	0,708	0,225
B748	0,137	0,243	2,280	17,393	32,203	18,993	10,090	4,593	2,452	2,011	0,681	0,217
B752	0,310	0,325	2,130	20,220	28,160	21,860	9,323	4,363	1,811	1,473	0,506	0,170
B763	0,510	0,307	1,617	24,260	42,527	31,113	11,687	4,457	2,683	2,133	0,703	0,224
B764	0,320	0,260	1,810	29,650	30,605	23,410	12,295	4,185	2,654	2,116	0,702	0,208
B772	0,280	0,286	1,290	23,824	45,614	34,946	12,769	4,744	3,357	2,697	0,889	0,297
B773	0,192	0,186	1,853	29,528	48,339	36,057	14,997	5,457	4,136	3,271	1,006	0,319
B788	0,390	0,405	0,693	7,117	55,455	40,827	14,083	5,785	2,589	2,112	0,691	0,254
B789	0,389	0,401	0,678	7,047	56,023	41,115	14,121	5,795	2,604	2,123	0,694	0,255
BCS1	0,000	0,000	2,380	18,680	23,160	18,760	10,160	5,700	0,716	0,596	0,214	0,074

BCS3	0,000	0,000	2,380	18,680	23,160	18,760	10,160	5,700	0,716	0,596	0,214	0,074
BE20	1,424	1,410	11,867	90,221	9,409	6,958	3,204	1,426	0,200	0,164	0,056	0,020
BE40	0,000	1,150	38,600	119,200	11,130	10,080	4,930	1,660	0,205	0,173	0,066	0,030
BE58	911,5	963,5	1170,5	791,000	4,000	4,000	1,500	1,500	0,023	0,021	0,012	0,005
BE99	1,424	1,410	11,867	90,221	9,409	6,958	3,204	1,426	0,200	0,164	0,056	0,020
C172	1047,0	1062,5	1019,0	872,000	3,850	3,950	10,200	1,800	0,012	0,009	0,006	0,001
C208	1,424	1,410	11,867	90,221	9,409	6,958	3,204	1,426	0,200	0,164	0,056	0,020
C25A	1,130	1,620	15,560	47,700	19,150	16,020	6,920	3,720	0,225	0,186	0,072	0,026
C25B	1,130	1,620	15,560	47,700	19,150	16,020	6,920	3,720	0,225	0,186	0,072	0,026
C500	2,650	3,500	40,500	132,000	7,600	6,770	3,440	1,750	0,148	0,124	0,051	0,023
C510	1,130	1,620	15,560	47,700	19,150	16,020	6,920	3,720	0,225	0,186	0,072	0,026
C550	2,100	3,180	32,000	97,000	9,230	8,560	5,290	2,630	0,170	0,143	0,059	0,026
C56X	1,130	1,620	15,560	47,700	19,150	16,020	6,920	3,720	0,225	0,186	0,072	0,026
C680	2,270	2,510	7,110	36,350	20,080	19,260	11,870	4,260	0,317	0,264	0,097	0,042
CL30	0,560	0,630	6,280	33,240	17,900	16,170	8,810	3,910	0,347	0,288	0,104	0,048
CL60	0,000	0,000	1,893	44,263	11,500	9,987	6,783	3,787	0,404	0,332	0,118	0,049
CRJ2	0,000	0,000	1,880	47,590	11,280	9,680	6,630	3,720	0,399	0,329	0,116	0,049
CRJ7	0,610	0,573	4,450	19,167	14,133	12,210	10,340	4,377	0,621	0,502	0,173	0,066
CRJ9	0,640	0,570	4,240	18,250	14,690	12,600	10,750	4,600	0,648	0,530	0,179	0,064
CRJX	0,685	0,570	4,110	17,575	15,450	12,985	10,965	4,675	0,678	0,553	0,186	0,066
DA42	7,000	7,000	16,0	24,000	17,000	19,000	23,000	14,000	0,006	0,005	0,003	0,000
DH8D	0,419	0,415	3,492	26,547	20,696	15,304	7,047	3,137	0,533	0,439	0,150	0,053
E135	0,500	0,500	7,620	38,470	15,420	13,490	6,930	4,270	0,359	0,300	0,108	0,045
E170	0,675	0,570	4,140	17,730	15,290	12,900	10,915	4,655	0,672	0,548	0,184	0,065
E190	0,641	0,491	3,970	46,783	19,127	15,917	7,940	3,613	0,821	0,679	0,230	0,086
E195	0,641	0,491	3,970	46,783	19,127	15,917	7,940	3,613	0,821	0,679	0,230	0,086
E55P	1,130	1,620	15,560	47,700	19,150	16,020	6,920	3,720	0,225	0,186	0,072	0,026
E75L	0,675	0,570	4,140	17,730	15,290	12,900	10,915	4,655	0,672	0,548	0,184	0,065
E75S	0,675	0,570	4,140	17,730	15,290	12,900	10,915	4,655	0,672	0,548	0,184	0,065
F100	1,220	1,405	5,220	28,935	20,455	16,635	5,125	2,100	0,817	0,673	0,242	0,115
F2TH	0,500	0,570	4,180	37,050	19,100	14,960	6,800	3,530	0,370	0,307	0,116	0,049
F900	1,130	1,620	15,560	47,700	19,150	16,020	6,920	3,720	0,225	0,186	0,072	0,026
FA7X	0,270	0,230	3,230	36,920	18,280	15,580	8,770	2,860	0,327	0,272	0,102	0,044
G280	0,570	0,600	6,070	30,480	18,430	16,440	8,960	3,965	0,372	0,308	0,107	0,049
GALX	2,270	2,510	7,110	36,350	20,080	19,260	11,870	4,260	0,317	0,264	0,097	0,042
GL6T	1,040	0,930	4,810	28,000	18,730	15,030	7,670	4,670	0,714	0,595	0,214	0,089
GLEX	1,040	0,930	4,810	28,000	18,730	15,030	7,670	4,670	0,714	0,595	0,214	0,089
GLF4	0,700	0,800	3,900	24,100	21,100	16,800	5,700	2,500	0,760	0,630	0,230	0,110
GLF5	1,040	0,930	4,780	27,820	18,790	15,070	7,680	4,690	0,713	0,594	0,214	0,089
GLF6	0,400	0,320	5,930	41,900	16,920	13,320	7,810	3,380	0,789	0,650	0,221	0,085
H25B	1,130	1,620	15,560	47,700	19,150	16,020	6,920	3,720	0,225	0,186	0,072	0,026
HDJT	1,130	1,620	15,560	47,700	19,150	16,020	6,920	3,720	0,225	0,186	0,072	0,026
L410	1,424	1,410	11,867	90,221	9,409	6,958	3,204	1,426	0,200	0,164	0,056	0,020
LJ45	1,130	1,620	15,560	47,700	19,150	16,020	6,920	3,720	0,225	0,186	0,072	0,026
LJ60	2,270	2,510	7,110	36,350	20,080	19,260	11,870	4,260	0,317	0,264	0,097	0,042

MD82	0,420	0,480	3,665	16,600	17,015	13,280	7,655	4,310	1,301	1,062	0,373	0,137
P46T	1,424	1,410	11,867	90,221	9,409	6,958	3,204	1,426	0,200	0,164	0,056	0,020
PA46	1005,0	1140,0	1286,0	459,0	2,000	2,000	1,000	3,000	0,027	0,023	0,014	0,006
PC12	0,395	0,391	3,292	25,027	16,653	12,314	5,670	2,524	0,546	0,449	0,154	0,054
PC24	1,130	1,620	15,560	47,700	19,150	16,020	6,920	3,720	0,225	0,186	0,072	0,026
PRM1	1,130	1,620	15,560	47,700	19,150	16,020	6,920	3,720	0,225	0,186	0,072	0,026
SR22	818,0	787,0	1055,0	1123,0	6,000	6,000	2,000	0,000	0,018	0,018	0,010	0,004
SU95	0,280	0,330	4,870	28,455	16,865	14,205	7,190	3,775	0,816	0,672	0,233	0,099
Z43	1010,0	978,0	819,0	1000,0	3,000	3,000	6,000	1,000	0,017	0,015	0,007	0,003

Příloha č. 3: Použité emisní a palivové charakteristiky vrtulníků

Vysvětlivky:

EI	Emisní index
GI-D	Volnoběh na zemi před vzletem
T/O	Vzlet
App	Přiblížení
GI-A	Volnoběh na zemi po přistání

Typ	CO EI (g/kg)				NO_x EI (g/kg)				Palivový tok (kg/s)			
	GI-D	T/O	App	GI-A	GI-D	T/O	App	GI-A	GI-D	T/O	App	GI-A
B407	35,077	4,984	10,112	81,738	2,845	7,717	5,374	1,846	0,019	0,044	0,031	0,013
B427	81,738	5,627	12,500	118,748	1,846	7,253	4,822	1,525	0,013	0,041	0,029	0,012
B429	81,738	5,627	12,500	118,748	1,846	7,253	4,822	1,525	0,013	0,041	0,029	0,012
B505	55,204	7,844	15,914	128,638	2,256	6,120	4,262	1,464	0,016	0,033	0,025	0,011
EC20	55,204	7,844	15,914	128,638	2,256	6,120	4,262	1,464	0,016	0,033	0,025	0,011
H60	35,149	2,455	5,482	43,033	2,842	11,087	7,351	2,562	0,023	0,073	0,050	0,021