

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 8: Ochrana a tvorba životního prostředí

Charakteristika atmosférického aerosolu na české pozad'ové stanici v šestiletém časovém rozlišení

**Vít Novotný
Středočeský kraj**

Mělník 2021

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 8: Ochrana a tvorba životního prostředí

**Charakteristika atmosférického aerosolu na české
pozad'ové stanici v šestiletém časovém rozlišení**

**Characteristics of atmospheric aerosol on a Czech
background station over a six-year period**

Autor: Vít Novotný

Škola: Gymnázium Jana Palacha Mělník, Pod Vrchem 3421, 276 01
Mělník

Kraj: Středočeský kraj

Konzultant: Mgr. Radek Lhotka (Ústav chemických procesů AV ČR)

Vedoucí práce: Mgr. Lenka Pořízková

Mělník 2021

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracoval samostatně a použil jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupnění této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů.

V Mělníku dne 3. 2. 2021



.....
Vít Novotný

Poděkování

Děkuji Radku Lhotkovi, bez něhož by tato práce nikdy nevznikla. Po celou dobu mi poskytoval pomoc při psaní textu a práci se softwarem, provedl mě technickým zázemím košetické observatoře i Ústavu chemických procesů AV ČR... Trpělivě mě vedl k samostatné práci a obecně k principům vědeckého smýšlení. Jeho přátelský a vstřícný přístup mě však ovlivnil daleko za hranici vědecké práce.

Děkuji také ostatním zaměstnancům Ústavu chemických procesů AV ČR i košetické observatoře, u nichž jsem se bez výjimky setkal s podporou a otevřeností.

Tuto práci podpořilo Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy České republiky v rámci grantů ACTRIS-CZ LM2015037 a ACTRIS-CZ RI (CZ.02.1.01 / 0.0 / 0.0 / 16_013 / 0001315).

Anotace

Tato práce popisuje kvantitativní a kvalitativní vlastnosti atmosférického aerosolu (AA) na české venkovské pozadové stanici. Hlavním cílem prováděné analýzy bylo popsat vliv lidské činnosti na vlastnosti AA a odhadnout jeho zdroje v lokálním i evropském měřítku. Analýza byla provedena na základě 6leté měřicí kampaně provedené na Národní atmosférické observatoři Košetice (NAOK) mezi lety 2013 až 2018. Klíčovou částí hodnocení bylo sledování koncentrací uhlíkatého aerosolu (TC) a jeho další rozdělení na organický uhlík (OC) a elementární uhlík (EC). Základem analýzy bylo rozčlenění datového souboru na jednotlivá roční období a na studené a teplé poloviny roku, byl vypočten statistický vývoj jednotlivých veličin i poměry mezi jednotlivými veličinami a korelační koeficienty mezi nimi. K určování zdrojů jednotlivých veličin byly využity funkce Potential Source Contribution Function (PSCF) a Conditional Bivariate Probability Function (CBPF). Z výsledků obou funkcí je zřejmé, že NAOK je výrazně ovlivněna dálkovým transportem. Výsledky dále ukazují, že hlavní vliv na kvantitu i kvalitu AA má lidská činnost, zejména domácí vytápění. Tato práce se podílí na udržení dlouhodobé kontinuity zpracování dat na NAOK.

Klíčová slova

Atmosférický aerosol (AA); celkový uhlík (TC); elementární uhlík (EC); organický uhlík (OC)

Abstract

This paper describes the quantitative and qualitative properties of atmospheric aerosol (AA) at the Czech rural background station. The main purpose of the analysis was to describe the effects of human activities on the properties of AA and the estimation of its sources on a local and European scale. The analysis was performed on the basis of a 6-year measurement campaign undertaken at the National Atmospheric Observatory Košetice (NAOK) between 2013 and 2018. The key part of the evaluation was the monitoring of carbon aerosol (TC) concentrations and its further division into organic carbon (OC) and elemental carbon (EC). The basis of the analysis was the division of the data set into individual year's seasons and into cold and warm six-month periods of each year, the statistical development of individual quantities and the ratios between individual quantities were counted, as well as the correlation coefficients between them. The Potential Source Contribution Function (PSCF) and Conditional Bivariate Probability Function (CBPF) were used to determine the sources of individual quantities. The results of both functions indicate that NAOK is affected by long-distance transport. The results also show that the main influence on the quantity and quality of AA has human activity, especially domestic heating. This paper contributes to maintaining long-term continuous data processing at NAOK.

Keywords

Atmospheric aerosol (AA); total carbon (TC); elementary carbon (EC); organic carbon (OC)

Obsah

Úvod.....	8
1 Teoretická část.....	9
1.1 Atmosférický aerosol	9
1.1.1 Cyklus a chemické složení AA	10
1.1.2 Nukleační děje v atmosféře.....	12
1.1.3 Přírodní a městský AA.....	14
1.1.4 EC a OC	17
1.2 Vliv AA na klima a zdraví	18
1.2.1 Vliv AA na zemský systém	18
1.2.2 Vliv AA na lidské zdraví	19
2 Praktická část.....	21
2.1 Metody měření	21
2.1.1 Měření koncentrace PM ₁₀ a PM _{2,5} ; aerosolový spektrometr	22
2.1.2 APS (Aerodynamic Particle Sizer)	23
2.1.3 Analýza uhlíkatých aerosolů.....	24
2.1.4 Metody PSCF a CBPF	26
2.1.5 Zpracování datového souboru.....	27
2.2 Výsledky a diskuze	30
2.2.1 Charakteristika v rozlišení jednotlivých let	30
2.2.2 Charakteristika v rozlišení studených a teplých polovin roku.....	34
2.2.3 Charakteristika v rozlišení ročních období	41
2.2.4 Charakteristika denních trendů	52
2.2.5 Charakteristika týdenních trendů	59
2.2.6 Analýza metodami PSCF a CBPF	63
Závěr	70
Použitá literatura	71
Tištěné zdroje	71
Elektronické zdroje	72
Seznam obrázků a tabulek	75
Seznam příloh	78

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

AA – atmosférický aerosol

APS – Aerodynamic Particle Sizer (aerodynamický spektrometr částic)

BC – Black Carbon (černý uhlík)

CBPF – Conditional Bivariate Probability Function (podmíněná bivarietní pravděpodobnostní funkce)

CPC – Condensation Particle Counter (kondenzační čítač částic)

DMA – Differential Mobility Analyzer (diferenciální analyzátor pohyblivosti částic)

EC – Elementary Carbon (elementární uhlík)

GDAS – Global Data Assimilation System

HYSPLIT – Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory

NAOK – Národní atmosférická observatoř Košetice

NDIR – Nondispersive Infrared Sensor (nedisperzní infračervený senzor)

OC – Organic Carbon (organický uhlík)

PAH – Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (polycyklické aromatické uhlovodíky)

PC – Pyrolysed Carbon (pyrolyzovaný uhlík)

PM – Particulate Matter (pevné částice)

PSCF – Potential Source Contribution Function (funkce potenciálního příspěvku zdroje)

r – korelační koeficient
SMPS – Scanning Mobility Particle Sizer (aerosolový spektrometr)

T – teplota vzduchu

TC – Total Carbon (celkový uhlík)

VOC – Volatile Organic Compound (volatilní organická látka)

W_d – směr větru

W_s – rychlost větru

ÚVOD

Atmosférický aerosol je složkou atmosféry, která má navzdory svému relativně nízkému zastoupení ve vzduchu důležitý vliv na globální i lokální klima stejně jako na lidské zdraví, proto je mu věnována stále větší pozornost (Hinds, 1999, s. 3; Moldan, 2015, s. 262). Osobně však vnímám tematiku aerosolu méně diskutovanou oproti jiným environmentálním problémům souvisejícím s globální změnou klimatu, např. vůči emisím skleníkových plynů, ačkoliv vliv aerosolu na zemské klima je se skleníkovými plyny srovnatelný (Hinds, 1999, s. 312). Vliv aerosolu na lidské zdraví je rovněž velmi důležitý, o čemž svědčí např. smogová katastrofa, která zasáhla Londýn v roce 1952 a zapříčinila až 4000 úmrtí (Wilkins, 1954, s. 1). V teoretické části práce si proto kladu za hlavní cíl shrnout podle již publikované literatury informace o chemických a fyzikálních vlastnostech aerosolu, o procesech jeho vzniku a odstranění z atmosféry a o jeho vlivu na klima a zdraví.

Na teoretické informaci navazuji v praktické části, jež je založena na analýze dat z 6leté měřicí kampaně (2013-18) na venkovské pozad'ové stanici¹ Košetice. Cílem praktické části je popsat kvalitativní i kvantitativní vlastnosti pozorovaného aerosolu a odhadnout jeho zdroje v lokálním i evropském měřítku. Hlavní sledovanou veličinou byla koncentrace uhlíkatého aerosolu, který byl dále rozlišen na organický a elementární uhlík. Toto rozlišení je používáno (např. Mbengue et al., 2018), neboť umožňuje sledovat příspěvek lidské činnosti. Souběžně byly popisovány i hmotnostní a početní koncentrace aerosolu, stejně rychlosti a směry větru. Analýza byla provedena rozčleněním datového souboru na jednotlivá roční období a na studené a teplé poloviny roku, vypočtením statistických trendů sledovaných veličin a jejich vzájemných poměrů, byly vyčísleny korelační koeficienty mezi těmito veličinami. Dálkový transport byl odvozen pomocí funkcí Potential Source Contribution Function (PSCF) a Conditional Bivariate Probability Function (CBPF).

Díličí výsledky byly v průběhu praktické části práce porovnávány s prací *Four Years of Highly Time Resolved Measurements of Elemental and Organic Carbon at a Rural Background Site in Central Europe* (Mbengue et al., 2018), která rovněž zpracovává data z košetické observatoře mezi lety 2013-16. Data z let 2017 a 2018 však nebyla doposud obdobně vyhodnocena. Cílem praktické části je tedy přispět ke kontinuitě zpracování dat z košetické atmosférické observatoře.

¹ Stanice v málo obydlené oblasti vzdálená od lokálních zdrojů emisí.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Atmosférický aerosol

Atmosférický aerosol (AA) je dvoufázový systém skládající se z částic v kapalném či pevném skupenství suspendovaných v plynu. Rozmezí, v němž se velikost těchto částic pohybuje, je velmi široké, poloměr nabývá hodnot od 1 nm až po 20 μm (Hinds, 1999, s. 1; Moldan, 2015, s. 253).² Není proto účelné sledovat jednotlivé částice, nýbrž jsou popisovány skupiny částic se společnými charakteristikami. Základem je rozlišení na jemný a hrubý AA s hranicí 2,5 μm (Braniš, Hůnová et al., 2009, s. 131), pro podrobnější klasifikaci jsou definovány užší skupiny, tzv. módy (blíže popsane v 1.1.1).

Podle zdroje můžeme AA rozdělit na přírodní a antropogenní. Přírodní aerosol dominuje na pozadových lokalitách bez lidského vlivu, oproti tomu antropogenní aerosol vzniká lidskou činností.

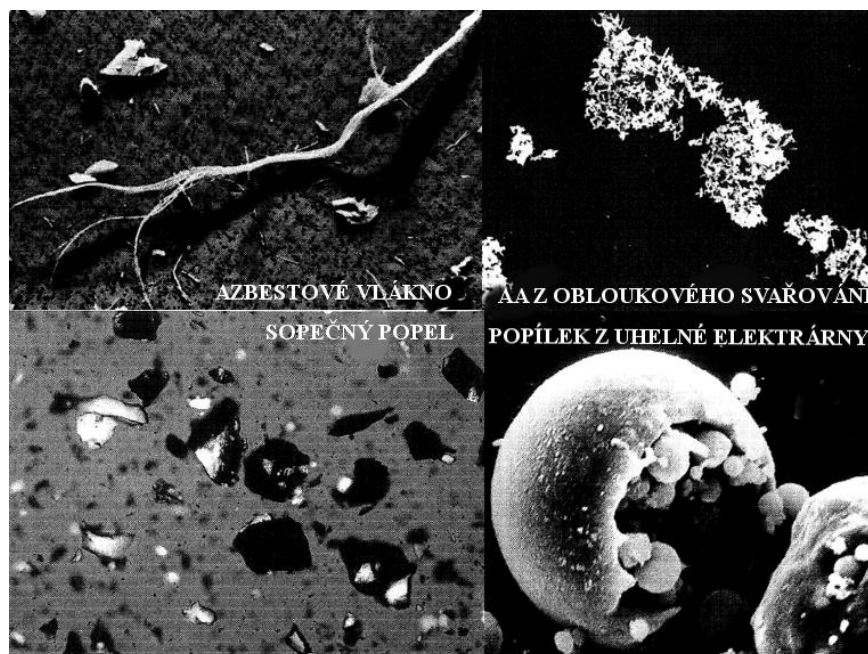
Podle svého původu má AA také rozdílné chemické složení (Hinds, 1999, s. 2). Náročná analýza jednotlivých chemických složek tak bývá často nahrazena vyčleněním jednotlivých složek AA, např. uhlíkatých aerosolů (total carbon – TC). TC je dále dělen na organický (organic carbon – OC)³ a elementární uhlík, (elementary carbon – EC) Platí (1)

$$EC + OC = TC \quad (1)$$

(Vodička, Schwarz, 2017, s. 354-362; Seinfeld et al., 2006, s. 628). Původ AA determinuje i tvar částic, který má významný vliv na chování AA (Hinds, 1999, s. 2; Moldan, 2015, s. 253). Obr. 1 ukazuje struktury částic několika typů AA.

² Tento interval by se dal zhruba ohraničit zleva velikostí virů (řádově desítky nm) a zprava průměrnou tloušťkou lidského vlasu.

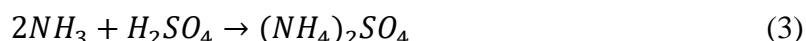
³ Tento pojem se vztahuje pouze na samotný uhlík vázaný v organických molekulách aerosolu, nikoliv hmotnost celých molekul. Poměr OC/EC tedy není poměrem hmotností samotných aerosolů, ale uhlíku v nich. (Seinfeld et al., 2006, s. 628)



Obr. 1: Struktura částic vybraných AA. Jednotlivé snímky nejsou ve stejném rozlišení. (Hinds, 1999, s. 3-7)

AA má i svoji živou složku, převážně různé bakterie, kvasinky nebo viry, mnohdy původce onemocnění (Moldan, 2015, s. 253).

V atmosféře dochází k mnoha chemickým i fyzikálním dějům, proto zde najdeme kromě tzv. primárního AA, tedy částic, jejichž zdrojem je přímo povrch země či oceánu, také sekundární aerosoly, vzniklé reakcí plynných složek atmosféry procesem tzv. konverze plyn-částice (gas-to-particle conversion) (Aerosol Science & Engineering, part Atmospheric Aerosol, section 1). Při tomto procesu jsou volatilní organické látky (VOC⁴) oxidovány nejčastěji pomocí hydroxylových ($\cdot\text{OH}$) a dusičnanových ($\text{NO}_3\cdot$) radikálů nebo ozonu (O_3) za vzniku sloučenin s nižší těkavostí, jež se hromadí jako organický aerosol (Seinfeld et al., 2006, s. 647). Obdobně může vznikat rovněž anorganický AA, např. dle rovnic (2; 3) (Aerosol Science & Engineering, part Atmospheric Aerosol, section 4, cit 2. 2. 2020):



1.1.1 Cyklus a chemické složení AA

Velikostní distribuce ideální směsi AA je teoreticky čtyřmódní, z čehož 3 módy, tedy mód nukleační, Aitkenův a akumulační řadíme do skupiny jemného AA, tzv. mód hrubých částic řadíme k hrubému AA. Ne vždy jsou však všechny čtyři módy AA zastoupeny, velikostní distribuce AA tak může být na reálných lokalitách např. monomodální nebo bimodální (Braniš, Hůnová et al., 2009, s. 131; EPA, 2004, s. 438).

⁴ VOC jsou organické látky s výjimkou metanu, které se za normálních podmínek rychle vypařují. Jsou uvolňovány do atmosféry uvolňovány z největší části při spalovacích procesech, výraznými zdroji jsou aplikaci barev, chemický průmysl či domácí použití rozpouštědel (Baláková et al, 2018, část IV.9.1).

Částice nukleačního módu (velikostní rozmezí 1-10 nm) vznikají při vysokoteplotních procesech (např. hoření či svařování) nebo fotochemickými reakcemi v atmosféře. Kondenzací horkých par dochází k formování primárních částic s velikostí několika nm. Tyto částice jsou však velmi reaktivní, a tak již v řádu několika sekund nebo minut dojde k jejich koagulaci⁵ za vzniku větších částic. Jejich hmotnostní koncentrace je v porovnání s ostatními módy nejnižší, početní koncentrace naopak nejvyšší (Braniš, Hůnová et al., 2009, s. 132 a 134; Rom et al., 2007, s. 1488, Hinds, 1999, s. 311).

Mod Aitkenův zahrnuje částice velikosti 10 až 100 nm, které vznikly zejména koagulací, samy se touto cestou přemění na větší částice (Rom et al., 2007, s. 1488). Společně s částicemi módu nukleačního podléhají Brownovu pohybu⁶ zapříčínujícího jejich srážení a tím i odstranění z atmosféry (Braniš, Hůnová et al., 2009, s. 134). Částice Aitkenova módu se vyskytují např. v kouři ze staršího diesellového motoru (EPA, 2004, s. 438). Na rozdíl od ostatních není tento mod vždy uváděn, např. Braniš, Hůnová et al., 2009, jej nezmiňují.

Akumulační mód (100 nm – 1 μ m) je v atmosféře nejhojněji zastoupený. Částice akumulčního módu jsou z atmosféry odstraňovány zejména mokrou depozicí, kdy AA slouží buď jako kondenzační jádro kapek deště⁷ nebo je vymyt již existující kapkou. Doba setrvání se tak pohybuje v rámci dnů až týdnů. Aerosol akumulčního módu vzniká zejména koagulací menších částic AA, obsahuje také částice uvolněné spalováním. Majoritní část tohoto módu náleží k sekundárnímu AA (Braniš, Hůnová et al., 2009, s. 132, Hinds, 1999, s. 311).

Částice hrubého módu (mezi 2,5 až 20 μ m) naopak vznikají mechanickým působením sil na materiály. Do této skupiny je řazen AA vytvářený větrem a dopravou, prach ze stavebních činností, emise ze sopečné aktivity, pyl apod. (Braniš, Hůnová et al., 2009, s. 132-133). Společně s částicemi akumulčního módu tvoří největší část hmoty AA. Pro odstranění z atmosféry je důležitá hlavně sedimentace⁸ (Hinds, 1999, s. 305). Rychlost usazování silně závisí na intenzitě turbulentního promíchávání vzduchu u země, doba setrvání v atmosféře se pohybuje v rozmezí hodin až dnů (Braniš, Hůnová et al., 2009, s. 132-133). Hmotnostní koncentrace hrubého a akumulčního módu vykazují na některých lokalitách inverzní korelaci: Nižší rychlost větru usnadňuje usazení hrubého AA a zároveň usnadňuje i fotochemické reakce vedoucí ke vzniku částic akumulčního módu (Hinds, 1999, s. 311-312). Na české pozadové lokalitě Košetice tvoří částice velikostního rozmezí 2,5 – 10 μ m⁹ přibližně 37 % hmotnosti (viz praktická část této práce).

Mezi jemnými a hrubými částicemi dochází k omezenému přesunu částic, tudíž pro každou skupinu je charakteristické jiné chemické složení. Jemné částice mají kyselé pH, chemicky se jedná zejména o sírany, amonné sloučeniny, OC a EC, toxické kovy a vodu. Hrubé částice jsou spíše bazické, obsahují zejména látky vyskytující se v zemské kůře (Hinds, 1999, s. 312). Do

⁵ srážení

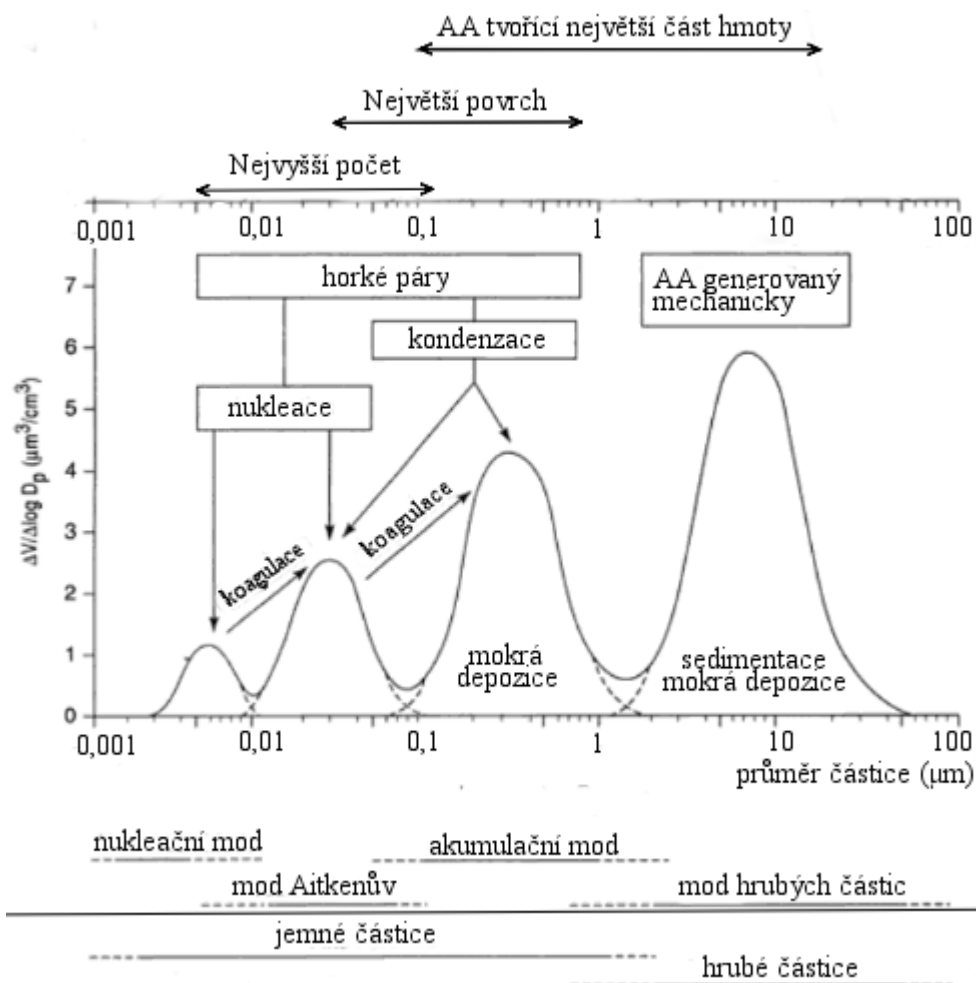
⁶ pojem označuje náhodný pohyb částic v tekutém prostředí zapříčinený náhodnými srážkami částic.

⁷ Pro kondenzaci vody z nasycené páry je potřeba povrch, na němž se může vodní kapka začít tvořit. Kondenzace proto začne probíhat právě na částicích AA, tzv. kondenzačních jádrech.

⁸ Tomuto procesu výrazně napomáhají stromy obrovskou plochou svých listů.

⁹ Jedná se tedy pouze o část módu hrubých částic.

obou skupin můžeme zařadit dusičnany, v jemné frakci se jedná o zejména o dusičnan amonný (viz rovnice 2), v hrubé frakci se vyskytují jako produkty kondenzace par kyseliny dusičné na povrchu velkých částic. (Braniš, Hůnová et al., 2009, s. 138). Charakteristiky jednotlivých modů shrnuje obr. 2.

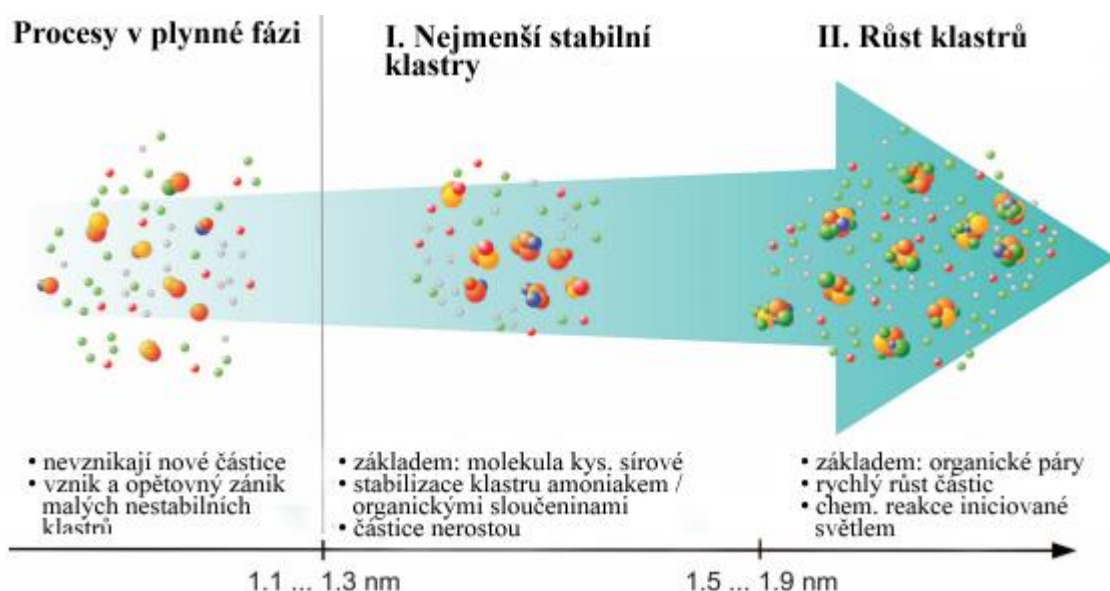


Obr. 2: Schéma velikostní distribuce jednotlivých modů, jejich zastoupení v atmosféře i pochody vedoucí k jejich vzniku a zániku. Schéma odpovídá městskému AA (Hinds, 1999, s. 313; Rom et al., 2007, s. 1488).

1.1.2 Nukleační děje v atmosféře

Nukleace je děj, kdy z plynných prekurzorů vznikají nové částice nukleačního modu. Tento proces je dominantním zdrojem nových částic AA v atmosféře (Kulmala et al., 2013, s. 943). Kulmala et al. (2013, s. 946) rozlišuje dva základní kroky nukleace, vznik nejmenších stabilních klastrů¹⁰ částic (okolo 1,5 nm) na základě molekul kyseliny sírové, druhý krok je růst klastrů (velikost přes 2 nm) vlivem organických par (schematicky vyjádřeno na obr. 3). Pod pojem nukleace tedy zahrnuje i procesy konverze plyn – částice (Kubelová, 2017, s. 19).

¹⁰ Shluků



Obr. 3: Schematické znázornění procesu nukleace (Kulmala et al., 2013, s. 346)

Procesu nukleace předchází procesy v plynné fázi, kdy opětovně vznikají a zanikají klastry o rozměru pod 1 nm.¹¹ Tyto klastry jsou tvořeny obvykle molekulami kyseliny sírové a vody, která je stabilizována zásaditou molekulou, např. amoniakem (viz rovnice 3) nebo organickými parami. Pokud atmosféra obsahuje dostatek organických par v kombinaci se silnějším slunečním svitem, začnou se tyto páry srážet na existujících částicích a vzájemně chemicky reagovat (Kulmala et al., 2013, s. 345-6). Kulmala et al. (2013, s. 945) zaznamenává ve Finsku nejintenzivnější nukleaci v poledních hodinách, kdy je sluneční radiace na maximu. Práce Holubové et al. (2020, s. 7) uvádí na českých městských pozadřových stanicích¹² nejvyšší nárůst počtu částic v souvislosti s prekurzory¹³ uvolněnými při ranních a večerních dopravních špičkách.

Na nukleaci se však nepodílí jen antropogenní VOC, důležitou roli mají i organické látky uvolňované z vegetace, zejména terpeny z lesních porostů (Vodička, 2015, s. 9),¹⁴ případně alkany s dlouhým řetězcem (okolo 30 atomů uhlíku), jak bylo detekováno při výzkumu v kalifornském městě Pasadena obklopeném vegetací (Seinfeld et al., 2006, s. 645).

Nukleace se podílí na vzniku největšího počtu částic, nicméně její příspěvek k hmotnostní koncentraci AA není výrazný (Hinds, 1999, s. 313). Budeme-li předpokládat, že částice mají kulový tvar, můžeme jejich objem V vyjádřit podle jejich průměru d vztahem (4) (Hinds, 1999, s. 10):

$$V = \frac{\pi d^3}{6} \quad (4)$$

¹¹ Ve srovnání, délka chemické vazby se pohybuje okolo 1 Å (0,1 nm). Hmotnost nejmenších vzniklých částic se pohybuje okolo 300-500 u (atomová hmotnostní konstanta) (Kulmala et al., 2013, s. 346).

¹² Ústí nad Labem-město, Lom a Praha Suchdol

¹³ Mezi tyto prekurzory patří zejména oxidy s redoxními účinky (NO₂, SO₂).

¹⁴ Částice vzniklé nukleací rozptylují světlo. Proto se nad rozsáhlými lesy v teplejších oblastech vytváří namodralý opar, který dal jméno např. Blue Ridge Mountains v USA (Vodička, 2015, s. 9).

Srovnáme-li tedy např. objemy částice nukleačního modu ($d_n = 2,5 \text{ nm}$) a modu hrubých částic ($d_h = 2,5 \text{ }\mu\text{m}$), částice modu nukleačního je řádově 10^9 krát menší, vizt (5).

$$\frac{\pi d_h^3}{6} \cdot \left(\frac{\pi d_n^3}{6}\right)^{-1} = \left(\frac{d_h}{d_n}\right)^3 = \left(\frac{2,5}{0,0025}\right)^3 = 10^9 \quad (5)$$

1.1.3 Přírodní a městský AA

Výše (1.1) již bylo nastíněno rozdělení AA na přírodní, tedy pozadřový, a na antropogenní, který je základem tzv. městského AA (Aerosol Science & Engineering, part Atmospheric Aerosol, sections 3-4). Přírodní AA tvoří většinu hmotnosti celkového aerosolu.

Největší část hmoty AA tvoří primární částice vzniklé větrnou erozí skal nebo půdy v suchých regionech, dále krystalky soli uvolněné z moře a prach ze sopečných erupcí. Vzhledem k mechanickému původu se řadí tyto částice k hrubému modu, mají tudíž tendenci rychle se usadit v blízkosti svého zdroje. Oproti tomu AA vzniklý např. při požárech a sekundární AA zůstává v atmosféře dobu dostatečně dlouhou pro překonání globálních vzdáleností. Ačkoliv tvoří přírodní AA výrazně větší podíl na celkovém AA, jeho zdroje jsou víceméně pravidelně rozmístěny po planetě, a tak vliv antropogenního AA výrazně přesahuje v industriálních oblastech přírodní zdroje (tab. 1).

Zdroj	Množství AA [Tg/rok] ¹⁵	
	Rozmezí hodnot	Nejlepší odhad
Přírodní		
Půdní prach	1000–3000	1500
Mořská sůl	1000–10000	1300
Botanický (pyl apod.)	26–80	50
Sopečný prach	4–10000	30
Lesní požáry	3–150	20
Konverze plyn-částice ¹⁶	100–260	180
Fotochemický ¹⁷	40–200	60
Celkový součet pro přírodní: 2200–24000		3100
Antropogenní		
Přímé emise	50–160	120
Konverze plyn-částice ¹⁸	260–460	330
Fotochemický ¹⁹	5–25	10
Celkový součet pro antropogenní: 320–640		460

Tab. 1: Zdroje a odhady globálních emisí AA. Do přehledu není zahrnut velmi významná část AA, oblaka zkonzenzované vodní páry (Hinds, 1999, s. 305).

Jelikož se většina hmoty AA uvolňuje přímo ze zemského povrchu, asi 80 % tohoto AA zůstává do výšky 1 km. O dalších několik km výše je však pozorován hlavně AA sekundární (Hinds, 1999, s. 304-306). Pro delší časový horizont je přibližně platné tvrzení, že hmotnostní koncentrace AA exponenciálně klesá v závislosti na výšce nad povrchem až po určitou hranici, nad níž je již koncentrace takřka neměnná. Tato mezní výška se však zásadně liší pro jednotlivá prostředí. Pro početní koncentrace AA takto jednoznačná závislost neexistuje, obecně nad pevninou, kde bývá AA hrubší frakce, se početní koncentrace s přibývajícím výškou snižuje, nad oceánem se ale velikost částic značně různí a početní koncentrace může i stoupat (Braniš, Hůnová et al., 2009, s. 135-136).

Přestože většina AA je soustředěna v troposféře, významný vliv na zemské klima²⁰ má rovněž stratosférický AA. Jedná se z největší části o drobné kapičky kyseliny sírové, která vznikla reakcí oxidu siřičitého, jenž je do troposféry injektován při erupcích²¹. Vrstva ve výšce mezi 18 až 20 km, kde se tento AA vyskytuje, se nazývá Jungeho vrstva. Nízká vlhkost, pro vyšší vrstvy

¹⁵ $Tg = 10^{12} g = 10^6 tun$

¹⁶ Sekundární AA zahrnující sírany z SO_2 a H_2S , amonné soli a nitráty z NO_x .

¹⁷ Sekundární AA formovaný z isoprenu a monoterpenů, které se vypařují zejména z jehličnatých stromů.

¹⁸ Zahrnuje sírany z SO_2 a nitráty z NO_x .

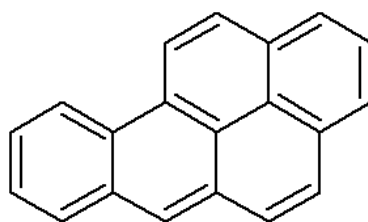
¹⁹ Sekundární AA formovaný z antropogenních VOC.

²⁰ Viz oddíl 1.2.2

²¹ Velké erupce, mezi které můžeme zařadit i erupci filipínského vulkánu Mt. Pinatubo roku 1991, mohou výrazně ovlivnit koncentrace stratosférického AA. Po zmiňované erupci došlo ke zvýšení koncentrací přibližně z $2-5 \mu g \cdot m^{-3}$ na $20-100 \mu g \cdot m^{-3}$.

atmosféry typická, zamezuje vzniku kondenzačních jader a následné mokré depozici AA, který zde proto setrvává v rozmezí 1 až 2 let (Hinds, 1999, s. 305-307).

Městský AA má vzhledem k širokému spektru zdrojů komplexnější složení, na rozdíl od přírodního AA u něj můžeme rovněž pozorovat všechny velikostní módy (Hinds, 1999, s. 307-308), velikostní distribuce je podobná idealizované křivce na obr. 2. Kromě dusičnanů, síranů, EC a OC jsou monitorovány různé kovy²², které v pozadí AA mají nižší koncentrace (Braniš, Hůnová et al., 2009, s. 138-139). Důležitou skupinou AA²³ převážně antropogenního původu jsou polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH). Jedná se o chemické látky složené pouze z atomů uhlíku a vodíku uspořádaných do dvou a více aromatických jader. Vznikají z největší části při zahřátí organických látek na vysokou teplotu bez přístupu vzduchu, zejména při neúplném spalování kapalných či tuhých paliv ve starých domácích kotlích, průmyslových zařízeních, nebo ve starších automobilech. Mnohé z nich, např. benzo[a]pyren (vzorec na obr. 4) jsou potvrzené humánní karcinogeny (Lhotka, 2019, s. 9, 19-20 a 14).



Obr. 4: Struktura benzo[a]pyrenu

V ČR byly v roce 2016 nejvýznamnějším zdrojem částic PM₁₀, tedy částic menších 10 μm, lokální topeniště, která se na celkových emisích podílejí takřka ze 60 %, ²⁴ s odstupem následují emise vzniklé obhospodařováním půdy, nezanedbatelný je dále příspěvek veřejné energetiky, silniční dopravy²⁵, těžby uhlí a chovu hospodářských zvířat. Obdobně takřka 3/4 emisí PM_{2,5} pochází z domácího vytápění, s dalekým odstupem následuje veřejná energetika (3,6 %) a další zdroje, riziko představuje obzvláště sektor dopravy, zdroj velmi jemné frakce částic (PM₁). Zhoršená kvalita ovzduší je tak problémem i malých obcí²⁶ vytápěných zejména tuhými palivy, koncentrace AA tu mohou²⁷ být zvýšené až nadlimitní. Celkově představuje znečištění částicemi PM₁₀ a PM_{2,5}, benzo[a]pyrenem a ozonem²⁸ hlavní problémy kvality českého ovzduší. Všechny imise zaznamenaly v 90. letech minulého století markantní pokles, tento trend, byť méně výrazně, pokračuje dodnes (Baláková et al, 2018, část IV. 1). Podobná tendence platí i pro ostatní členy Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj (OECD), kde bude podle

²² Zejména železo, olovo, měď, kobalt, rtuť a antimon.

²³ Molekuly PAH s molekulovou hmotností do 178 g · mol⁻¹ se vyskytují i jako volné molekuly v plynné fázi atmosféry, PAH s větší molekulovou hmotností se vyskytuje zejména sorbovaný na povrchu částic AA.

²⁴ Jedná se o hmotnostní podíl.

²⁵ Větším podílem (ČHMU uvádí hmotnostní podíl) na frakci PM₁₀ než samotné emise z výfuků se podílí abraze vozovky a otěry pneumatik a brzdového obložení. Jemné částice unikající z výfuku (až 1000krát menší než PM₁₀) mají z hlediska hmotnosti takřka zanedbatelný podíl, jsou ale neškodlivější.

²⁶ Tento AA bývá specifikován přívlaskem vesnický (Braniš, Hůnová et al., 2009, s. 138).

²⁷ V mnoha obcích nejsou koncentrace škodlivin měřeny.

²⁸ Prekurzor vzniku sekundárního AA

prognózy znečištění městským AA i nadále klesat. V rámci BRICS²⁹ dojde pravděpodobně ke snížení do roku 2030, avšak v městech ostatních zemí, zejména v jižní Asii (včetně Indie), Africe a Indonésii, koncentrace AA i nadále silně porostou (Moldan, 2015, s. 271).

V současné české legislativě jsou imisní limity definovány *Zákonem o ochraně ovzduší* (201/2012 Sb.), který stanoví maximální koncentraci PM₁₀ na 50 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ v 24hodinovém průměru s limitem 35 překročení za rok, v celoročním průměru nesmí koncentrace PM₁₀ překročit 40 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ a 20 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ pro PM_{2,5} (Zákony pro lidi, 201/2012, verze 13).

1.1.4 EC a OC

Velmi důležitou část AA tvoří uhlíkaté aerosoly, v závislosti na lokalitě tvoří mezi 20 až 70% hmoty AA (Schwarz, 2017, s. 354). EC se vyskytuje zejména ve formě sazí jako vedlejší produkt spalování uhlíkatých paliv při nedostatku kyslíku,³⁰ jedná se tudíž o primární AA. Saze vznikají z částic Aitkenova módu tvořených trojrozměrnou strukturou neuspořádaných vrstviček grafitu. Tyto částice se bezprostředně srážejí do větších struktur a akumulují do sebe množství organických látek včetně PAH³¹. Více než 90% hmoty EC jsou částice menší než 1 μm (Seinfeld et al., 2006, s. 628-634). Kromě přírodních požárů jsou zdroje EC antropogenního charakteru, zejména z dopravy (Vodička, Schwarz, 2017, s. 359) a lokálních topenišť. Podíl hmoty EC pocházejícího ze spalování fosilních paliv byl předmětem výzkumů provedených na přelomu 80. a 90. let v USA. Pomocí metody radiometrického datování byl stanoven na 93 % v Los Angeles, 47 % v Detroitu a 30-60 % ve venkovských oblastech Pensylvánie. Koncentrace EC se pohybují na pozadových lokalitách mezi 0,2 – 2 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, v městských oblastech do 20 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (Seinfeld et al., 2006, s. 631-632). Podle dat nasbíraných mezi lety 2013 až 2018 byla průměrná koncentrace EC na české pozadové lokalitě 0,63 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.³²

Oproti EC má OC přírodní i antropogenní původ (Seinfeld et al., 2006, s. 634). Většina přírodního OC je sekundárního původu, vznikla fotochemickou reakcí isoprenu a monoterpenů uvolňujících se ze stromů (Hinds, 1999, s. 304). Mezi antropogenními emisemi dominuje spíše primární OC, výjimkou mohou být slunečné letní periody spojené s intenzivnější tvorbou sekundárního AA. Primární OC je tvořen zejména produkty hoření, kdy palivo nestačí kvalitně prohořet, zbytky organických sloučenin pak zchladnou za vzniku OC. Z celosvětového hlediska pochází z otevřeného spalování, otevřených ohnišť, krbů, vypalování biomasy atd., až 75% hmoty OC, příspěvek spalování ropných paliv oproti tomu pohybuje v řádech jednotek procent (Seinfeld et al., 2006, s. 640-641). Vznik sekundárního OC je popsán v 1.1. Většina OC náleží k akumuláčnímu módu. Průměrné roční koncentrace³³ OC se pohybují v pozadových

²⁹ Zkratkovité označení hospodářského uskupení Brazílie, Ruska, Indie, Číny a Jižní Afriky

³⁰ Vznik sazí je podmíněn nedostatkem kyslíku při hoření, nezávisí příliš na tlaku, zvyšující se teplota tvorbu sazí inhibuje.

³¹ Již v období 19. století byla objevena souvislost mezi rakovinou šourku u kominíků a sazemi, kterým byli vystaveni, ve 20. a 30. letech 20. století pak byla prokázána karcinogenita konkrétně u benzo[a]pyrenu (Waldron, 1983 s. 390-396).

³² Průměr z dat nasbíraných na košetické atmosférické observatoři, viz praktická část.

³³ Jedná se o hmotnost čistého uhlíku vázaného v OC v m^3 , koncentrace organického AA, tedy součet hmotností celých molekul v m^3 , je asi 1,2 až 2krát vyšší.

oblastech okolo $3,5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, ve znečištěných oblastech řádově mezi 5 až $20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (Seinfeld et al., 2006, s. 645 a 336). Mezi lety 2013 až 2018 byla průměrná koncentrace OC na české pozad'ové lokalitě $3,45 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. Hodnota poměru OC/EC na pozad'ových lokalitách se obvykle pohybuje okolo 4 (Mbengue et al., 2018, s. 338).

1.2 Vliv AA na klima a zdraví

1.2.1 Vliv AA na zemský systém

Jungeho vrstva zvyšuje výrazně zemské albedo a působí tak proti skleníkovému efektu se srovnatelnou účinností (Hinds, 1999, s. 312).³⁴ Částice AA nacházející se ve stratosféře se podílí také na úbytku stratosférického ozonu. V polárních oblastech v průběhu zimy dojde ke kondenzaci kyseliny dusičné a vodní páry za vzniku tzv. polárních stratosférických oblaků³⁵, které slouží jako katalyzátor pro rozklad přítomných chlorovaných sloučenin, např. antropogenních freonů, na molekuly chloru nebo kyseliny chlorné. Po příchodu polárního jara iniciuje světlo sérii reakcí např. (6, 7, 8):



Erupce zvyšující koncentraci stratosférického AA tak napomáhají úbytku ozonu (Hinds, 1999, s. 312). Též troposférický AA má signifikantní vliv na radiační bilanci zemského povrchu. Ačkoliv je EC absorberem³⁶ světla (Mbengue et al., 2018, s. 336), AA jako celek světlo rozptyluje, čímž zapříčiňuje jeho odraz zpět do vesmíru. AA ovlivňuje toky energie i nepřímo, neboť slouží jako nukleační jádra pro tvorbu dešťových kapek, bílá oblaka pak zvyšují zemské albedo. AA má proto z globálního hlediska ochlazující efekt, doba setrvání v atmosféře je však mnohem kratší než u skleníkových plynů (Hinds, 1999, s. 314; Novotná, 2015, s. 8). Částice akumulacího modu odpovídají svou velikostí vlnové délce světla, zodpovídají proto největším dílem ke snižování viditelnosti (Hinds, 1999, s. 311; IPCC, 2019).

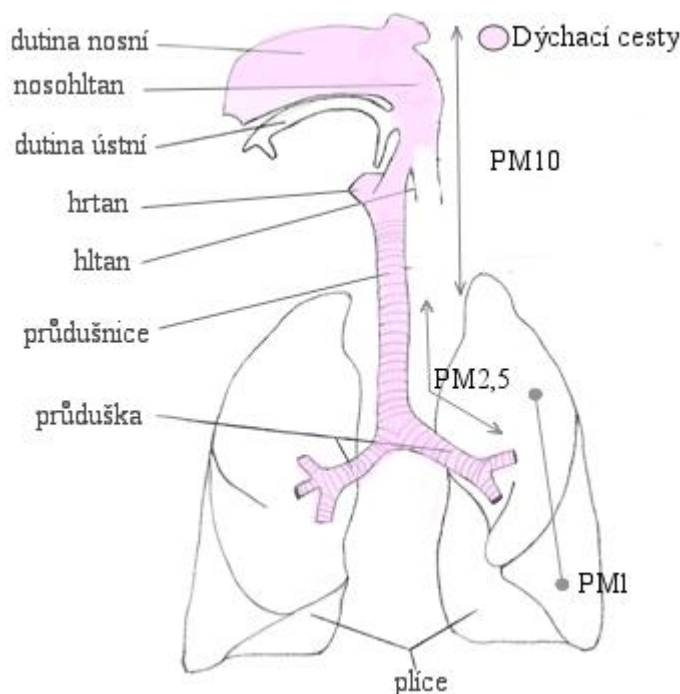
³⁴ Umělá injekce velkého množství AA do stratosféry tak představuje jednu z často diskutovaných metod klimatického inženýrství, (záměrných globálních úprav s cílem eliminace nežádoucích změn klimatu). Není však jasné, zda by takový proces byl dlouhodobě udržitelný, komplexní dopady obdobného zásahu na zemský systém nejsou stále zcela známy. Ani technologie nutná pro realizaci není v současnosti dostupná (Tjiputra et al., 2016, s. 3 a 21; Moldan, 2015, s. 85-86)

³⁵ Pro svůj krásný vzhled jsou rovněž nazývána perleťová oblaka.

³⁶ EC má na rozdíl od OC i anorganického AA tmavou barvu, což plyne z jeho vlastnosti pohlcovat elektromagnetické vlnění a tím zadržovat v atmosféře jeho energii (Vodička, 2015, s. 9).

1.2.2 Vliv AA na lidské zdraví

Negativní vliv AA na zdraví je dobře znám již z moderní historie, emise ze spalování nekvalitních paliv v kombinaci se zimní inverzí³⁷ zapříčinily³⁸ v Londýně roku 1952 okolo 4000 úmrtí (Wilkins, 1954, s. 1), podobné problémy ale nastávaly již dříve a v jiných oblastech (Braniš, Hůnová et al., 2009, s. 187). Celkově má antropogenní AA vliv na rozvoj astmatu, nemocí oběhového systému nebo nádorových onemocnění, přírodní AA stojí spíše za alergiemi nebo chorobami způsobenými viry a bakteriemi (Vodička, 2015, s. 12).



Obr. 5: Dýchací soustava a přibližná depozice AA v ní (podle Biomach, Dýchací systém; Kubelová, 2017, s. 16).

Škodlivost AA je kromě chemického složení určována jeho velikostní frakcí, která určuje, jak hluboko do těla částice proniknou (obr. 5). Velké částice nejsou pro svoji velkou hmotnost příliš pohyblivé, setrvačnost jim nedovolí reagovat na rychlé změny proudění vzduchu a dojde k jejich impakci na stěnu dýchacího ústrojí, v dutině nosní se usazují i vlivem gravitace. Dýchací cesty jsou proto vybaveny vrstvou hlenu, který se relativně rychle přesouvá do trávicího traktu. Menší pohyblivější částice s průměrem pod 1 μm projdou až do plic, odkud jsou odstraňovány lymfatickou soustavou, což může trvat i roky. V plicích tak může začít probíhat fibróza. Nejmenší částice (<100 nm) pak pronikají až do krve (Aerosol Science & Engineering, part Respiratory Deposition; Kubelová, 2017, s. 16).³⁹ Vliv AA na lidské zdraví není jen negativní, např.

³⁷ Tento druh znečištění se nazývá zimní nebo též redukční smog, jeho obdobou je tzv. letní neboli losangeleský smog tvořený hlavně ozonem a reaktivním sekundárním OC, je iniciován silným slunečním zářením.

³⁸ AA společně s plynnými složkami smogu.

³⁹ S výjimkou virů je obvykle přírodní AA hrubší než antropogenní, zejména z čehož plyne jeho nižší škodlivost. (Vodička, 2015, s. 12).

léky na mnohá plicní onemocnění podávány právě formou aerosolu⁴⁰ (Aerosol Science & Engineering, part Aerosols in the Health Care Field).

⁴⁰ Chování aerosolu léčiv v dýchacím ústrojí je předmětem výzkumů, na ÚCHP AV ČR se problematikou zabývá Mašková et al. 2018, v jiných zemích např. Xi Jinxiang a Longest, P. Worth 2007 nebo Das Prashant, et al. 2018.

2 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část zaměřuje primárně na zhodnocení trendů koncentrací uhlíkatých aerosolů, zejména na poměr OC/EC, který umožňuje odvodit zdroj naměřených koncentrací, dále jsou sledovány koncentrace celkového AA a jeho velikostní frakce. Za použití naměřených dat o teplotě (T), směru (W_d) a rychlosti (W_s) větru se pokusí zhodnotit rovněž původ naměřených částic z hlediska typů zdrojů i jejich lokace.

2.1 Metody měření

Data byla shromažďována od března 2013 do konce roku 2018 na Národní atmosférické observatoři Košetice (NAOK). V hodinových intervalech byla měřena koncentrace částic frakce PM_{10} a $PM_{2,5}$ v kombinaci s informací o celkovém počtu částic (AA), stanovovaném rovněž v hodinovém intervalu. Ve čtyřhodinovém rozlišení bylo měřeno EC, OC a TC. Souběžně byly zaznamenávány W_s , W_d a T .

NAOK se nachází v kraji Vysočina, okres města Pelhřimov ($49^{\circ}34' 24''$ s.š. a $15^{\circ}04' 49''$ v. d., nadmořská výška 534 m n. m.), asi 85 km od Prahy. Jedná se o pozadřovou stanici obklopenou venkovskou zemědělskou krajinou. Hustota zalidnění okresu Pelhřimov je pouze 57 obyvatel/ km^2 , tedy výrazně pod republikovým průměrem (Zíková, Ždímal, 2013, s. 1465). V blízkém okolí se nachází několik vesnic: Kramolín s 10 stálými obyvateli (1,2 km jihozápadně) je sídlem nejbližším, jihovýchodně položené Košetice se 700 stálými obyvateli jsou pak největší obcí v blízkém okolí (viz mapa na obr. 6). Přibližně 6 km severně vede dálnice D1, kromě ní najdeme v oblasti (cca 7,5 km východně) i malou dřevozpracovatelskou společnost v obci Lukevec vybavenou spalovnou biomasy (Mbengue et al., 2018, s. 337).



Obr. 6: Poloha NAOK (Mapy.cz, Google Maps)

Observatoř byla založena roku 1988 v rámci Global Environment Monitoring System (GEMS) s hlavním cílem monitoringu dlouhodobých trendů znečištění atmosféry na pozadřové úrovni v ČR i Evropě. NAOK je provozována Českým hydrometeorologickým ústavem (ČHMÚ) společně s partnerskými organizacemi, Masarykovou univerzitou (MUNI), Ústavem chemických procesů Akademie věd České republiky (ÚCHP AV ČR), Ústavem výzkumu globální změny

Akademie věd České republiky (ÚVGVZ AV ČR). Stanice je zařízena a vybavena pouze pro vědecké účely, např. zcela ojedinělý je 250 m vysoký stožár (ACTRiS Czech Republic, Technické parametry), který slouží k odběrům vzorků vzduchu z různých výšek za účelem měření koncentrací skleníkových plynů a plynné rtuti. NAOK zabezpečuje účast ČR v dlouhodobých programech monitoringu ovzduší, jakými jsou *International Cooperative Programme on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystems* (ICP-IM), který probíhá pod záštitou *Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution* (CLRTAP), *Global Atmosphere Watch* (GAW) nebo *Aerosol, Clouds and Trace Gases Research Infrastructure Network* (ACTRiS-2) (Lhotka, 2019, s. 27-28; Mbengue et al., 2018, s. 335-346; Blažek a Malín, 2015, s. 150-151; ACTRiS, Observatoř Košetice).

2.1.1 Měření koncentrace PM₁₀ a PM_{2,5}; aerosolový spektrometr

Koncentrace částic frakce PM₁₀ a PM_{2,5} byly získány pomocí metody RADIO, tedy radiometrie. Na filtrační materiál je nejprve zachycován aerosol. Jeho koncentrace je pak odvozena na základě rozdílu absorpce β záření na exponované a neexponované části filtru v kombinaci s množstvím vzduchu prošlého filtrem. Pohlcování β záření je dle Lambert-Beerova zákona exponenciálně závislé na hmotnosti zachyceného materiálu, jak vyjadřuje vztah (9)

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu q} \quad (9)$$

kde I je intenzita β záření po průchodu vrstvou zachyceného aerosolu na filtru, I_0 je intenzita tohoto záření prošlého neexponovaným filtrem, μ je hmotnostní absorpční koeficient a q je plošná hustota vrstvy zachyceného aerosolu, jejíž závislost na koncentraci aerosolu c [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$], objemu prosátého vzduchu V a ploše vrstvy zachyceného aerosolu S na filtru se dá vyjádřit vztahem (10)

$$q = \frac{c \cdot V}{S} \quad (10)$$

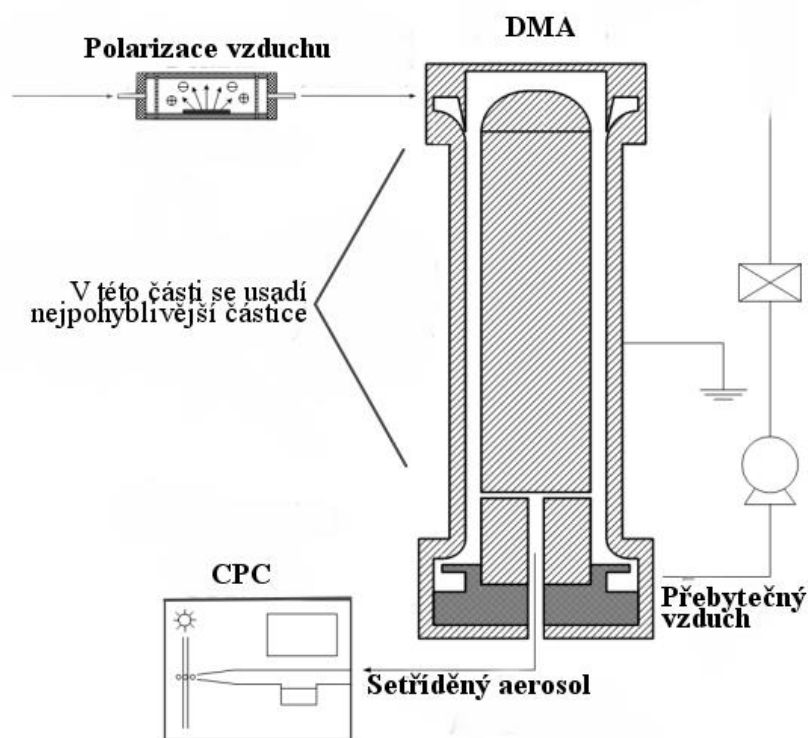
V praxi se pak užívá odvozená závislost, v níž je intenzita záření vyjádřena počtem impulzů N_0 po průchodu čistým filtrem a N po průchodu vzorkem. (Braniš, Hůnová et al., 2009, s 219-220) (11)

$$c = \frac{S \cdot \ln\left(\frac{N_0}{N}\right)}{\mu \cdot V} \quad (11)$$

Dalším použitým přístrojem byl aerosolový spektrometr (SMPS – Scanning Mobility Particle Sizer) sloužící k měření velikostní distribuce částic aerosolu. Přístroj se skládá ze dvou základních částí, kondenzačního čítače částic (CPC – Condensation Particle Counter) a diferenciálního analyzátoru pohyblivosti částic (DMA – Differential Mobility Analyzer). Po nasátí aerosolu do SMPS nadchází nejprve DMA. V něm jsou částice polarizovány. Přístroj pak třídí AA podle mobility částic v elektrickém poli, která stoupá s vzrůstajícím nábojem částice a naopak klesá se vzrůstající velikostí částice a tím i její hmotností.⁴¹ DMA na základě tohoto principu třídí

⁴¹ Čím je částice větší, tím může být nositelem většího náboje. Celkově je však nárůst velikosti náboje se zvětšováním částice pomalejší než pokles mobility rovněž způsobený narůstající velikostí částice.

AA, příliš pohyblivé částice jsou rychle zachyceny, naopak málo pohyblivé částice pokračují s proudem procházejícího vzduchu. Až do druhé části SMPS, do CPC, tak projdou jenom částice s odpovídající elektrickou mobilitou, tedy odpovídající velikostí, jak je znázorněno na obr. 7. DMA disponuje možností změny napětí na elektrodě, a tak možností separovat přesně danou velikostní frakci částic. CPC slouží k měření jemných částic, které již nemusí být měřitelné pomocí standardních optických čítačů, přístroj rozliší částice od velikosti zhruba 8 nm. Rozdělený AA vstupuje do první části CPC, kde je udržována vysoká tenze par butanolu. V další části přístroje je pak snížena teplota, to vede ke kondenzaci butanolu, při níž částice AA slouží jako kondenzační jádra.⁴² Díky tomu i takto drobné částice narostou do velikosti, kterou detekuje optický čítač částic. Aerosolový spektrometr pak na základě kombinace dat z DMA a CPC určí množství částic dané velikosti (Kubelová, 2017, s. 40-43), schéma přístroje je na obr. 7.



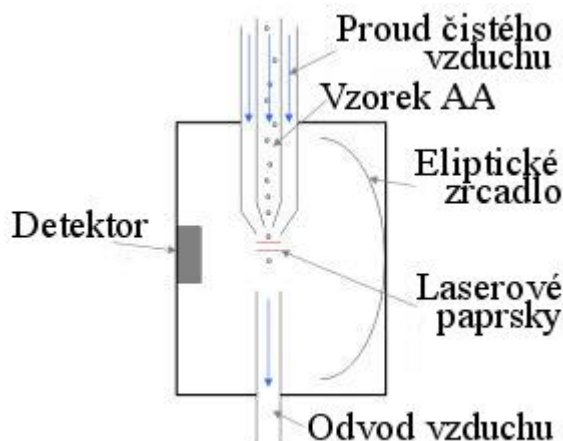
Obr. 7: Schéma SMPS (Kubelová, 2017, s. 42)

2.1.2 APS (Aerodynamic Particle Sizer)

SMPS měří koncentraci aerosolu na základě jejich mobility v elektrickém poli, která souvisí zejména s hmotností částic. Pro chování částic je velmi důležitý také aerodynamický průměr částice, tedy průměr, který by měla koule o hustotě $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, jež by se usazovala stejnou

⁴² Důležitá je správná úroveň přesycení alkoholových par, aby nedošlo k homogenní nukleaci vedoucí k nepřesnosti měření. Homogenní neboli spontánní nukleace je jev, kdy dochází ke vzniku částic bez nukleačních jader.

rychlostí jako daná částice (Braniš, Hůnová et al., 2009, s. 123). Právě pro rozlišení AA dle aerodynamického průměru je užíváno APS, jehož schéma je na obr. 8.



Obr. 8: Schéma APS (MANCHEstER 1824, Aerodynamic Particle Sizer)

APS pracuje na principu rozdílného zrychlení částic různého aerodynamického průměru. AA je po vstupu do přístroje intenzivně urychlován v trysce a následně proudem čistého vzduchu. Proudící vzduch uděluje částicím různé zrychlení v závislosti na jejich aerodynamickém průměru. Pohyblivost částice je přímo za tryskou měřena dvěma laserovými paprsky vzdálenými přibližně $200 \mu\text{m}$: Po průletu částice laserem je paprsek rozptýlen, načež je rozptýlené světlo eliptickým zrcadlem soustředěno k čidlu, které podle délky intervalu mezi zachycenými impulzy vypočte rychlost částice a z ní i aerodynamický průměr procházejícího AA. Částice je měřena jen tehdy, pokud při průletu emituje právě 2 výrazné signály v definovaném časovém intervalu. Příliš malé částice rozptýlí nedostatek světla pro odlišení druhého signálu, naopak velká částice emituje druhý signál až po uplynutí předem definovaného času, zachycen je v obou případech pouze 1 signál. Tyto dva jevy ohraničují citlivost APS, která se pohybuje v rozmezí $0,5 \mu\text{m}$ až $20 \mu\text{m}$, podle detekce zachyceného signálu však dokáže rozšířit svůj rozsah o skupinu v rozmezí $0,3 - 0,5 \mu\text{m}$ (MANCHEstER 1824, Aerodynamic Particle Sizer).

Početní koncentrace AA byla vypočítána jako součet koncentrací naměřených SMPS a APS.

2.1.3 Analýza uhlíkatých aerosolů

Jak již výše zmíněno, velmi užitečnou metodou analýzy uhlíkatých AA je jejich rozlišení na EC a OC. Tyto dvě složky jsou analyzovány metodou termo-optické analýzy, která je známa již od 80. let a je neustále vyvíjena a optimalizována. V této práci jsou použita data z přístroje *Semi-Continuous OC/EC Field Analyzer 4G* společnosti *Sunset Laboratory*, AA byl odebírán ve frakci $\text{PM}_{2,5}$.

Celý proces analýzy začíná odběrem vzorku na křemenný filtr.⁴³ Po odebrání může dojít k chybě způsobené vznikem artefaktů: Negativní artefakt je důsledkem odpaření semivolatilní

⁴³ Filtr musí odolat vysokým teplotám (okolo 900°C) v průběhu analýzy, proto jsou využívány křemenné materiály.

složky OC ještě před vlastní analýzou, naopak pozitivní artefakt spočívá v absorpci těkavých složek vzduchu do odebraného vzorku. Užítý poloautomatický přístroj eliminuje vznik negativního artefaktu díky okamžitému zpracování vzorku po odebrání, pozitivní artefakt je minimalizován průchodem vzorku difuzním denuderem, který je tvořen podélnými pásy aktivního uhlí, jež absorbují organické páry.

Samotným principem analýzy obou složek TC je fakt, že OC je uvolněn z filtru bez přístupu kyslíku, který je pro uvolnění EC potřeba. Nejprve je přístroj hermeticky uzavřen a proplachován heliem, jež slouží jako inertní atmosféra pro první část analýzy. V jejím průběhu jsou postupným zahříváním k teplotě až 900°C z filtru uvolňovány organické sloučeniny a následně pyrolytické produkty, které jsou dovedeny do oxidační pece. Tam jsou oxidovány burelem na oxid uhličitý, jehož množství je následně určeno NDIR⁴⁴ detektorem.

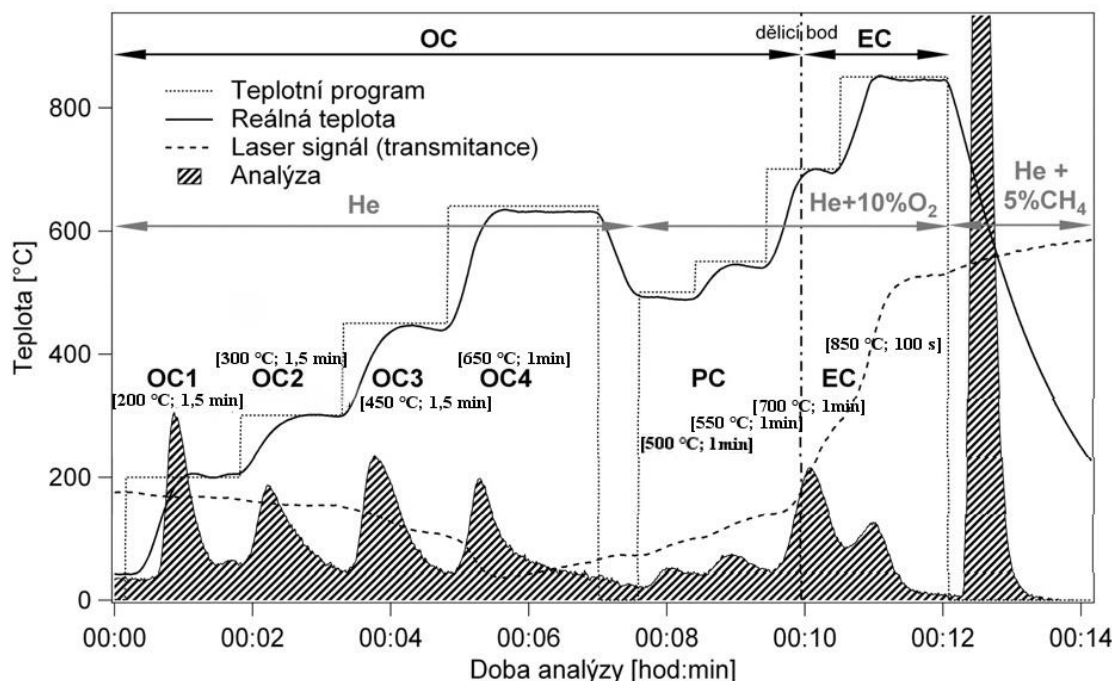
Druhá část analyzačního probíhá v prostředí směsi helia s kyslíkem⁴⁵. Dalším zvýšením teploty a oxidací kyslíkem jsou vypáleny z filtru poslední zbytky uhlíku. Ideálně už by neměl být v druhé části procesu na filtru zachycen žádný OC, prakticky však při zahřátí nejstálejších organických sloučenin vzniká tzv. pyrolytický uhlík (PC) charakteristický svou tmavou barvou. PC je uvolněn až společně s EC, pro odlišení PC od EC tak musí být stanoven tzv. dělicí bod. K tomu je využita právě nižší průchodnost světla skrz PC: Od začátku analýzy je měřena transmitance⁴⁶ červeného laseru prosvěčujícího vzorek. S postupnou tvorbou PC transmitance klesá až do opětovného vypálení kyslíkem. Množství EC je stanovováno až od dělicího bodu, jež je definován jako okamžik, kdy transmitance má stejnou hodnotu jako na počátku analýzy. Všechn uhlík uvolněný před dělicím bodem je považován za organický, po dělicím bodě za elementární. Dělicí bod je určován automaticky pro každou analýzu zvlášť. Finálním krokem celého procesu je analýza 5% směsi helia a methanu sloužící jako vnitřní standard přístroje. Data jsou pak zpracována vyhodnocovacím softwarem. Pro ověření celkové správnosti měření je vhodné v pravidelných intervalech provádět kalibraci pomocí definovaného roztoku sacharózy.

Ne všechny přístroje využívají v průběhu analýzy stejné časové intervaly a teploty, kterým je vzorek vystavován, tzv. teplotní protokoly. Ideálně by měly všechny teplotní protokoly identifikovat dělicí bod stejně, reálně však byly pozorovány rozdíly. Pro všechny pozadřové stanice v EU byl proto schválen jednotný protokol EUSAAR2. Pro minimalizaci času, kdy přístroj zahřívá filtr a neshromažďuje na něj data, se často používá zkrácená verze EUSAAR2_short, takto byla získána i data diskutována v této práci. Průběh tohoto protokolu je znázorněn na obr. 9. V průběhu zahřívání vzorku se teplota nezvyšuje lineárně, nýbrž po krocích. Při každém zvýšení teploty se ze vzorku nejprve uvolní určitá část organického uhlíku podle jeho teplotní stability. Tímto způsobem jsou odlišeny frakce organického uhlíku od nejtěkavějšího OC1 až po nejstálejší OC4, po přidání kyslíku do reakční atmosféry se uvolňuje PC a po dělicím bodě dále EC.

⁴⁴ Nondispersive Infrared Sensor (NDIR) pracuje opět na principu Lambert-Beerova zákona, pracuje tedy s pohlcováním světla určité vlnové délky při průchodu vzorkem.

⁴⁵ Koncentrace kyslíku v přístroji je pouze okolo 2%

⁴⁶ Veličina transmitance popisuje množství světla určité vlnové délky, které projde daným prostředím.



Obr. 9: Průběh analýzy v použitém protokolu EUSAAR2_short. V hranatých závorkách je vždy uvedena teplota, na níž je filtr zahřát, a čas trvání daného teplotního programu. (Vodička, Schwarz, 2017, s. 356)

Celkově dosahují přístroje dobré přesnosti, výraznější odchylky mezi daty z 2 přístrojů (až 24 %) nastávají až v případě velmi nízkých koncentrací, proto jsou použity 4hodinové měřicí cykly, aby došlo k dostatečnému nashromáždění AA na filtr (Vodička, Schwarz, 2017, s. 354-362).

2.1.4 Metody PSCF a CBPF

Metody Potential Source Contribution Function (PSCF) a Conditional Bivariate Probability Function (CBPF) slouží k charakterizaci transportu polutantů.

PSCF slouží ke stanovení trajektorie, po níž se znečištěná masa pohybuje, a umožňuje tak přibližnou identifikaci regionu, ze které znečištění pochází. Cílem metody je vyjádřit pravděpodobnost, zda vzduchová masa s koncentrací sledovaných látek vyšší než nastavené kritérium dorazí do měřicí lokality měření poté, co byla zaznamenána nad určitou oblastí (Lhotka, 2019, s. 40). Výpočet PSCF je dán vztahem (12),

$$PSCF_{i,j} = \frac{(m_{i,j} | [x] \leq C)}{n_{i,j}} \quad (12)$$

v němž $n_{i,j}$ udává počet případů, kdy koncový bod trajektorie náleží na území i, j na mřížce domény, $m_{i,j}$ indikuje počet případů, kdy naměřená koncentrace C překračuje či je rovna stanovené prahové koncentraci.

Pro výpočet zpětných trajektorií byl použit model Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPPLIT) vyvinutý Národním úřadem pro oceán a atmosféru (NOAA – National

Oceanic and Atmospheric Administration) (NOAA National Centers for Environmental Information, HYSPLIT). Jako podklad pro výpočet sloužil Global Data Assimilation System (GDAS). V rámci tohoto systému jsou do rastrováního trojrozměrného modelu ukládána data z meteorologických stanic, meteorologických balonů, letadel, plovoucích bójí i radarových a satelitních pozorování (NOAA National Centers for Environmental Information, GDAS). Trajektorie generované pro tuto práci jsou modelovány na základě dat odebraných v 2:00, 6:00, 10:00, 14:00, 18:00 a 22:00 UTC, model pracoval s výškou 100 m nad povrchem Země. Trajektorie byla generována v 96hodinovém časovém rozlišení. Výsledek modelu HYSPLIT byl následně importován do programu TrajStat, kde byla provedena statistika trajektorií.

CBPF vyčísluje pravděpodobnost zvýšené koncentrace polutantů na daném území v závislosti na W_s a W_d a indikuje potenciál daného zdrojového regionu přispívat k naměřenému znečištění. Cílem metody je tedy zjištění příspěvku lokálních zdrojů k celkově naměřeným polutantům. Hodnota CBPF je určena vztahem (13),

$$CBPF_{\Delta\theta, \Delta v} = \frac{(m_{\Delta\theta, \Delta v} | [x] \leq C)}{n_{\Delta\theta, \Delta v}} \quad (13)$$

kde $m_{\Delta\theta, \Delta v}$ je počet měření, u nichž byla zaznamenána koncentrace C polutantu vyšší nebo rovna stanovené prahové hodnotě, v této práci byl použit jako hraniční 0,75 percentil, $n_{\Delta\theta, \Delta v}$ je celkový počet měření, proměnné se vztahují k větrnému sektoru $\Delta\theta$ s rychlostí větru v intervalu Δv (Masiol et al., 2019, s. 725-726). Proměnná Δv poskytuje bližší charakteristiku zdroje pozorovaného znečištění⁴⁷ (Uria-Tellaetxe a Carslaw, 2014, s. 2).

2.1.5 Zpracování datového souboru

Data získaná z výše popsaných přístrojů byla zpracovávána nejprve v Microsoft Office Excel. V souboru byly v prvním kroku nahrazeny nulové hodnoty, které byly automaticky generovány, pokud přístroj neměřil, prázdnými poli tabulky, což umožnilo další zpracování. V tomto programu byly rovněž spočítány průměry a směrodatné odchylky ze získaných hodnot. Protože v letních měsících klesala koncentrace EC pod úroveň detekce OC/EC analyseru⁴⁸ pod $0,113 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (Mbengue et al., 2018, s. 337), byly tyto hodnoty vyřazeny (celkem 62 měření, převážně během léta 2018). Takto byla připravena datová matice pro program RStudio, package openair (Carslaw a Ropkins, 2012), kde byla data dále zpracovávána do grafů, byly vyčísleny Pearsonovy korelační koeficienty a pomocí funkcí PSCF a CBPF dopočítány trajektorie dálkového přenosu polutantů.

V kapitolách 2.2.2 a 2.2.3 jsou diskutována data, která vznikla zprůměrováním každé veličiny všech let měřicí kampaně do jediného průměrného roku. Průměrný rok byl vypočten v MS Excel a následně importován do programu RStudio. Toto zprůměrování umožňuje zobrazit trendy a relativní závislosti daných veličin mezi částmi roku, vzhledem k opakovanému průměrování mají však tato data nižší absolutní přesnost. Analýza polutantů v průběhu dne a týdne (2.2.4

⁴⁷Přidání proměnné Δv k větrnému sektoru $\Delta\theta$ dává metodě přívlastek bivariační.

⁴⁸ Přístroj tento údaj sice zaznamená, nicméně hodnota poměru OC/EC je irelevantně vysoká relativně ke zbytku měření.

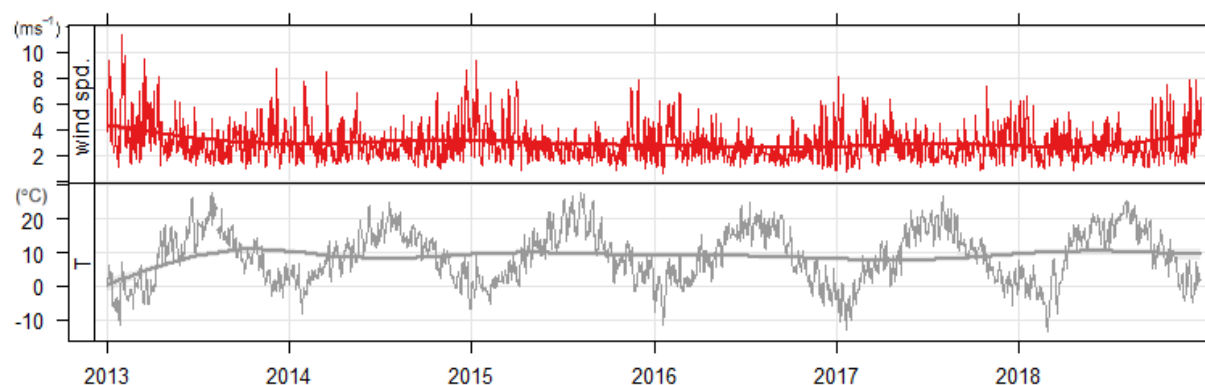
a 2.2.5) je provedena pomocí programu RStudio. Sběr dat začal vždy v 2:00 UTC,⁴⁹ měření probíhala ve 4hodinových intervalech.⁵⁰

Pro lokaci potenciálně výrazných zdrojových lokalit byla využita funkce PSCF, charakteristika závislosti naměřených koncentrací na rychlosti a směru větru byla provedena pomocí funkce CBPF (viz 2.1.4). Pro výpočet těchto funkcí byl použit program Igor s balíčkem ZeFir (Petit et al, 2017), do nějž byla importována data z Excelu.

Následující tab. 2 shrnuje průměrné hodnoty T a W_s pro dané období, vývoj těchto veličin je zanesen v grafu na obr. 10. Pro celé časové období byla vykreslena větrná růžice na obr. 11.

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Průměr T [°C]	7,97	9,35	9,51	8,49	8,42	9,48
Průměr W_s [$m \cdot s^{-1}$]	3,43	2,95	2,92	2,63	2,81	2,95

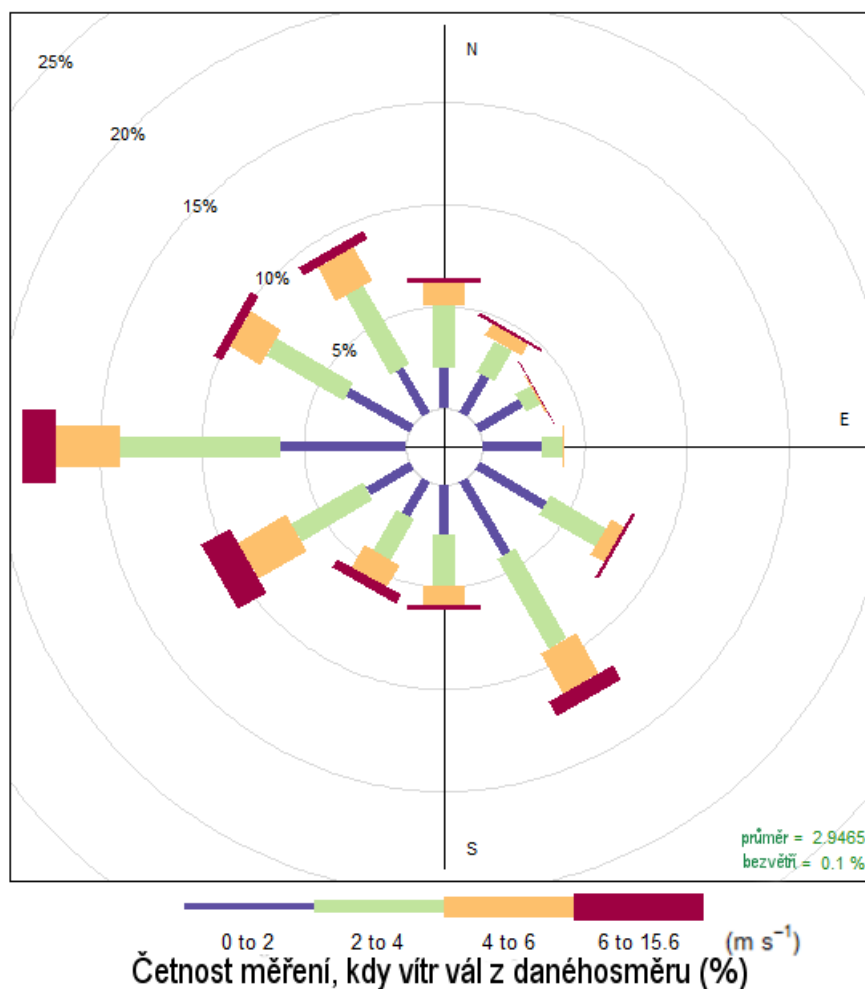
Tab. 2: Přehled průměrných teplot a rychlostí větru



Obr. 10: Vývoj průměrných denních T[°C] a W_s [$m \cdot s^{-1}$] v průběhu sledovaného období (Carslaw a Ropkins, 2012)

⁴⁹ V místním čase tedy měření začínala v 3:00 v období zimního času a 4:00 v období letního času

⁵⁰ Další měření tedy proběhla v 6:00; 10:00; 14:00; 18:00 a 22:00.



Obr. 11: Větrná růžice (Carlaw a Ropkins, 2012)

Nejchladnější průměrné T byly zaznamenány v roce 2013, kdy průměr činil $7,97\text{ }^{\circ}\text{C}$. Poté průměrné T postupně rostly až k roku 2015 (průměr $T = 9,51\text{ }^{\circ}\text{C}$), který byl průměrně nejteplejší v celém sledovaném období. Po tomto chladnějším období let 2016 a 2017 teplota stoupla o více než $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2018 se stává druhým nejteplejším za sledované období. Naměřená data se přibližně shodují s průměrnými hodnotami uvedenými ČHMÚ pro tuto oblast (Český hydrometeorologický ústav, Územní teploty). V oblasti jasně dominují západní větry, výrazněji se objevuje rovněž vítr jihovýchodní. Největřnějším byl rok 2013, např. v prosinci tohoto roku prošel Evropou orkán Xaver (Vrabec et al., 2014, s. 27).

Aby byla zajištěna spolehlivá přesnost přístrojů, je prováděna pravidelná kalibrace a údržba. V průběhu podobných operací však přístroje neshromažďují data, tudíž byl v celém datovém souboru stanoven podíl neprovedených měření k předpokládanému počtu měření,⁵¹ jehož hodnoty jsou zaneseny do tab. 3:

⁵¹ Vyřazené hodnoty EC nejsou brány jako neprovedená měření.

PM ₁₀	PM _{2,5}	EC	OC	AA
5,39 %	3,1 %	33,89 %	33,24 %	20,8 %

Tab. 3: Zastoupení neprovedených měření v souboru dat

Mezi hlavní příčiny výpadků měření patří technické závady, u *OC/EC Analyzery*, kde je procento neprovedených měření nejvyšší, se jedná např. o prasknutí vzorkovací pece nebo poruchu NDIR detektoru. Pro zaručení dostatečné přesnosti měření je prováděna kalibrace, kdy je na filtr nanášeno definované množství známého roztoku sacharózy. Při kalibraci rovněž neprobíhal sběr dat. Údržbu podstupují i další přístroje, např. u SMPS je čištěna elektroda, u CPC je kalibrován průtok. V datovém souboru je s jedinou výjimkou léta 2015, kdy došlo k více než tříměsíčnímu výpadku v datech z *OC/EC Analyzery*, zachováno zastoupení jednotlivých ročních období, výpadky tedy nezakrývají průměrné trendy ve zjištěných koncentracích, na které se práce soustředí.

Jelikož měření bylo zahájeno až v březnu 2013, nejsou části roku 2013 obsahující měsíce leden a únor zahrnovány do celkových průměrů a srovnávány s ostatními obdobími, v datových tabulkách jsou psány *kurzívou*. Od 10. října až do konce tohoto roku navíc chybí data o koncentraci AA. Také průměry hodnot EC, OC a TC zahrnující letní období 2015 jsou označeny *kurzívou* a nejsou porovnávány a průměrovány s ostatními roky.

2.2 Výsledky a diskuze

Datový soubor je hodnocen postupně v rozlišení jednotlivých let, teplých a studených polovin roku, ročních období, týdnů a dnů. Naměřené hodnoty včetně směrodatných odchylek jsou vyneseny v tabulkách, souběžně jsou podrobněji vyčísleny Pearsonovy korelační koeficienty a v 2.2.6 spočítány trajektorie transportu částic.

2.2.1 Charakteristika v rozlišení jednotlivých let

Nejprve je analyzované celkové období s cílem nalezení základních trendů v datovém souboru, hodnoty sledovaných veličin jsou vyneseny do tab. 4, graficky zpracovány na obr. 12, korelační koeficienty do obr. 13. V průběhu zkoumaného období se průměrné roční koncentrace TC [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] měnily zejména ve vztahu k T ($r = -0,3$), se zvyšováním průměrné roční teploty tedy docházelo k poklesu průměrných koncentrací TC. I na pozadové lokalitě má tedy na složení vzduchu klíčovou roli antropogenní činnost, konkrétně domácí vytápění. Trendu odpovídá stabilně nejchladnější rok 2017 s vysokou hodnotou TC ($TC = 3,50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$). Velmi silně koreluje EC a OC, ($r = 0,83$), z toho je možno vyvodit, že oba mají společný hlavní zdroj, tedy spalovací procesy (viz 1.1.4). OC [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] má však o přibližně 37 % nižší absolutní hodnotu korelačního koeficientu s T než EC [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] (pro OC $r = -0,26$; pro EC $r = -0,41$). Faktorem ovlivňujícím složení ovzduší v oblasti je tak i proces tvorby sekundárního OC, který nastává při teplejším počasí. Dokládá to rok 2018 s vysokou průměrnou T i

nejvyšší směrodatnou odchylkou T svědčící o vlnách letních veder. Tento rok byla zaznamenána nejvyšší průměrná hodnota OC i TC ($TC = 4,08 \mu g \cdot m^{-3}$).⁵² V průměrně teplejších letech je koncentrace TC relativně vyšší, protože se zimní TC ještě sečte s letním sekundárním OC. To platí pro roky 2018, 2014 a 2016 seřazené podle klesající průměrné T a zároveň klesající koncentrace TC. Zřetelná je souvztažnost poměru OC/EC s T ($r = 0,44$), což je dalším z ukazatelů antropogenního původu EC, neboť tento poměr má nejnižší hodnoty při nejvyšší T, a tudíž nejintenzivnějším domácím vytápění. Již diskutovaný rok 2018 má nejvyšší průměrnou hodnotu OC/EC. OC byla v průběhu celého sledovaného období bez ohledu na svůj původ hlavní složkou TC v ovzduší, což plyne z vysoké korelace těchto dvou veličin ($r = 0,99$), TC koreluje s EC o něco méně ($r = 0,89$).

Koncentrace AA [(počet částic) $\cdot cm^{-3}$] vykazuje kladnou souvztažnost s T ($r = 0,30$). To pravděpodobně poukazuje na vliv procesu nukleace, která by mohla nastat při vysoké T nad okolními jehličnatými lesy (viz 1.1.2). Jelikož takto vzniklé částice náleží k velmi jemné frakci, je jejich hmotnost velmi malá, pročež není pozorována zřetelná korelace AA s PM [$\mu g \cdot m^{-3}$] (viz rovnice 5). Rok 2017 má spolu s nejnižší T i nejnižší koncentraci AA, naopak roky s nadprůměrnou teplotou mají i nadprůměrné koncentrace AA, nejteplejší rok 2015 má koncentraci AA nejvyšší (3959 částic na m^3). TC je zastoupen v PM_{2,5} z 34 %, tyto dvě hodnoty spolu velmi výrazně korelují ($r = 0,74$), což může svědčit o významných společných zdrojích (k PM_{2,5} může kromě organických produktů spalování přispívat i např. uhlík neobsahující popílek). Korelace T a PM_{2,5} je však méně zřetelná ($r = -0,18$),⁵³ PM_{2,5} má tedy pravděpodobně i jiné důležité zdroje než zimní vytápění.

Všechny sledované koncentrace vykazují zápornou korelaci s rychlostí větru, který mícháním vzdušných mas rozptyluje částice do větších objemů vzduchu. Dokonce i PM₁₀, na jehož koncentraci by se mohla výrazně podílet větrná eroze, následuje tento trend ($r = -0,23$), větrná eroze pravděpodobně není z dlouhodobého hlediska klíčovým činitelem determinujícím prašnost. Vliv W_s přesto není zcela zanedbatelný, rok 2018, který má nejvyšší průměrnou hodnotu PM₁₀ ($22,63 \mu g \cdot m^{-3}$), je druhým největrnějším rokem a tento rok je také nejvyšší hodnota rozdílu PM₁₀ – PM_{2,5} charakterizujícím mod hrubých částic. Naopak nejméně větrný rok 2016 má průměrnou PM₁₀ nejnižší ($16,40 \mu g \cdot m^{-3}$).

Průměrná hodnota TC naměřená za toto období ($3,62 \mu g \cdot m^{-3}$) přibližně odpovídá průměru z roků 2013-2016 ($3,54 \mu g \cdot m^{-3}$) vypočítaném z dat dle Mbengue et al., 2018, s. 338. Průměrný naměřený poměr OC/EC (5,35) je rovněž v souladu s poměrem stanoveným Mbengue et al., 2018, s. 338 (5,00). Citovaná publikace mj. dává výsledky svých pozorování do souvislosti s tvorbou sekundárního OC a transportu částic na stanici z okolí, čímž vysvětluje relativně vyšší poměr OC/EC, než je pro venkovské oblasti obvyklý.

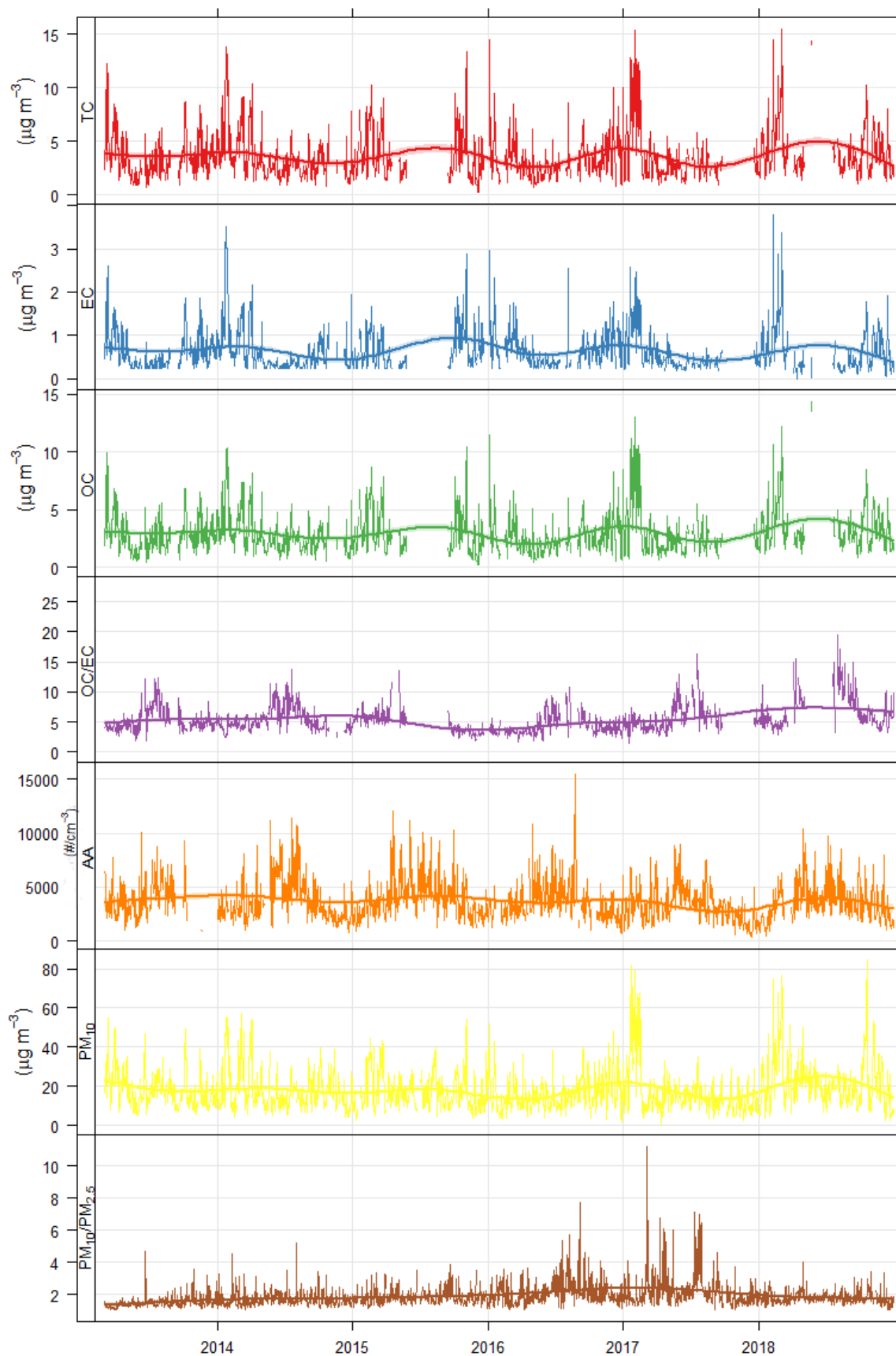
⁵² K podobné periodě zvýšené tvorby OC pravděpodobně došlo i v nejteplejším roce 2015. Měření však tehdy přibližně od června do poloviny září zasáhl výrazný výpadek OC/EC analyzery a data o případném výkyvu tak chybí.

⁵³ Tedy o 60 % méně než korelace mezi T a TC.

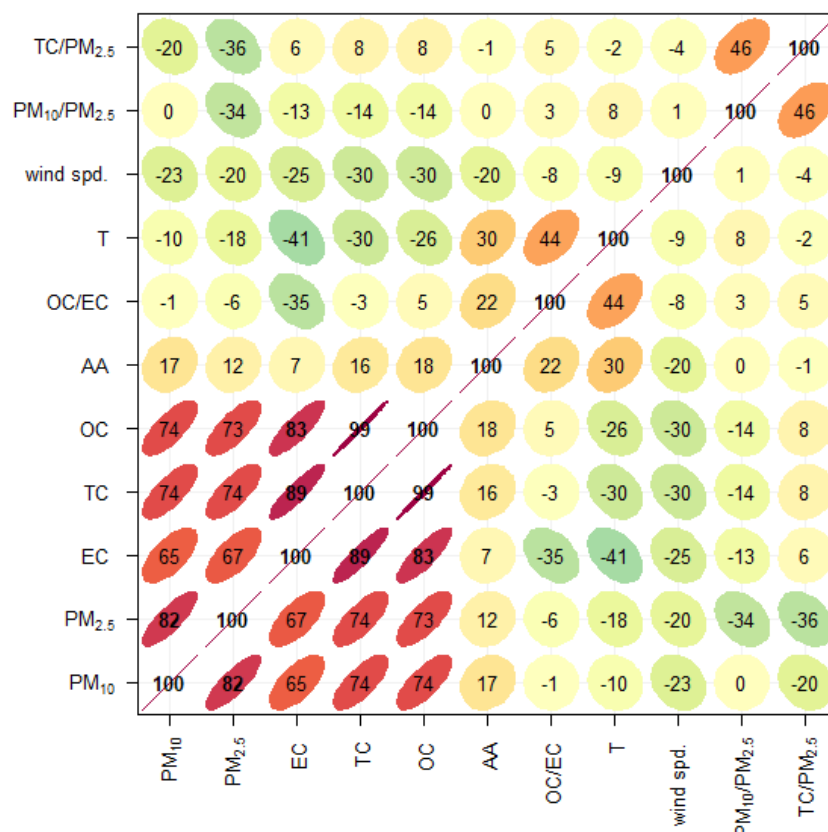
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Průměr
T [°C]	9,94 ±7,86	9,24 ±7,31	9,51 ±8,12	8,49 ±8,22	8,42 ±6,45	9,49 ±9,21	9,03 ±7,86
W_s [m·s ⁻¹]	3,26 ±1,84	2,80 ±2,23	2,92 ±1,72	2,63 ±1,40	2,80 ±2,40	2,95 ±1,67	2,82 ±1,88
AA [(počet částic) cm ⁻³]	4056 ±2563	3738 ±2969	3959 ±2580	3662 ±2423	3168 ±213	3658 ±2184	3637 ±2073
TC [μg·m ⁻³]	3,54 ±2,22	3,48 ±2,50	3,69 ±2,65	3,27 ±2,13	3,50 ±0,46	4,08 ±2,61	3,62 ±1,73
OC/EC	5,24 ±2,28	5,37 ±3,20	4,81 ±1,97	4,34 ±1,96	5,59 ±0,35	6,60 ±3,21	5,51 ±1,84
PM₁₀/PM_{2,5}	1,45 ±0,67	1,59 ±0,83	1,74 ±0,89	1,83 ±1,45	1,81 ±0,16	1,68 ±0,80	1,73 ±0,83

Tab. 4 Přehled naměřených koncentrací⁵⁴ a směrodatných odchylek aerosolů a základních meteorologických veličin pro jednotlivé roky

⁵⁴ Jedná se o aritmetické průměry z naměřených hodnot pro celé období zaokrouhlených na 2 platné cifry.



Obr. 12: Průměrné denní hodnoty TC, EC, OC [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$], poměru OC/EC, AA [(počet částic) cm^{-3}], PM₁₀ [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] a poměru PM₁₀/PM_{2.5} (Carslaw a Ropkins, 2012).



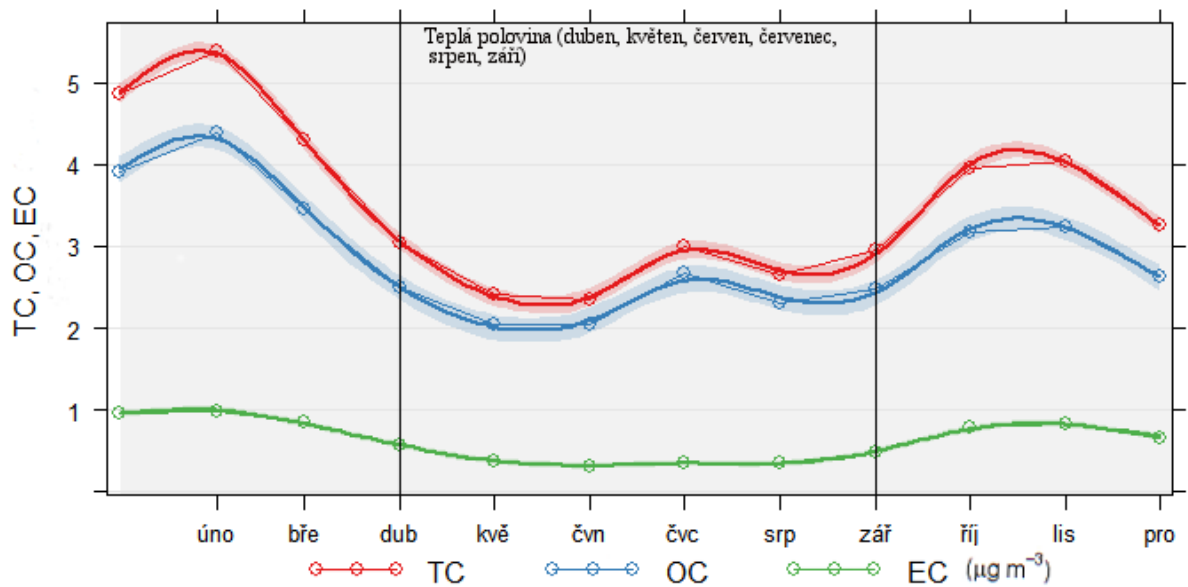
Obr. 13: Korelační koeficienty [%] mezi jednotlivými veličinami pro celé sledované období (Carslaw a Ropkins, 2012)

2.2.2 Charakteristika v rozlišení studených a teplých polovin roku

Rozdělení roku na jeho teplou a studenou polovinu je užito primárně za účelem sledování antropogenního vlivu plynoucího převážně z domácího vytápění. Úroveň tohoto znečištění závisí hlavně na T, při rozdělení roku na studené a teplé měsíce⁵⁵ jsou tyto změny dobře patrné. T má vliv nejen na úroveň domácího vytápění, ale ovlivňuje také chod mezní vrstvy atmosféry,⁵⁶ která dosahuje v chladném počasí menší mocnosti a méně se promíchává (Stull, 1988, s. 9; Von Engeln et al, 2013, s. 6583), protože se v ní polutanty snáze koncentrují. Teplá polovina je průměrně asi o 10 °C teplejší a o 0,42 m · s⁻¹ méně větrná. Jelikož chladná polovina zahrnuje měsíce končícího podzimu a počátek jara, dosahují směrodatné odchylky všech sledovaných veličin s výjimkou PM₁₀/PM_{2.5} v tomto období větších procentuálních odchylek.

⁵⁵ Studený (též zimní) půlrok: Měsíce leden, únor, březen, říjen, listopad, prosinec; vice versa. Jedná se o rozdělení již dříve použité za stejným účelem, např. Lhotka, 2019.

⁵⁶ Tento meteorologický termín označuje vrstvu vzduchu sahající přibližně 0,5 – 2 km nad zemský povrch, kde se projevuje přímá interakce vzduchové masy s terénem (Elektronický meteorologický slovník, heslo Vrstva atmosféry mezní).



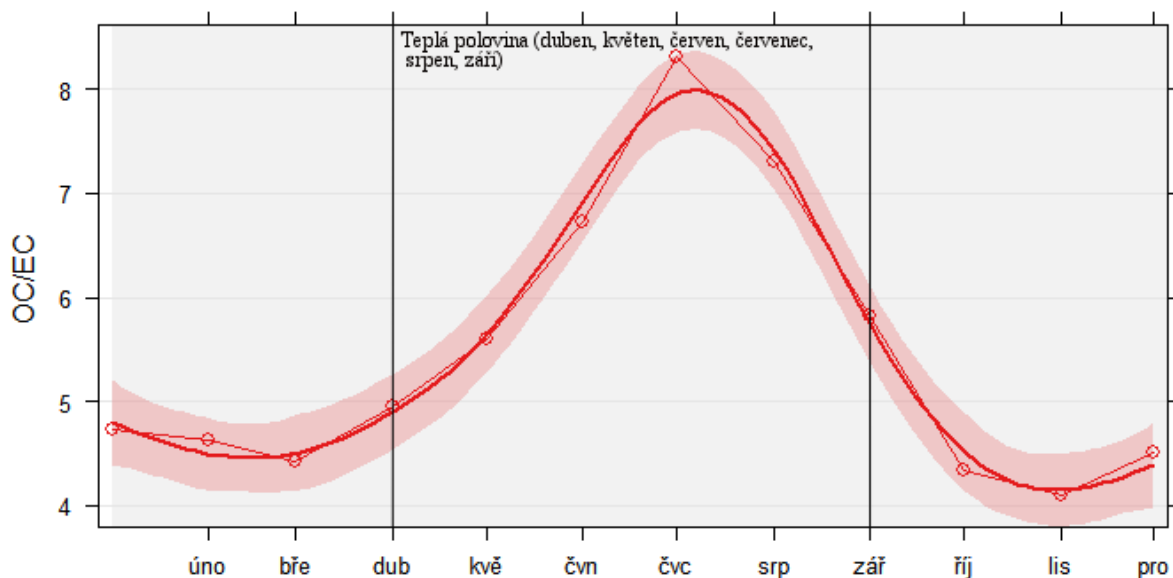
Obr. 14: Vývoj koncentrací TC, OC a EC [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012)

V průběhu studeného půlroku bylo naměřeno takřka o 35 % více TC než v průběhu půlroku teplého (obr. 14). Hodnota poměru OC/EC je o 46 % vyšší (obr. 15), neboť průměrné koncentrace EC v atmosféře v zimním období ($0,84 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) jsou více než 3krát vyšší než v létě ($0,27 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), viz obr. 14. To ukazuje na vliv spalovacích procesů na zjištěné hodnoty TC.⁵⁷ Ve studeném oproti teplému období jsou přibližně o 47 % vyšší i průměrné hodnoty OC (studená pol.: $3,45 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, teplá pol.: $2,34 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), vzhledem k chladným podmínkám a nízké aktivitě rostlin⁵⁸ se jedná z největší části o primární OC vznikající při hoření. V zimní polovině

⁵⁷ Výrazně převažujícím zdrojem EC je antropogenní spalování, viz 1.1.4.

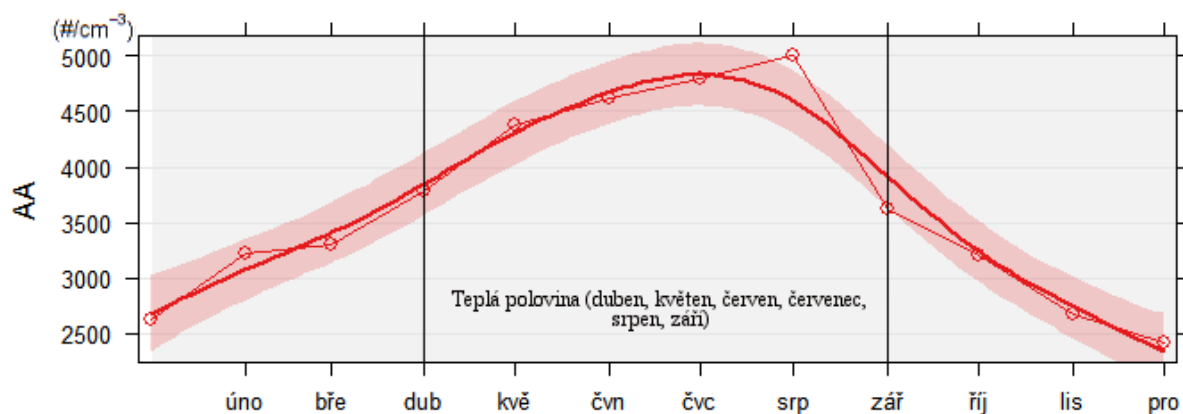
⁵⁸ Podmínky omezující tvorbu sekundárního OC

proto OC záporně koreluje s T ($r = -0,27$). V letní polovině se naopak jedná o souvztažnost kladnou ($r = 0,24$), což demonstruje odlišnost zdrojů pozorovaného OC.



Obr. 15: Vývoj poměru OC/EC v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012)

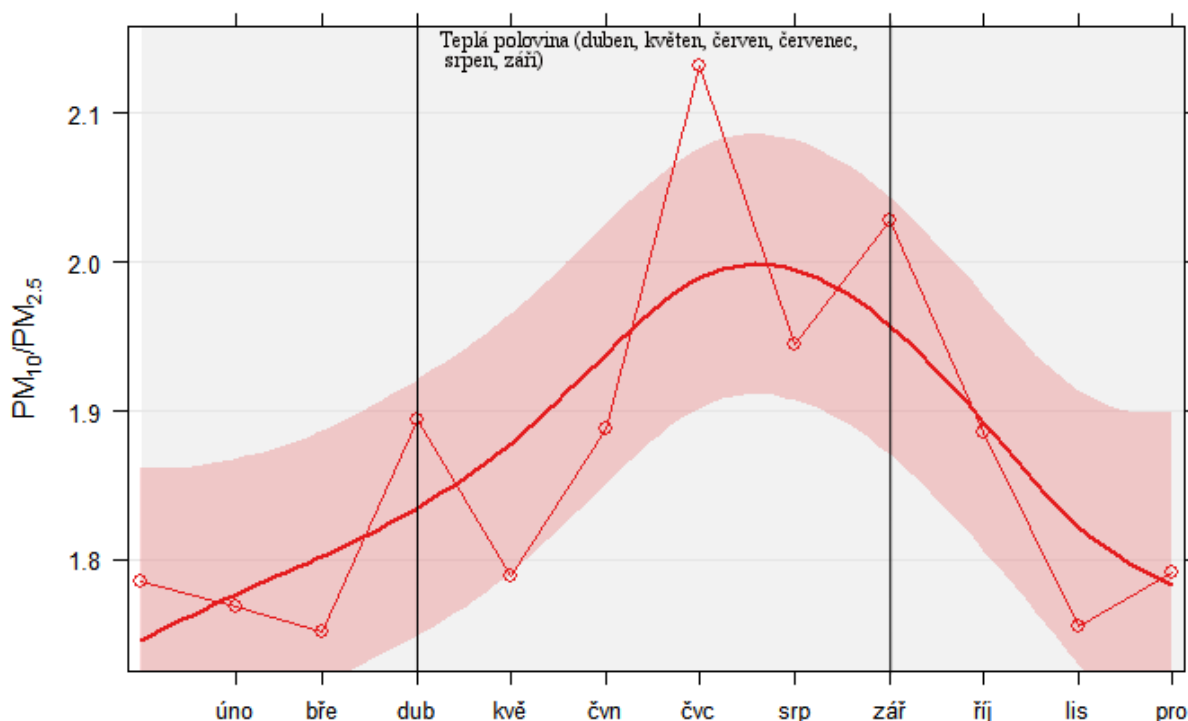
V chladné polovině roku je korelace AA a T takřka nulová, v teplé je již pozorovatelná ($r = 0,18$). To může nadále podporovat hypotézu významného vlivu nukleárních dějů v teplejších částech roku. Tento děj by rovněž mohl vysvětlovat nízké korelace AA s hmotnostními koncentracemi PM, TC i EC v létě, kdy vzniká velké množství malých částic zanedbatelné hmotnosti (viz 1.1.2). Tyto částice by měly být zejména organického původu, tomu odpovídá, že OC koreluje s AA ($r = 0,13$) silněji než EC, TC a PM. Oproti tomu ve studené polovině roku je korelace AA s PM i TC, EC a OC výrazně lépe znatelná ($r \approx 0,25$),⁵⁹ zaznamenávané částice tedy s velkou pravděpodobností tvoří i výraznější hmotnostní podíl, jsou tak větší a hmotnější než AA vzniklý nukleací v létě.



Obr. 16: Vývoj koncentrací AA [(počet částic) cm^{-3}] v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012)

⁵⁹ Průměr korelačních koeficientů pro tyto veličiny s AA.

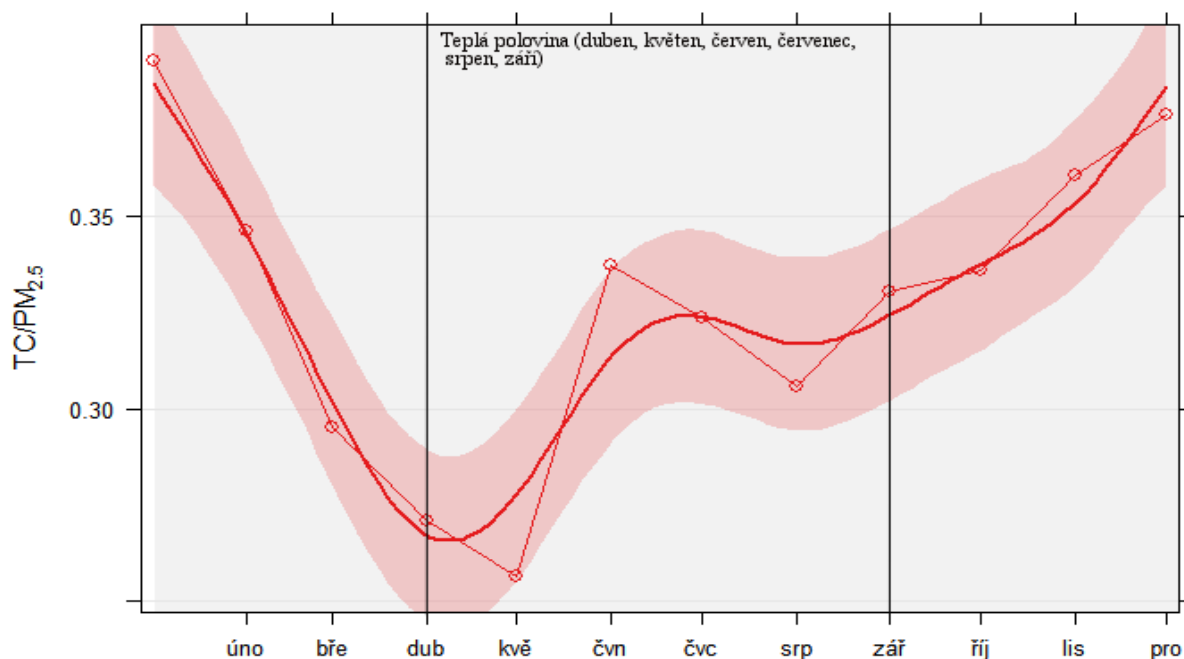
Vlivem nukleačních dějů je v teplé polovině roku v atmosféře o takřka 53 % větší počet částic (obr. 16). Jelikož jsou tyto částice velmi malé (viz obr. 2), tvoří velkou část PM v létě hrubý prach zejména mechanického původu (průměrně $PM_{10}/PM_{2,5} = 1,95$ pro teplou). Naopak v chladné polovině jsou hlavním zdrojem PM spalovací procesy, které produkují jemnější frakci PM (průměrně $PM_{10}/PM_{2,5} = 1,80$ pro studenou) (obr. 17). Absolutní koncentrace hrubých částic ($PM_{10}-PM_{2,5}$) je v teplé polovině průměrně $7,38 \mu g \cdot m^{-3}$ a ve studené $7,35 \mu g \cdot m^{-3}$, podíl těchto částic je v teplé polovině roku 39 %, ve studené 35 % (tedy o 9 % méně než v létě)



Obr. 17: Vývoj poměru $PM_{10}/PM_{2,5}$ v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012)

V teplé polovině roku se hodnota PM zvyšuje spolu s T ($r = 0,24$ pro PM_{10}), zároveň je v tomto období nižší zastoupení TC na celkovém $PM_{2,5}$ (pro teplou polovinu $TC/PM_{2,5} = 32\%$, pro studenou 36 %) (obr. 18). V tomto období je tedy většina PM anorganického původu⁶⁰ a vzniká buď resuspenzí (např. z okolních polí) při horkém letním počasí, nebo při procesech konverze plyn-částice (viz rovnice 2; 3).

⁶⁰ Z chemického hlediska bude pravděpodobně silně zastoupen dusičnan amonný (viz 1.1.1).



Obr. 18: Vývoj zastoupení TC na celkovém PM_{2,5} v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012).

Oproti tomu v chladném období PM s teplotou koreluje záporně ($r = -0,22$ pro PM₁₀). V obou částech roku PM záporně koreluje s W_s , protože vítr rozptyluje částice do většího objemu vzduchu. V letním období je absolutní hodnota této korelace nižší ($r = -0,14$ pro PM₁₀), což je v souladu s hypotézou o vzniku PM₁₀ resuspenzí a erozí vyvolávanou větrem. Absolutní koncentrace PM₁₀ i PM_{2,5} jsou pro teplé období o 15,5 %, ($16,80 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} / 19,88 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) potažmo o 23,8 % ($10,96 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} / 14,39 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) nižší oproti období studenému. Antropogenní vlivy jsou tedy pro roční vývoj PM nejdůležitější.

Nejchladnější zimní polovina byla zaznamenána v roce 2016 (3,05 °C), nejteplejší naopak rok 2014 s T takřka 2krát vyšší (6,03 °C). Nejchladnější rok 2016 má také nejnižší hodnotu poměru OC/EC (3,69), což poukazuje na zvýšené vytápění v této sezoně. Teplotně podprůměrná studená polovina roku 2018 je naopak charakteristická zvýšenou hodnotou TC ($3,96 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$). Zajímavá jsou data naměřená roku 2013, který byl nadprůměrně chladný a větrný, má velmi vysoké koncentrace AA i TC,⁶¹ nejvyšší absolutní průměrnou hodnotu OC a vysoký podíl částic jemné frakce. Tato odchylka je vysvětlitelná transportem polutantů na velkou vzdálenost ze znečištěných oblastí a dalších „hot-spot“ lokalit.⁶²

Nejteplejší teplá polovina roku byla zaznamenána v roce 2018,⁶³ kdy T vystoupala takřka 2°C nad celkový průměr (16,57°C). V tomto období lze usuzovat na výraznou tvorbu sekundárního AA: Hodnota poměru OC/EC stoupla oproti celkovému průměru o více než polovinu (9,67). Podobně průměrná hodnota TC je nejvyšší ($3,08 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), jeho hodnota je srovnatelná se

⁶¹ Zaznamenána nejvyšší průměrná hodnota OC v chladném půlroce, $3,54 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ a druhá nejvyšší průměrná hodnota EC, $0,85 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

⁶² Přívlástek „hot-spot“ je používán pro místa s intenzivní tvorbou polutantů, jakou je např. Ostravsko.

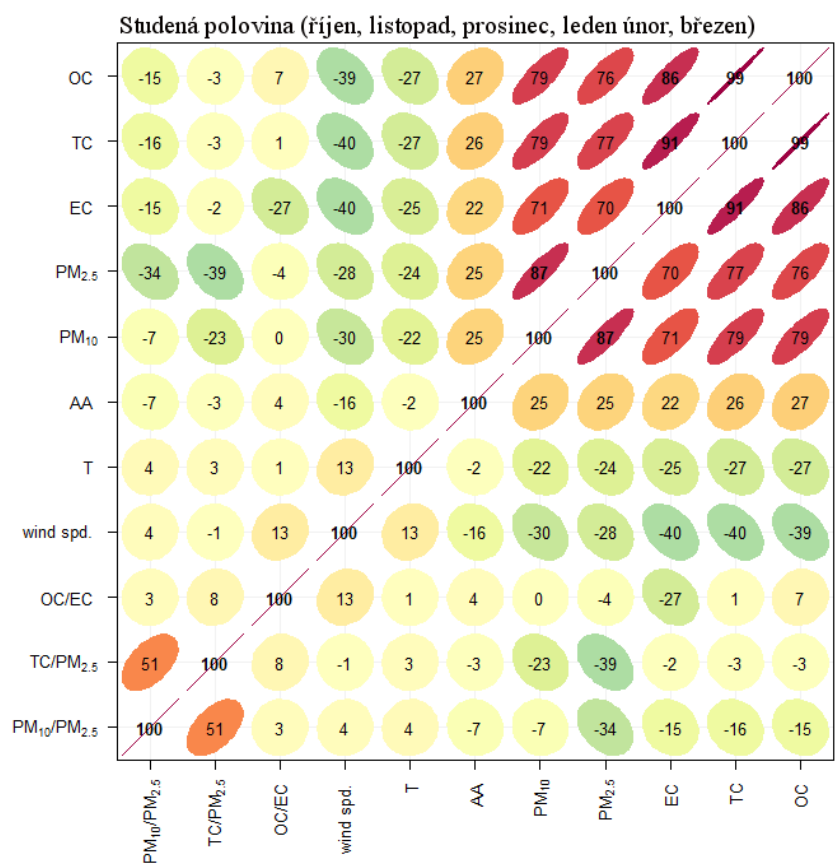
⁶³ K podobné periodě zvýšené tvorby OC pravděpodobně došlo i v další teplé sezoně 2015, která je zároveň charakteristická vysokou směrodatnou odchylkou poukazující na vlny veder. Měření v tomto roce byla přibližně od června do poloviny září zasažena výrazným výpadkem OC/EC analyseru.

zimním obdobím. Koncentrace EC v této periodě často klesaly pod hodnotu měřicího limitu přístroje (absolutní koncentrace $EC = 0,32 \mu g \cdot m^{-3}$ je nejnižší zaznamenaný průměr pro letní období), což svědčí o minimálním antropogenním příspěvku k celkovým koncentracím EC. Naopak poměr $PM_{10}/PM_{2,5}$ klesl vzhledem k velikosti frakce sekundárního OC pod celkový průměr. Nejchladnější je letní perioda 2013, kdy přesto byla zaznamenána druhá nejvyšší koncentrace TC, vysoký podíl EC (absolutní koncentrace $EC = 0,45 \mu g \cdot m^{-3}$ je po roce 2016 druhá nejvyšší), a zastoupení frakce $PM_{2,5}$ je nejvyšší dokonce i v porovnání se zimními periodami. Tato teplá polovina je zároveň největrnější, proto lze, stejně jako v chladném období, uvažovat o dálkovém transportu znečištění.

Hodnoty sledovaných veličin pro teplé a studené poloviny jsou vyneseny v tab. 5 a 6, korelační koeficienty jsou na obr. 19 a obr. 20.

		2013	2014	2015	2016	2017	2018	Průměr
Studená polovina	T	3,66 ±5,26	6,03 ±5,09	5,72 ±4,29	3,05 ±4,59	4,91 ±1,59	4,31 ±5,68	4,80 ±4,25
	W _s	3,69 ±2,14	3,19 ±1,91	3,01 ±1,95	2,71 ±1,41	3,00 ±1,53	3,44 ±1,99	3,07 ±1,76
	AA	4018 ±2384	2717 ±1484	3220 ±2153	2733 ±1513	2276 ±1560	3384 ±6434	2866 ±2629
	TC	4,38 ±2,59	3,79 ±2,62	3,95 ±2,89	3,75 ±2,28	2,98 ±1,59	3,96 ±2,19	3,69 ±2,31
	OC/EC	4,51 ±1,44	4,13 ±1,30	3,95 ±1,65	3,69 ±1,24	4,48 ±1,79	5,46 ±1,53	4,34 ±1,50
	PM ₁₀ /PM _{2,5}	1,49 ±0,80	1,51 ±0,81	1,70 ±0,84	1,68 ±1,22	1,60 ±1,42	1,65 ±0,89	1,63 ±1,04

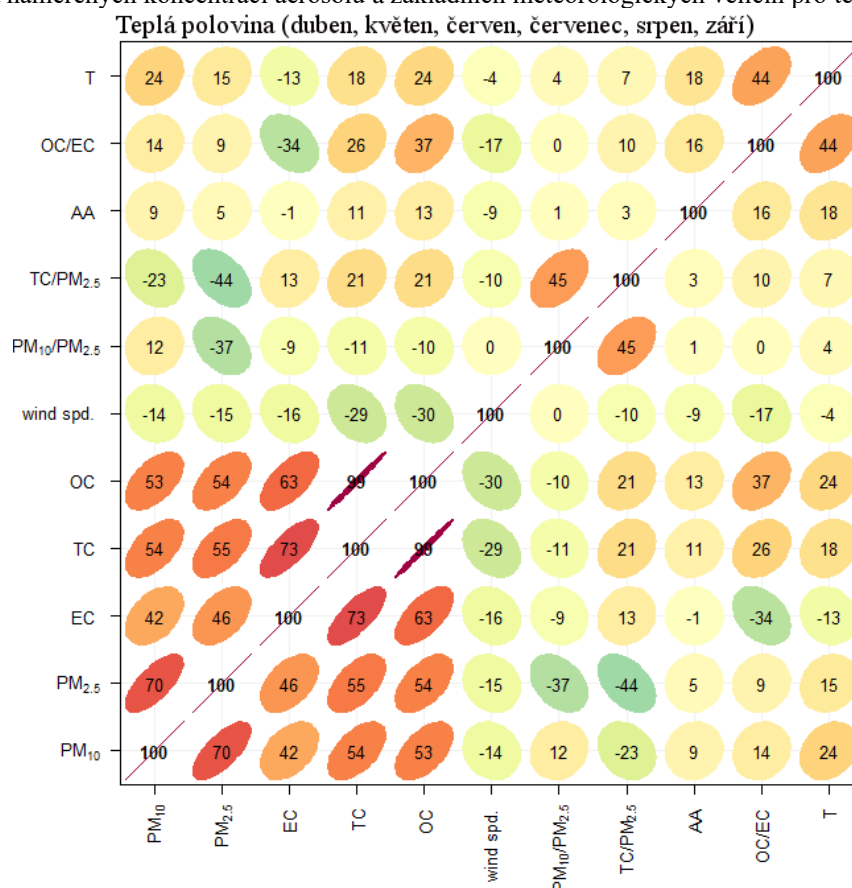
Tab. 5: Přehled naměřených koncentrací aerosolů a základních meteorologických veličin pro studený půlrok



Obr. 19: Korelační koeficienty [%] mezi jednotlivými veličinami pro studenou polovinu roku (Carslaw a Ropkins, 2012)

		2013	2014	2015	2016	2017	2018	Průměr
Teplá polovina	T	14,08 ±6,42	14,15 ±5,45	15,06 ±6,96	14,73 ±5,88	14,34 ±6,29	16,57 ±5,61	14,82 ±6,18
	W _s	2,97 ±1,55	2,70 ±1,37	2,57 ±1,23	2,35 ±1,10	2,58 ±1,25	2,66 ±1,32	2,64 ±1,32
	AA	4065 ±2605	4886 ±3684,14	4863 ±2824	4466 ±2813	3789 ±2268	4203 ±2390	4379 ±2818
	TC	2,84 ±1,54	2,80 ±1,61	2,43 ±1,19	2,65 ±1,48	2,53 ±1,21	3,08 ±1,61	2,72 ±1,44
	OC/EC	5,86 ±2,64	6,35 ±2,64	5,83 ±2,38	5,11 ±2,29	6,31 ±2,93	9,67 ±3,38	6,52 ±2,71
	PM ₁₀ /PM _{2,5}	1,43 ±0,57	1,62 ±0,73	1,79 ±0,92	2,01 ±1,65	2,00 ±1,71	1,72 ±0,76	1,76 ±1,16

Tab. 6 Přehled naměřených koncentrací aerosolů a základních meteorologických veličin pro teplý půlrok



Obr. 20 Korelační koeficienty [%] mezi jednotlivými veličinami pro teplou polovinu roku (Carslaw a Ropkins, 2012)

2.2.3 Charakteristika v rozlišení ročních období

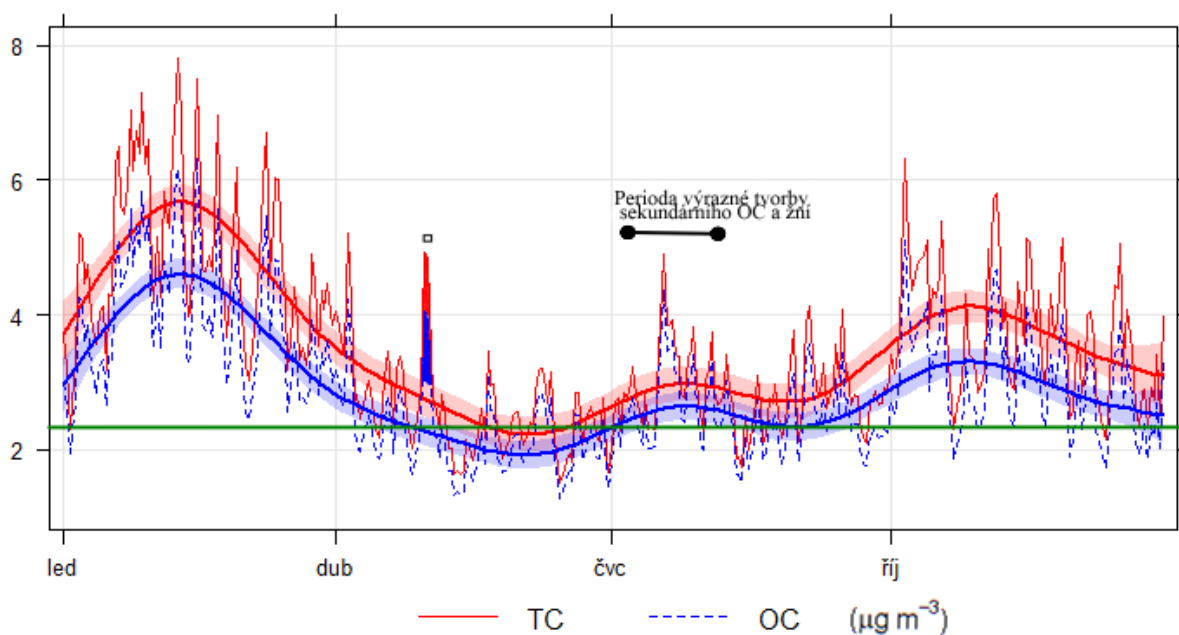
Analýza celého roku v nejpodrobnějším rozlišení ročních období⁶⁴ je prováděna za účelem ověření, doplnění a rozšíření již dříve diskutovaných trendů. Zvolené dělení by mělo nejněvčetněji reflektovat přírodní děje v krajině v kombinaci s lidskou činností. V průběhu měřicí kampaně byly průměrné jarní teploty nižší než podzimní,⁶⁵ v průměru nejnižší

⁶⁴ Tzv. meteorologická roční období, jaro: březen, duben, květen; léto: červen, červenec, srpen; podzim: září, říjen, listopad; zima: prosinec, leden, únor

⁶⁵ Průměrná teplota na jaře byla ve více případech nižší než na podzim, i celkové průměry pro jaro jsou o 0,69°C nižší

byla zima (W_s $3,23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) následovaná jarním obdobím, naopak nejméně větrno bylo v létě. Při porovnání léta a zimy jsou dobře zřetelné trendy v chování TC, EC i OC popsané v 2.2.2. ve vztahu ke studené a teplé polovině.

V létě není složení vzduchu ovlivněno vytápěním, přesto je i v tomto období markantní korelace TC a EC ($r = 0,64$) i OC a EC ($r = 0,55$).⁶⁶ Byť jsou koncentrace EC v létě ($0,33 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) o takřka 62 % nižší než v zimě ($0,86 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), i v letním období pravděpodobně existuje nezanedbatelný společný zdroj EC a TC, tzn. spalovací procesy nebo dálkový transport polutantů (viz část 2.2.6.). Zelená čára v grafu ukazuje průměrnou koncentraci TC v červnu ($2,34 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), kdy průměrné denní T přestávaly klesat pod $13 \text{ }^\circ\text{C}$,⁶⁷ a vzduch není výrazně ovlivněn ani vytápěním, ani není pozorován výrazný vznik sekundárního OC. Průměrné červnové koncentrace (v grafu na obr. 21 je vložena na této koncentraci zelená čára) jsou tudíž pravděpodobně způsobeny ještě jinými zdroji nežli lokálním vytápěním nebo sekundárním OC. Jedná se pravděpodobně o TC z dálkového transportu nebo o polutanty z dopravy či průmyslové výroby vytvářejících stálou hladinu znečištění. Detailnějším určením zdrojů znečištění se zabývá 2.2.6.



Obr. 21: Chod denních koncentrací TC a OC [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012). Zajímavostí je vybarvený peak označený čtverečkem na přelomu dubna a května. Jedná se o důsledek každoročního pálení čarodějnic.

V předešlém grafu vývoje TC a OC (obr. 21) je v průběhu nejteplejších měsíců července (průměrná měsíční T $16,62 \text{ }^\circ\text{C}$) a srpna ($16,72 \text{ }^\circ\text{C}$) znatelný nárůst TC způsobený sekundárním OC. Průměrná T června je o necelé 2°C nižší ($15,13 \text{ }^\circ\text{C}$), průměrné hodnoty TC jsou však v červnu

⁶⁶ Korelace TC a EC je přibližně o 30 % méně výrazná než v zimě, kdy $r = 0,91$, EC a OC koreluje o 36 % méně, v zimě $r = 0,86$.

⁶⁷ Tato hranice byla zvolena v souladu s metodou denostupňů používanou ČHMU (Český hydrometeorologický ústav, OTOPNÁ SEZONA).

($2,34 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) o téměř 22 % nižší než v červenci ($3,01 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$).⁶⁸ V období přelomu června a července tedy začínají v hlavní míře probíhat procesy tvorby sekundárního OC, rozdíl v průměrných koncentracích mezi těmito dvěma měsíci ($0,67 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) je pravděpodobně vyvolán právě tímto jevem. Koncentrace EC v červenci ($0,34 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) a v srpnu ($0,35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) jsou v průměru o přibližně 11 % vyšší než v červnu ($0,31 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$). Toto zvýšení by mohlo být vysvětlitelné zemědělskou činností, konkrétně probíhajícími žněmi. Žně jsou, stejně jako tvorba sekundárního OC, vázány na teplé a suché počasí, jejich vliv na složení vzduchu se pravděpodobně sčítá s tvorbou sekundárního OC.⁶⁹ Léto je také jediné období, kdy EC koreluje kladně s T ($r = 0,12$). Zajímavé jsou rovněž nízké průměry TC v chladném prosinci. To může být způsobeno nejvyšší průměrnou W_s ze všech zimních měsíců ($3,59 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) v kombinaci s nejvyšší průměrnou T. Rovněž leden je větrnější než únor, únorové koncentrace TC jsou v celém roce nejvyšší ($5,38 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$).

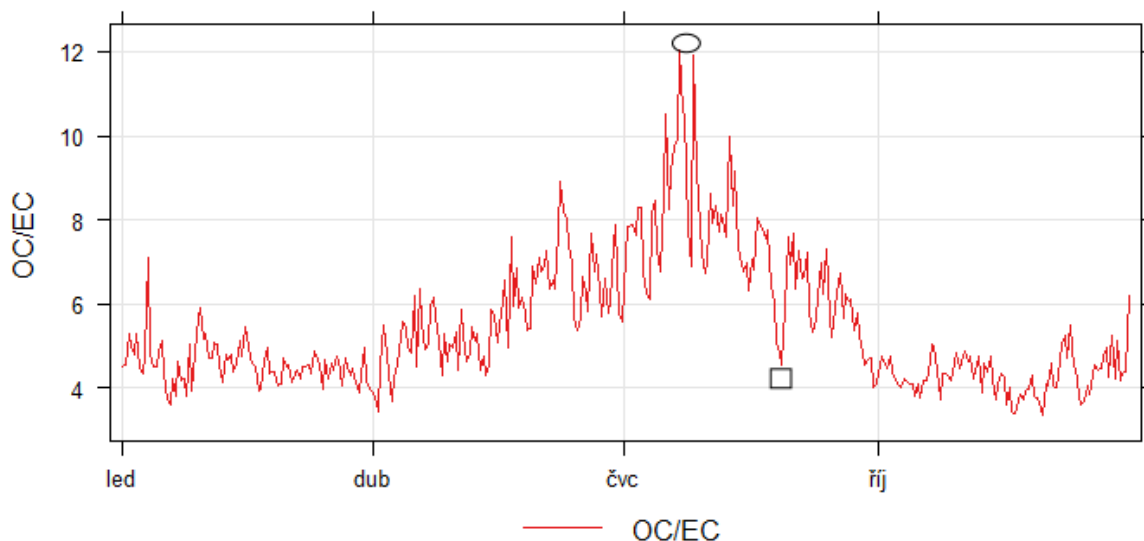
Průměrně takřka o 8 % ($0,69 \text{ }^\circ\text{C}$) chladnější jaro má oproti podzimu bezmála o 9 % nižší hodnotu TC a o 5 % vyšší hodnotu poměru OC/EC (jaro: $2,71/0,61$; podzim: $2,93/0,70$). Korelace TC s T je na podzim minimální ($r = 0,06$), naopak na jaře je zdatně záporná ($r = -0,23$), i samotné EC koreluje na podzim ($r = -0,20$) s T méně než na jaře ($r = -0,33$). Do jarního ovzduší tak zasahují stejní činitelé jako v zimě, leč podzim je ovlivňován jinými zdroji. Tato odchylka by mohla být způsobena zemědělskou činností, která je intenzivnější v průběhu podzimu⁷⁰ v porovnání s jarem. Častější provoz zemědělské techniky by tak mohl být jedním z faktorů stojícím za pozorovaným zvýšením TC a snížením poměru EC/OC. Tato hypotéza může vysvětlovat výrazný propad poměru OC/EC v září (zvýrazněný

⁶⁸ V srpnu je takřka stejná průměrná teplota jako v červenci, TC má však nižší hodnotu ($2,66 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$). Tuto odchylku je možné odvozovat od rozdílné aktivity rostlin, které se na tvorbě sekundárního OC podílí. Je možné se domnívat, že rostliny jsou již méně aktivní než v červenci, pročež vytváří méně prekurzorů OC.

⁶⁹ Tato problematika je blíže diskutována v kap. 4.2.4. v diskuzi o denním chodu TC v průběhu letního dne.

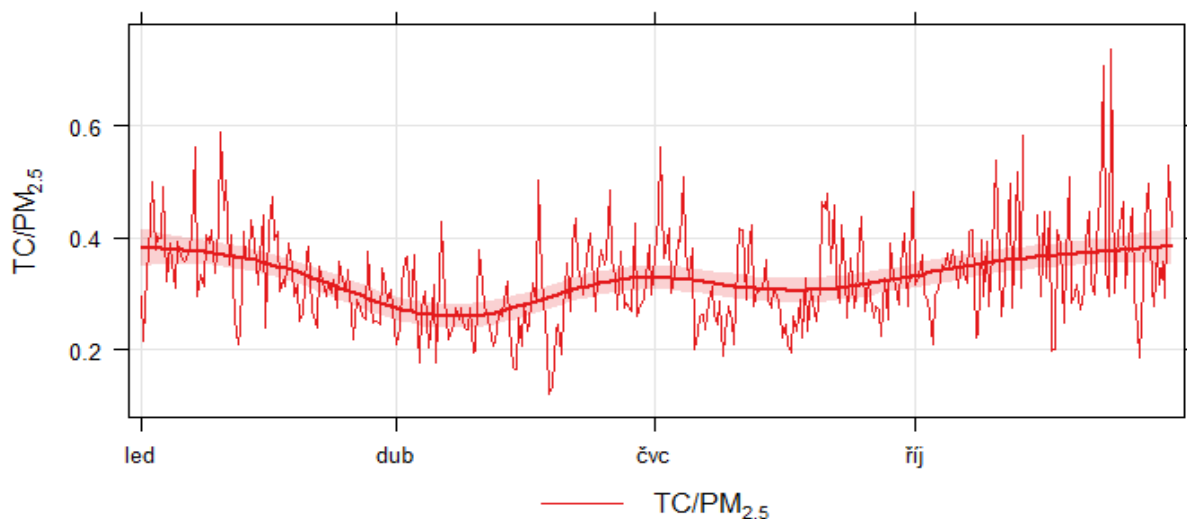
⁷⁰ V okolí často pěstovaná řepka se seje na podzim, pšenice, pokud není ozimá, se seje velmi brzy z jara.

na obr. 22 čtverečkem). V říjnu je markantní pokles poměru OC/EC, který pravděpodobně je počátkem otopné sezóny v okolních vesnicích.



Obr. 22: Chod průměrných denních poměrů OC/EC v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012). Kroužkem jsou zvýrazněny periody pravděpodobně doprovázené nejintenzivnější tvorbou sekundárního OC, čtvereček značí zvýšenou tvorbu EC pravděpodobně vlivem zemědělství.

Jaro je o 10,4 % ($0,29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) větrnější než podzim, což pravděpodobně přispívá ke snížení absolutních koncentrací TC v tomto měsíci.⁷¹ Tato hypotéza také objasňuje vývoj poměru TC/PM_{2,5}, které jsou na jaře nejnižší (obr. 23):

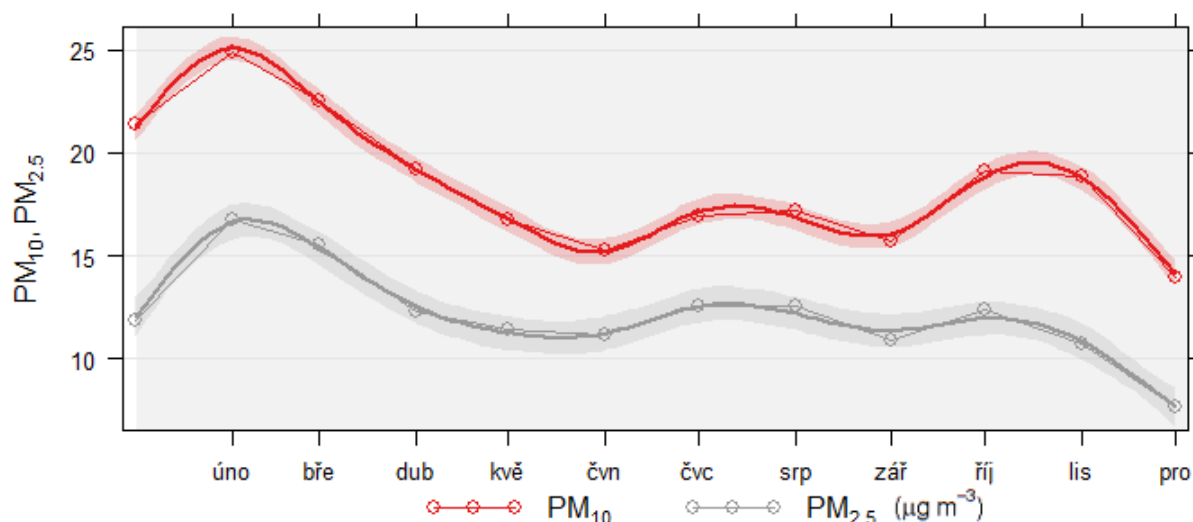


Obr. 23: Chod průměrných denních hodnot poměru TC/PM_{2,5} v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012).

Koncentrace AA naměřené na jaře ($3827 \text{ částic na cm}^3$) jsou o více než 20% vyšší než na podzim ($3179 \text{ částic na cm}^3$). Ačkoliv je z hlediska hmotnostních koncentrací polutantů jarní aerosol podobnější zimnímu, dochází zde pravděpodobně k procesům nukleace, která je

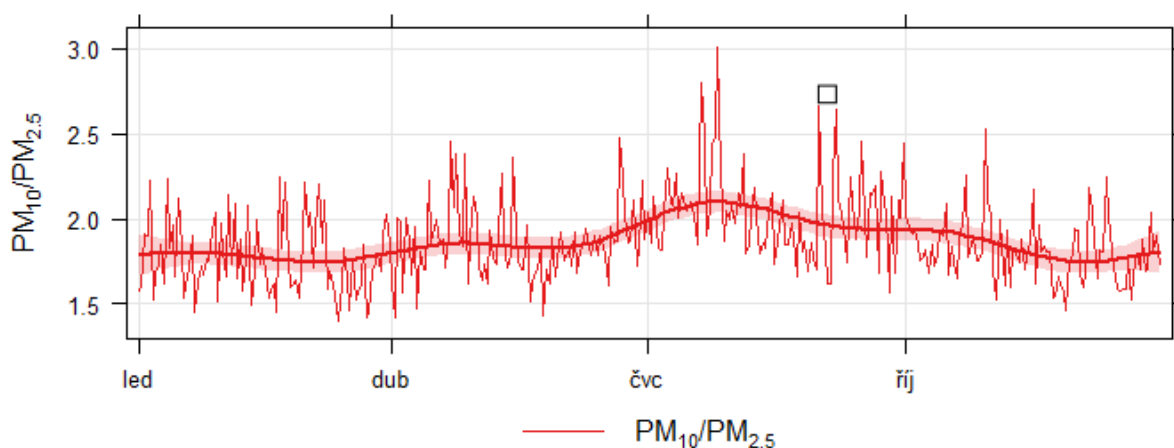
⁷¹ V jarních měsících by se dalo uvažovat o nárůstu TC vlivem bioaerosolu pylů. Nicméně zatímco je TC analyzován ve frakci PM_{2,5}, pyl se v této frakci takřka nevyskytuje, i ve frakci PM₁₀ je jeho zastoupení minimální (Sporomex, Spores and Pollens).

kromě zvýšené T důsledkem biologické aktivity rostlin, které produkují potřebné prekurzory (viz 1.1.2). Biologická aktivita v období jara je vyšší než na podzim.



Obr. 24: Chod průměrných měsíčních koncentrací PM [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012)

V grafu ročního chodu PM (obr. 24) je dobře zřetelný nárůst v průběhu léta, který je zároveň doprovázený nárůstem poměru $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2,5}$, jedná se tedy s největší pravděpodobností o prach uvolněný mechanicky při teplém počasí a při žních. V průběhu září si můžeme povšimnout nárůstu poměrů $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2,5}$ (zvýrazněno čtverečkem v grafu na obr. 25), důvod toho to nárůstu je pravděpodobně opět možno spojovat se zemědělskou aktivitou (pro porovnání viz obr. 22). Průměrné koncentrace PM rostou v průběhu podzimu, nicméně prosincový⁷² průměr PM je oproti zbytku zimy překvapivě nízký, nejnižší z celého roku.⁷³ I v tomto případě je možno tuto odchylku zdůvodnit nejvyššími průměrnými W_s (viz příloha 1).

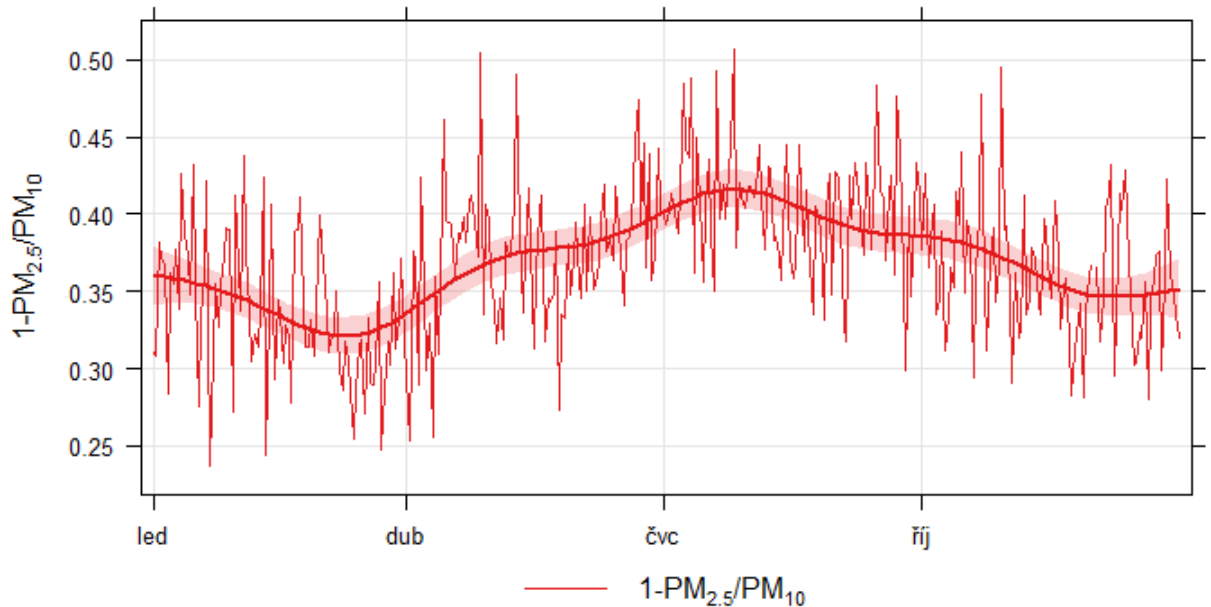


Obr. 25: Chod průměrných denních hodnot poměru $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2,5}$ v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012).

⁷² Stejně jako v první části ledna (viz příloha 2).

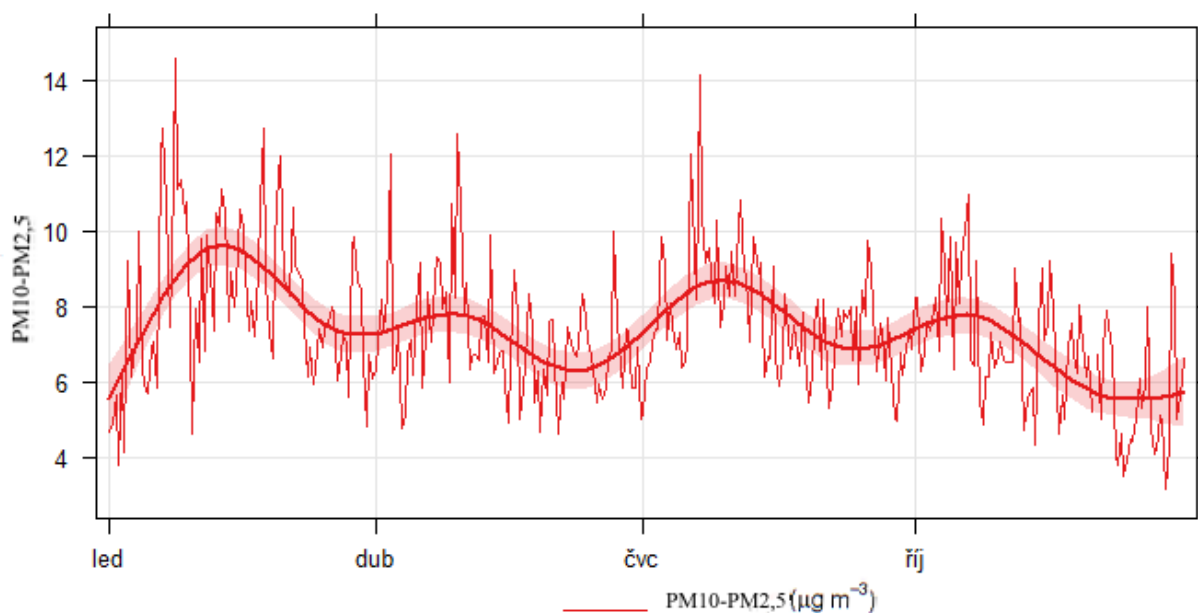
⁷³ Tato prosincová tendence je shodná s chodem TC, viz obr. 21.

Zastoupení hrubého modu ($PM_{10}-PM_{2,5}$) na celkovém PM_{10} je nejvyšší na vrcholu léta (obr. 26). Hodnota tohoto poměru klesá v září a říjnu pomaleji než na jaře, což koresponduje s hypotézou o vlivu zemědělství. Zemědělské aktivity, které jsou zdrojem hrubého modu PM, jsou na podzim intenzivnější než na jaře.



Obr. 26: Chod průměrného denního zastoupení hrubého modu částic na PM_{10} v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012).

Samotný absolutní rozdíl $PM_{10}-PM_{2,5}$ v průběhu roku zaznamenává nejvyšší hodnoty v průběhu ledna a února (přibližně $9,5 \mu g \cdot m^{-3}$) a poté opět v srpnu (přibližně $9 \mu g \cdot m^{-3}$) (obr. 27). Z toho je patrné, že zdroje hrubého prachu jsou v průběhu roku jak mechanické (léto), tak spalovací (zima).

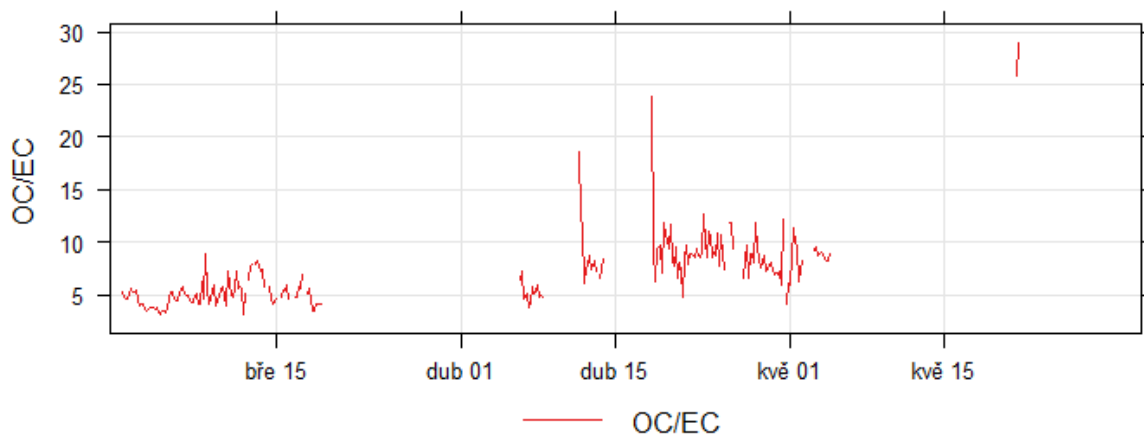


Obr. 27: Chod průměrných denních koncentrací hrubého modu částic ($PM_{10}-PM_{2,5}$) v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012).

V průběhu celého roku W_s koreluje záporně s TC, jak již bylo dříve diskutováno. Pro zimní období je však absolutní hodnota této korelace výrazně nejvyšší ($r = -0,46$), takřka dvojnásobná oproti ostatním obdobím, kde se korelační koeficienty nacházejí v úzkém intervalu $(-0,30; -0,25)$. To může demonstrovat vliv výskytu přízemních inverzí, které jsou doprovázeny bezvětrím, takže se polutanty intenzivněji hromadí.

Nejchladnější zima byla zaznamenána roku 2017, která měla rovněž nejvyšší hodnotu TC. Naopak nejteplejší zima roku 2015 měla TC nejméně, zároveň s nejvyšší hodnotou poměru $PM_{10}/PM_{2,5}$ a druhou nejvyšší hodnotou OC/EC. Toto demonstruje závislost TC na T a vliv spalovacích procesů na nárůst podílu frakce $PM_{2,5}$. Naopak nejteplejší léto, kdy fungoval OC/EC analyser, je 2018 a odpovídá hypotéze tvorby sekundárního OC. Nejvyšší hodnota poměru OC/EC, nejvyšší letní průměr koncentrace TC a podprůměrná hodnota $PM_{10}/PM_{2,5}$ (sekundární OC spadá do jemné frakce, viz 1.1.1).⁷⁴ Zajímavé je jaro 2018, které má velmi vysokou směrodatnou odchylku veličiny T, mohlo tak dojít k výskytu teplých period s tvorbou sekundárního OC, ale i chladných period s větším příspěvkem spalovacích procesů. To by mohlo vysvětlovat nezvykle vysokou hodnotu poměru OC/EC (obr. 28) i vysokou koncentraci TC.

⁷⁴ Nejnižší hodnota tohoto poměru v nejteplejším roce 2015 naznačuje, že tehdy došlo k ještě silnější tvorbě sekundárního OC.



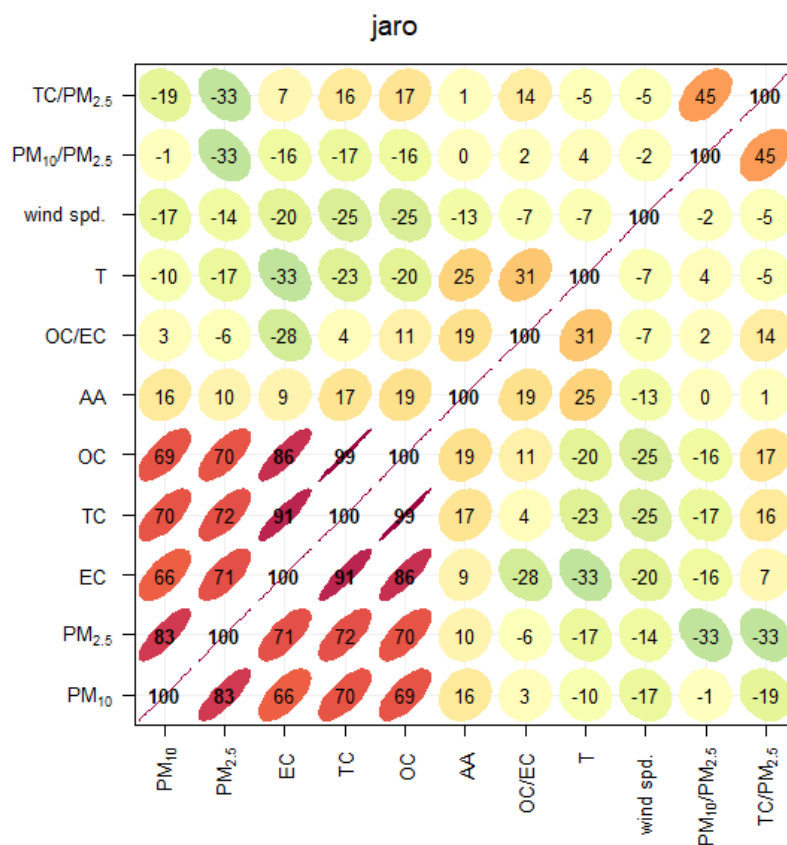
Obr. 28: Graf hodnoty poměru OC/EC v průběhu jara 2018 (Carslaw a Ropkins, 2012). I přes neúplnost dat jsou pozorovatelná výrazná zvýšení tohoto poměru poukazující na možný výskyt sekundárního OC. Pro porovnání s jarem 2017 viz příloha 3.

Podzim roku 2014 byl nejteplejší a zároveň s nejmenší hodnotou TC, což demonstruje podzimní závislost chodu TC na T.

Hodnoty sledovaných veličin pro jednotlivá roční období jsou vyneseny v tab. 7 až 10, korelační koeficienty jsou na obr. 29 až 32.

		2013	2014	2015	2016	2017	2018	Průměr
Jaro	T	6,76 ±7,23	10,87 ±6,63	7,93 ±5,49	8,12 ±6,52	8,53 ±5,77	9,44 ±8,38	8,26 ±6,46
	W_s	3,91 ±2,15	2,90 ±1,62	3,19 ±1,80	2,55 ±1,19	3,00 ±1,45	2,64 ±1,33	3,08 ±1,68
	AA	3601 ±1889	3940 ±3123	4336 ±2824	3456 ±2093	3536 ±2291	4286 ±2519	3827 ±2440
	TC	3,93 ±2,78	3,13 ±2,04	3,54 ±2,14	3,13 ±1,82	2,65 ±1,40	4,37 ±3,64	3,31 ±2,30
	OC/EC	4,20 ±1,20	5,64 ±2,51	6,29 ±1,94	3,91 ±1,46	5,13 ±2,62	7,15 ±3,51	4,96 ±2,35
	PM₁₀/PM_{2,5}	1,33 ±0,30	1,57 ±0,76	1,73 ±0,91	1,79 ±1,48	2,01 ±2,10	1,76 ±0,80	1,83 ±1,17

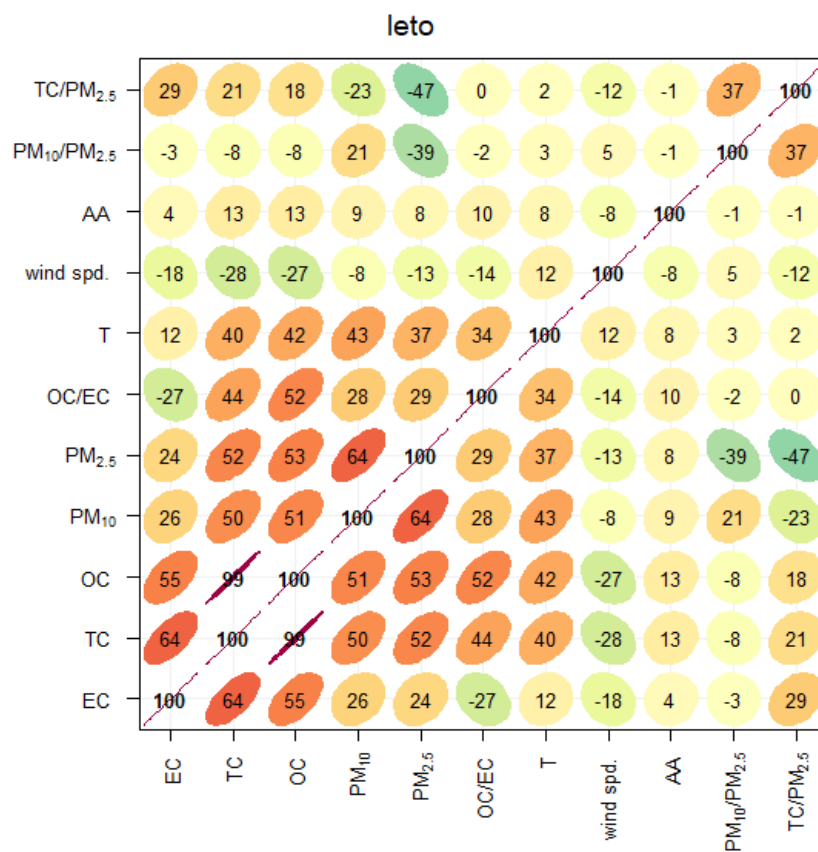
Tab. 7: Přehled naměřených koncentrací aerosolů a základních meteorologických veličin pro jarní období měřicí kampaně.



Obr. 29: Korelační koeficienty [%] mezi jednotlivými veličinami pro jaro (Carslaw a Ropkins, 2012)

		2013	2014	2015	2016	2017	2018	Průměr
Léto	T	17,77 ±5,43	16,71 ±4,83	19,16 ±5,95	17,33 ±4,39	18,15 ±4,69	18,80 ±5,06	17,95 ±5,18
	W_s	2,48 ±1,19	2,53 ±1,17	2,36 ±1,02	2,23 ±0,98	2,34 ±1,13	2,77 ±1,27	2,46 ±1,15
	AA	4799 ±2951	5882 ±3963	5084 ±2765	4780 ±3091	4029 ±1878	4207 ±2360	4796 ±3040
	TC	2,84 ±1,37	2,58 ±1,13		2,49 ±1,05	2,59 ±1,24	3,14 ±1,18	2,66 ±1,22
	OC/EC	7,28 ±2,70	7,55 ±2,79		6,42 ±2,48	7,28 ±2,89	11,37 ±3,02	7,54 ±3,06
	PM₁₀/PM_{2.5}	1,46 ±0,69	1,67 ±0,76	1,76 ±0,79	2,17 ±1,67	2,05 ±1,69	1,67 ±0,70	1,99 ±1,16

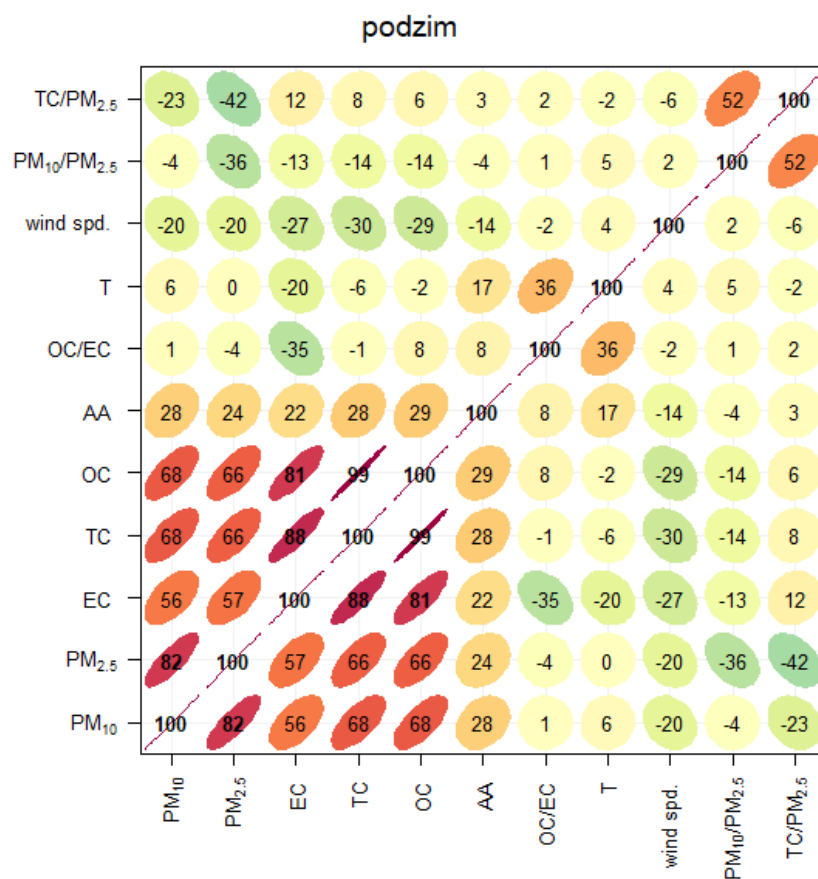
Tab. 8: Přehled naměřených koncentrací aerosolů a základních meteorologických veličin pro letní období měřicí kampaně.



Obr. 30: Korelační koeficienty [%] mezi jednotlivými veličinami pro léto (Carslaw a Ropkins, 2012).

		2013	2014	2015	2016	2017	2018	Průměr
Podzim	T	8,33 ±2,19	9,81 ±5,01	8,97 ±5,40	8,57 ±7,05	8,30 ±4,61	9,54 ±6,46	8,95 ±5,72
	W_s	3,21 ±1,66	2,69 ±1,44	2,72 ±1,68	2,38 ±1,17	2,75 ±1,41	2,96 ±1,89	2,79 ±1,58
	AA	4624 ±2674	2845 ±2005	3716 ±2493	2898 ±1305	2470 ±1102	3591 ±1743	3179 ±1952
	TC	3,90 ±2,19	3,05 ±1,39	3,76 ±3,00	3,54 ±1,01	2,36 ±1,01	4,01 ±2,10	3,62 ±2,16
	OC/EC	4,61 ±1,61	4,34 ±1,40	3,52 ±1,17	4,35 ±1,59	4,96 ±1,93	6,28 ±2,33	4,72 ±1,97
	PM₁₀/PM_{2.5}	1,50 ±0,77	1,59 ±0,85	1,83 ±1,02	1,98 ±1,77	1,53 ±1,04	1,76 ±0,88	1,89 ±1,14

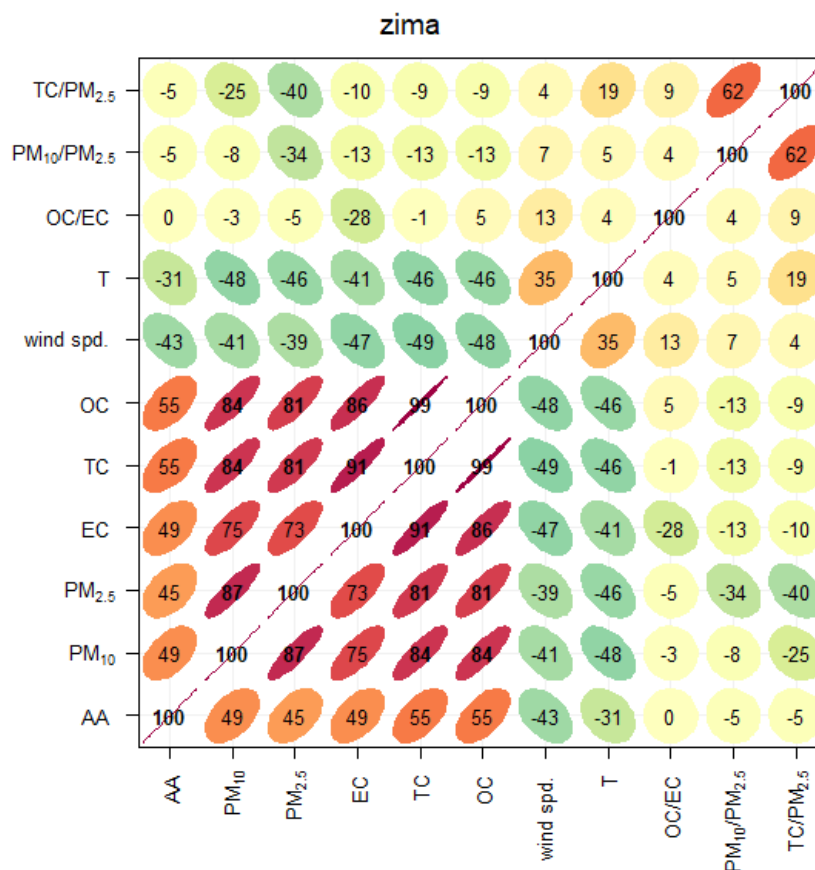
Tab. 9: Přehled naměřených koncentrací aerosolů a základních meteorologických veličin pro podzimní období měřící kampaně.



Obr. 31: Korelační koeficienty [%] mezi jednotlivými veličinami pro podzim (Carslaw a Ropkins, 2012).

		2013	2014	2015	2016	2017	2018	Průměr
Zima	T	3,02 ±2,64	1,12 ±4,29	1,81 ±3,68	0,30 ±4,53	-1,53 ±4,84	-0,19 ±4,51	0,30 ±4,37
	W_s	3,41 ±1,47	2,97 ±3,67	3,43 ±2,02	3,19 ±1,91	3,13 ±1,84	3,45 ±1,96	3,23 ±2,28
	AA		2577 ±1422	2737 ±1366	2739 ±1450	2658 ±1828	2573 ±1586	2657 ±1530
	TC	3,90 ±1,94	4,30 ±3,40	3,75 ±2,62	4,40 ±3,09	5,73 ±4,17	4,31 ±2,74	4,50 ±3,20
	OC/EC	4,70 ±1,17	4,16 ±4,41	4,97 ±1,78	3,63 ±1,23	4,79 ±1,55	5,15 ±2,25	4,54 ±2,24
	PM₁₀/PM_{2.5}	1,53 ±1,00	1,60 ±0,97	1,63 ±0,79	1,60 ±1,04	1,62 ±1,00	1,55 ±0,81	1,60 ±0,92

Tab. 10: Přehled naměřených koncentrací aerosolů a základních meteorologických veličin pro zimní období měřící kampaně.



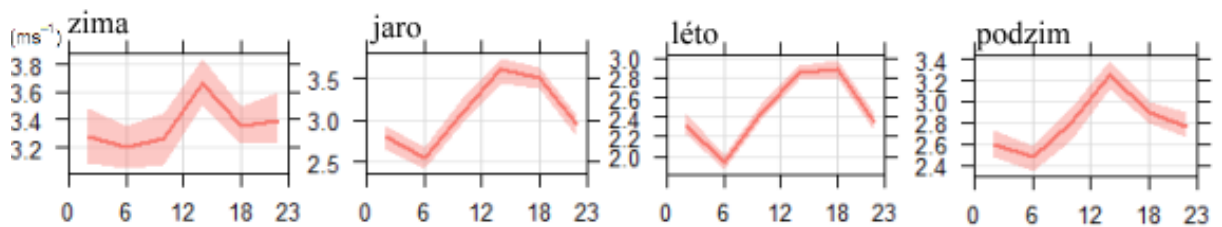
Obr. 32: Korelační koeficienty [%] mezi jednotlivými veličinami pro zimu (Carslaw a Ropkins, 2012).

Mbengue et al., 2018, s. 340, kteří analyzovali AA na NAOK mezi lety 2013-16, uvádí průměrné jarní koncentrace TC $3,50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (o 5,7 % více než v mé práci), letní $2,61 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (o 1,9 % méně), podzimní $3,58 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (o 1,2 % méně) a zimní $4,20$ (o 7,8 % méně). Zaznamenali stejný trend v chodu T a W_s jako tato práce.

2.2.4 Charakteristika denních trendů

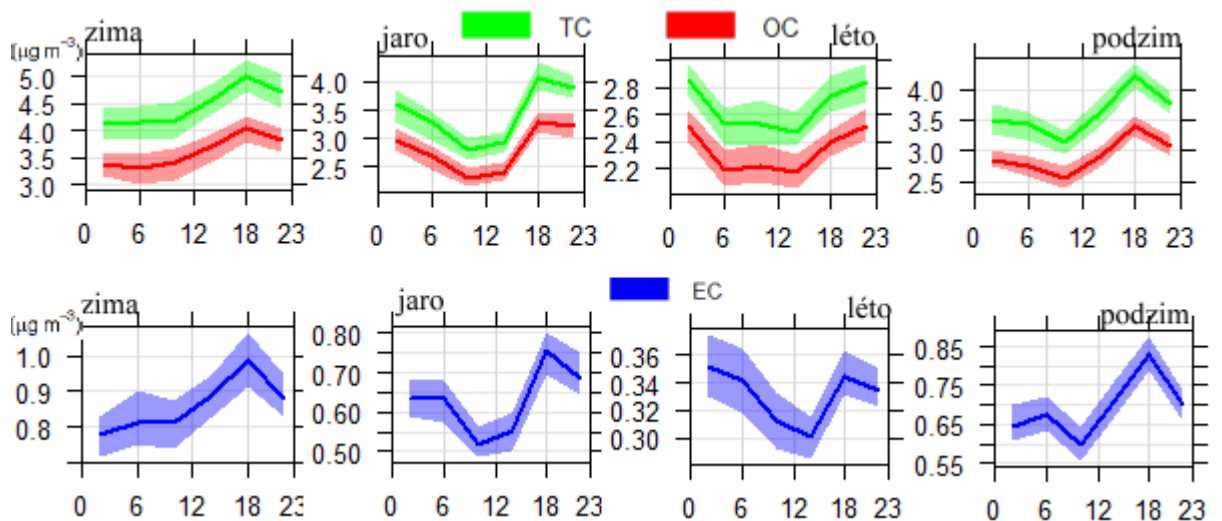
Vyjádření chodu jednotlivých polutantů v průběhu dne v každém ročním období umožní s nejlepší přesností určit charakteristické zdroje sledovaných látek. Při interpretaci trendů znečištění je zahrnut přírodní chod mezní vrstvy atmosféry i lidská činnost v oblasti. Na závěr jsou shrnuty základní rozdíly v denních trendech TC, OC a EC, poměru OC/EC, PM a AA mezi jednotlivými roky.⁷⁵ Čas jednotlivých měření je uváděn v UTC v grafech i diskuzi.

⁷⁵ Jak je diskutováno v 4.1.5, v roce 2013 měření všech veličin začala až v březnu, v tomto roce v podzimním období nastaly také výpadky v měření AA. V létě 2015 došlo k výpadku měření TC a jeho složek.



Obr. 33: W_s [$m \cdot s^{-1}$] v průběhu průměrných dnů každého ročního období (Carslaw a Ropkins, 2012)

Stejně jako na chod koncentrací sledovaných veličin v průběhu studené a teplé poloviny, také na denní chody má vliv vývoj mezní vrstvy atmosféry. Mezní vrstva je nejrobustnější okolo poledne (Von Engelmann et al, 2013, s. 6587), a tak se polutanty mohou rozptýlovat do největšího objemu vzduchu, čímž jejich koncentrace klesají. Nejvyšší W_s je ve všech měsících roku rovněž zaznamenávána ve 14:00 (obr. 33), pak v průběhu odpoledne klesá.



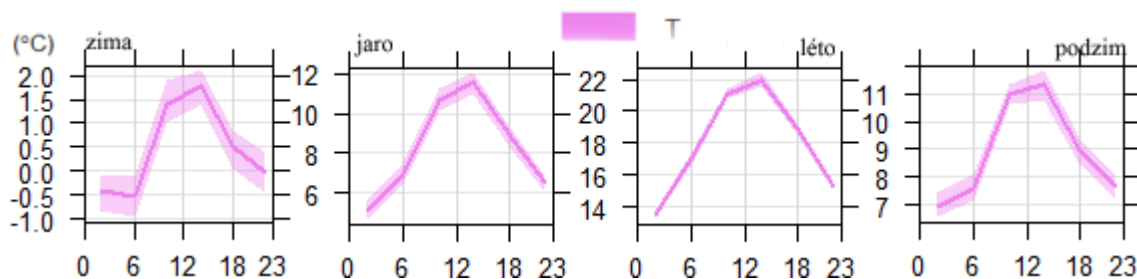
Obr. 34: Chod koncentrací TC, OC EC [$\mu g \cdot m^{-3}$] v průběhu průměrných dnů každého ročního období⁷⁶ (Carslaw a Ropkins, 2012)

Pro každé roční období jsou nejvyšší koncentrace TC zaznamenány k večeru, a naopak nejnižší v 10 a 14 hod (obr. 34). V zimě se postupně zvedá koncentrace TC a jeho složek konstantně až k 18. hodině, kdy začne klesat. Výrazné zvyšování koncentrací polutantů v průběhu odpoledne souvisí s domácím vytápěním, které je u kotlů na tuhá paliva vázáno na obsluhu lidí, kteří se v tento čas vrací zpět domů. Dalším faktorem je také snižující se mezní vrstva v průběhu odpoledne (Von Engelmann et al, 2013, s. 6587) a W_s , která klesá v průběhu odpoledne rychleji v zimě než v ostatních obdobích, a TC se tak večer více hromadí. Naměřené koncentrace v zimě jsou

⁷⁶ Při sledování vývoje koncentrací v průběhu dne je pro přehlednost zvolené měřítko osy y tak, že nemá v průsečíku s ležatou osou nulovou hodnotu. Jelikož se doba setrvání částice v atmosféře pohybuje v intervalu hodin až dnů (viz 1.1.1), pro každé období je typická koncentrace polutantů, která se v průběhu dne nemění. Měřítka ke každému z grafů je vždy na jeho levé straně.

relativně⁷⁷ nejstabilnější, pozorovatelný je pouze zmiňovaný večerní peak. Důvodem je s vysokou pravděpodobností konstantně nízká T (obr. 35), která vede k nutnosti udržovat určitou míru vytápění domácností po celý den.

I na jaře nastává večer nejvýraznější nárůst TC, OC i EC, měření v 10 a 14 hod. ale zaznamenávají markantní pokles oproti zbytku měření. Důvodem může být vývoj W_s v průběhu dne: Oproti zimnímu období nastává v průběhu dopoledne markantnější nárůst W_s , který polutanty rozptyluje. Vyšší jarní T také znamenají, že vytápění není nutné po celý den, obyvatelé topí ve větší míře až navečer.



Obr. 35: Chod T [°C] v průběhu průměrných dnů každého ročního období (Carslaw a Ropkins, 2012)

V létě, na rozdíl od jara a podzimu, nejsou nejnižší koncentrace EC zaznamenány v 10 hod., nýbrž až v 14:00⁷⁸. V letním období, kdy chybí velká část zdrojů EC, tedy může být patrný drobný příspěvek dopravních špiček, které zvýší dopolední koncentrace. EC se v průběhu letního odpoledne začíná opět zvyšovat a v průběhu noci klesá jen pomalu. Celkově ale není letní peak v EC tak ostrý jako v jiných obdobích, a lze uvažovat pouze o tom, že konstantní hladina EC⁷⁹ pozorovaná v noci je pouze rozptýlena větrem, který se začíná v průběhu dopoledne zdvíhat.⁸⁰ V chodu OC je výrazný nárůst v průběhu odpoledne, tento nárůst se shoduje s tvarem křivky chodu EC. Pro chod OC se tak nabízí obdobné hypotézy vzniku, kromě toho ke koncentraci OC přispívá jeho sekundární tvorba. Koncentrace OC nejvíce stoupne po nejteplejší periodě dne mezi 10. a 14. hodinou (obr. 35), což jsou podmínky k tvorbě sekundárního OC vhodné. Směrodatné odchylky jsou v létě u OC mnohem vyšší než v ostatních obdobích, i to může být znakem tvorby sekundárního OC, který ke svému vzniku vyžaduje specifické podmínky a nemusí nastat pravidelně každý rok ve stejný čas (viz 4.2.3).

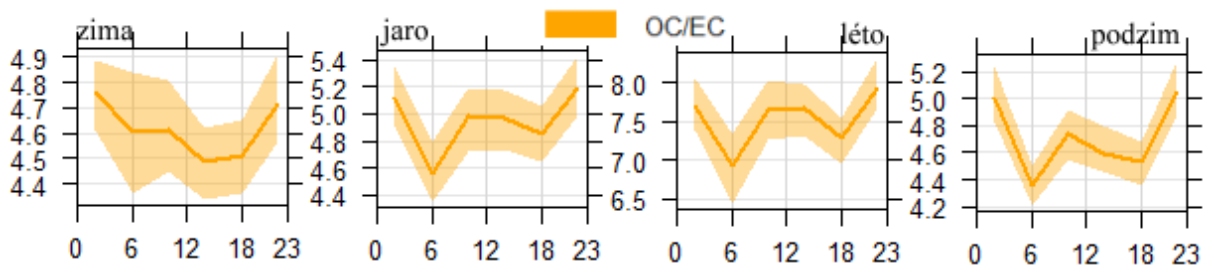
Na podzim je velmi výrazně znatelný peak koncentrací EC, OC, i TC v 18:00 (obr. 36). Ten může mít svůj podíl ve vytápění (jak je diskutováno již pro jaro), v podzimním období navíc vítr vane nejintenzivněji okolo 14. hodiny a pak se rychleji utiší než na jeře.

⁷⁷ Míňeno v procentuální odchylce vzhledem k jiným částem dne.

⁷⁸ Tedy v 16:00 místního času.

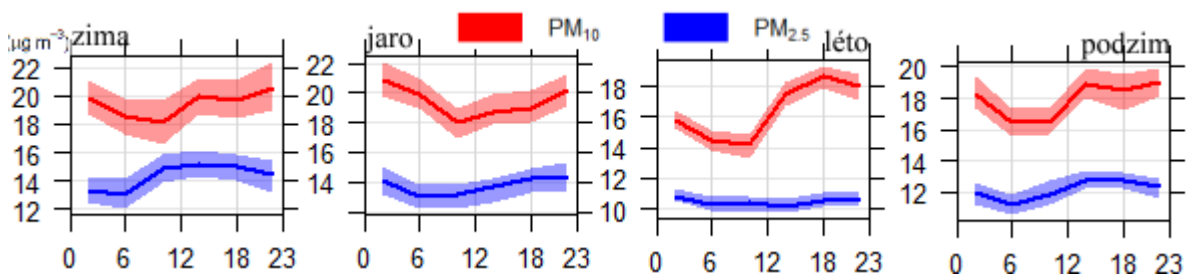
⁷⁹ Která může být např. důsledkem dálkového transportu

⁸⁰ Hypotéza o vlivu žní je podporována tím, že EC je nejvyšší večer, stejně jako W_s . Pozorované koncentrace EC jsou pravděpodobně vysvětlitelné větším počtem diskutovaných teorií najednou.



Obr. 36: Chod poměru OC/EC v průběhu průměrných dnů každého ročního období (Carslaw a Ropkins, 2012)

Hodnoty poměru OC/EC kolísají v průběhu zimního dne v nejmenším intervalu. To svědčí o úzkém spektru zdrojů OC a EC v tomto období. Hodnoty poměru OC/EC jsou na jaře nižší než v létě, nicméně zaznamenaný trend je obdobný. Výrazné jsou výkyvy v 6:00 a 18:00, které mohou poukazovat na vliv dopravních špiček, který však příliš neovlivňuje celkové koncentrace (obr. 31). Na podzim je v tvaru křivky znatelné snížení poměru OC/EC ve 14:00, které na jaře není znatelné, což souvisí zejména se zvýšeným vytápěním v průběhu podzimu.

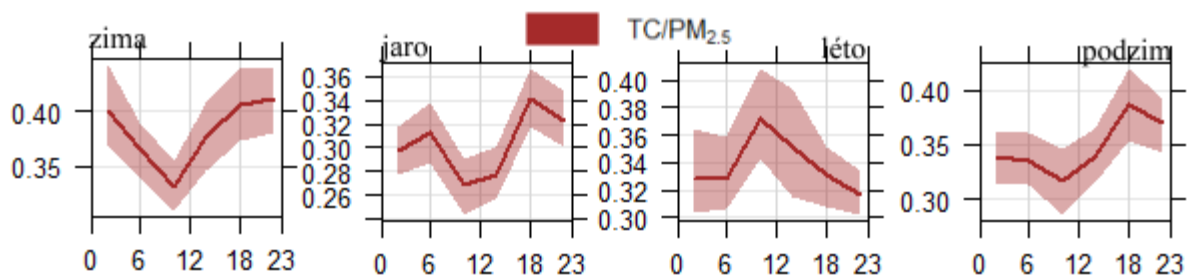


Obr. 37: Chod koncentrací PM [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] v průběhu průměrných dnů každého ročního období (Carslaw a Ropkins, 2012)

Chod částic $\text{PM}_{2,5}$ i PM_{10} sleduje ve všech období roku podobný trend, koncentrace jsou ráno nejmenší a v průběhu dne stoupají (obr. 37). Tento vývoj je v mnoha ohledech podobný s chodem TC.

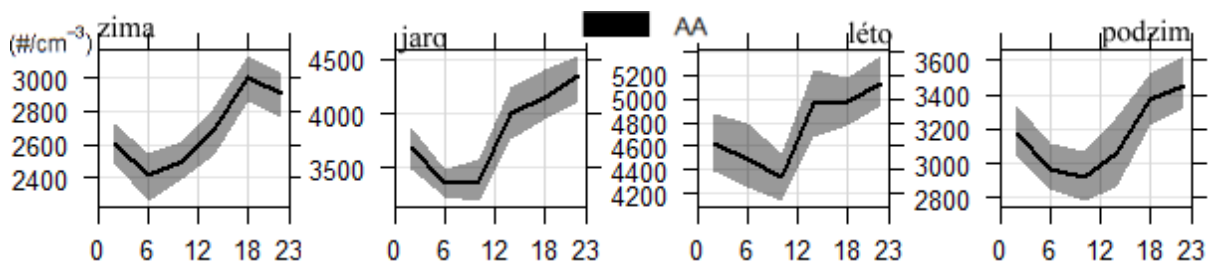
V zimě a v menší míře na jaře i na podzim je vidět, že v průběhu dopoledne rostou koncentrace $\text{PM}_{2,5}$ rychleji než koncentrace PM_{10} . Pro tato roční období je také patrné, že večer stále stoupá koncentrace PM_{10} , zatímco $\text{PM}_{2,5}$ již klesá. To může být způsobeno vysokou chemickou reaktivitou frakce $\text{PM}_{2,5}$, která tak může v atmosféře růst a přecházet do frakce PM_{10} .

Od těchto trendů se odlišuje léto, kdy $\text{PM}_{2,5}$ začíná růst až v 18 hod., zatímco PM_{10} nabývá nejvyšších hodnot v nejteplejší a největrnější části dne (mezi 14 a 18 hod), nemůže tedy docházet k markantnímu přechodu částic z jemné do hrubé frakce. Strmý nárůst je odůvodnitelný tím, že dopoledne jsou jeho hodnoty minimálně zvyšovány lidskou činností, a odpoledne se po prohřátí krajiny začnou výrazně projevovat procesy resuspenze prachu a větrné eroze.



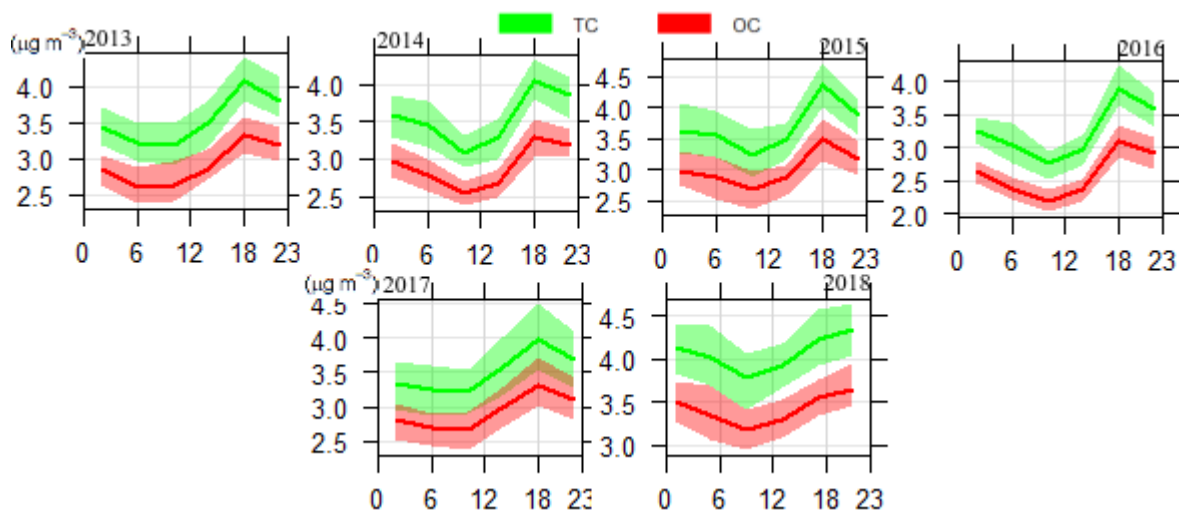
Obr. 38: Chod poměru $TC/PM_{2.5}$ v průběhu průměrných dnů každého ročního období (Carslaw a Ropkins, 2012)

Ve všech obdobích kromě léta dosahují hodnoty poměru $TC/PM_{2.5}$ nejnižší hodnoty v 10:00 a 14:00, kdy je pravděpodobně nejnižší úroveň vytápění. Naopak v létě je tento trend takřka opačný (obr. 38). Velká směrodatná odchylka v létě značí závislost tohoto poměru na sekundárním OC, který je variabilní rok od roku. Vzhledem k poklesu tohoto poměru v průběhu odpoledne je patrné, že tvorba sekundárního OC začíná dříve než tvorba bezuhlíkatého PM.



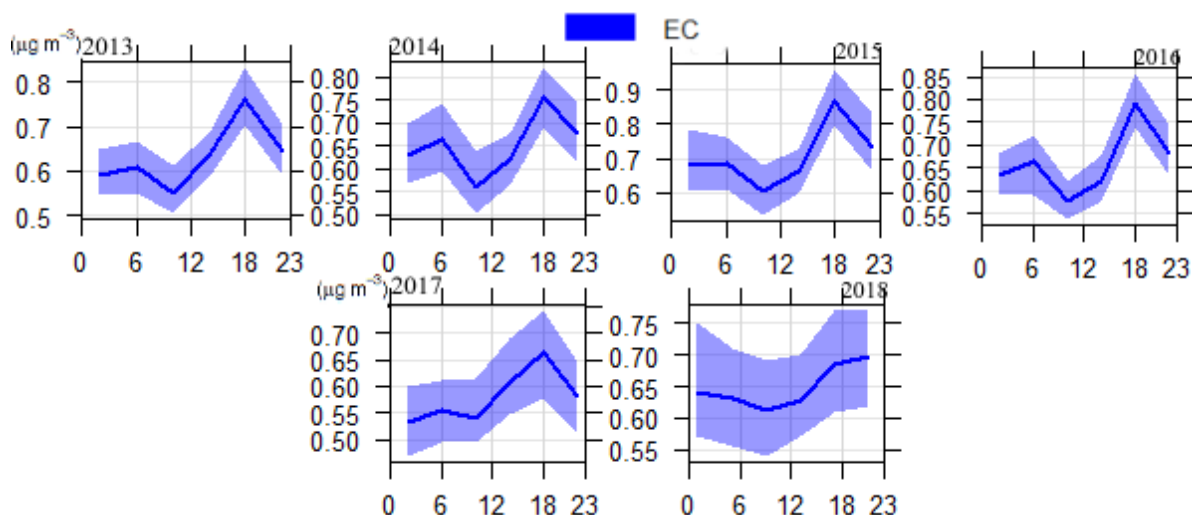
Obr. 39: Chod koncentrací AA [(počet částic) cm^{-3}] v průběhu průměrných dnů každého ročního období (Carslaw a Ropkins, 2012)

V chodu AA můžeme znatelně pozorovat proces akumulace částic a jejich koagulaci. V létě a na jaře je hodnota AA nejvíce ovlivněna procesem nukleace. Nejstrmější nárůst koncentrace AA proto nastává po 10. hodině, kdy je nejvyšší sluneční radiace (obr. 39). Tyto částice rychle koagulují, proto rychlost nárůstu jejich koncentrace v odpoledních hodinách klesá (viz 1.1.2). Oproti tomu v zimě je pozorován nárůst koncentrace AA zejména v souvislosti s vytápěním, tedy mezi 14:00 a 18:00.



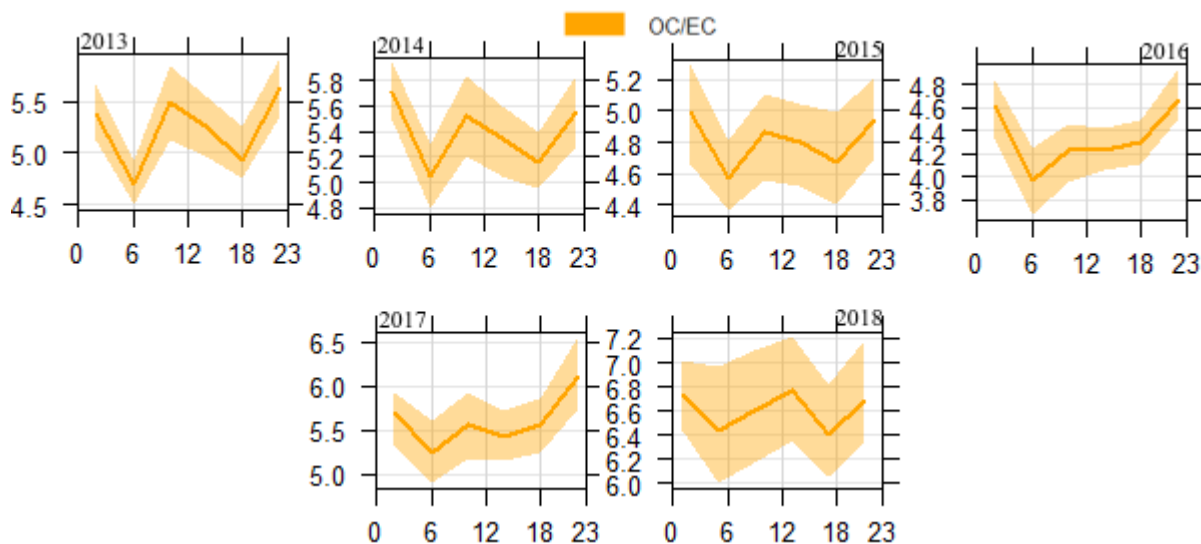
Obr. 40: Denní chody TC a OC [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] zaznamenané pro každý z roků měřicí kampaně (Carslaw a Ropkins, 2012)

Při porovnání denních chodů TC, OC (na obr. 40) i EC (na obr. 41) v každém roce měřicí kampaně je zřetelný peak v 18 hod a naopak pokles v 10:00. Křivka celoročních denních chodů má obecně tvar připomínající podzim a jaro, nejchladnější rok 2017 (viz 2.2.1) se svým denním chodem blíží spíše zimě. Naopak teplý rok 2018, kdy pravděpodobně došlo k výrazné tvorbě sekundárního OC, má méně výrazný rozdíl mezi ranními a večerními koncentracemi, menší pokles pro měření v 10 a 14 hodin. Rok 2018 je také význačný velkou směrodatnou odchylkou (zejména u EC), protože v tomto roce bylo zároveň nadprůměrně horké léto i nadprůměrně chladná zima.

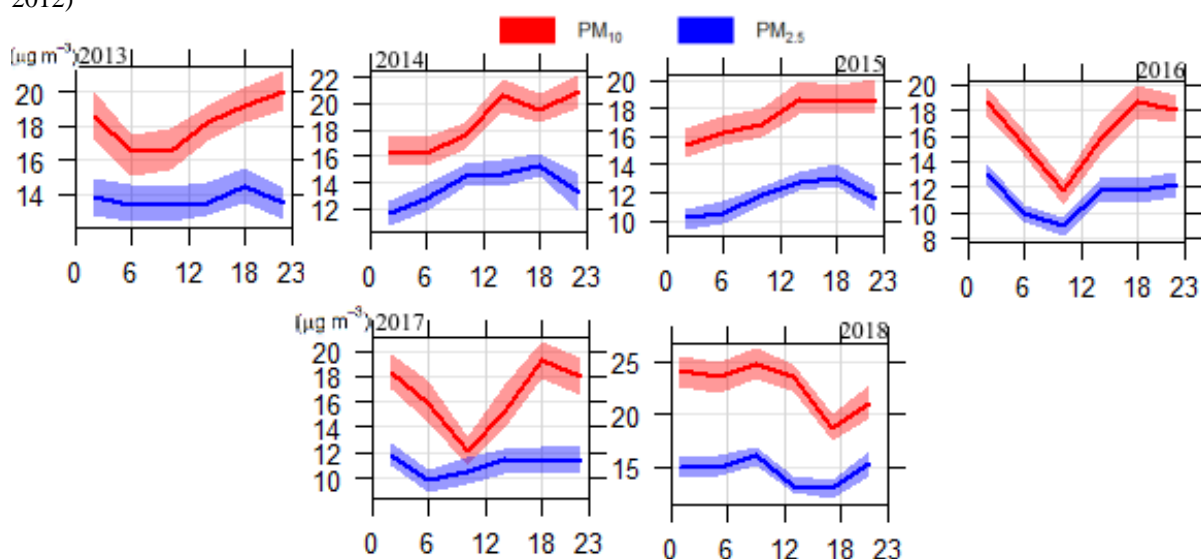


Obr. 41: Denní chody EC [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] zaznamenané pro každý z roků měřicí kampaně (Carslaw a Ropkins, 2012)

Chod poměru OC/EC vždy zaznamenává minima v 6 a 18 hod, naopak stoupá v 10 a 14 hod (obr. 42). V chladných letech 2016 a 2017 je tento nárůst nejmenší. Oproti tomu roku 2018 jde poměr OC/EC vzhůru nejvíce mezi 10. a 14. hod, denní maximum nastává ve 14:00. V ostatních letech naopak v tento čas poměr OC/EC klesá s postupným nástupem večerní špičky. Jedná se pravděpodobně o důsledek tvorby sekundárního OC (viz 2.2.2).



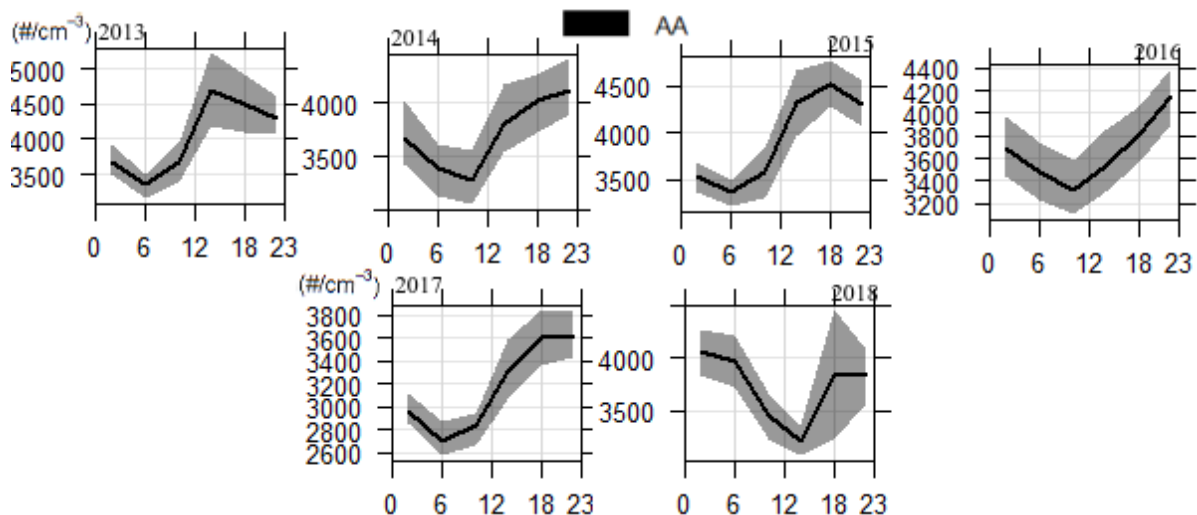
Obr. 42: Denní chody poměru OC/EC zaznamenané pro každý z roků měřicí kampaně (Carslaw a Ropkins, 2012)



Obr. 43: Denní chody PM [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] zaznamenané pro každý z roků měřicí kampaně (Carslaw a Ropkins, 2012)

Denní trendy PM vykazují v průměrně nejchladnějších letech 2016 a 2017 odlišný trend od tří roků předešlých (obr. 43). Propad v koncentraci PM nastává okolo poledne místního času, kdy je relativně méně vytápění. Rozlišný je opět rok 2018, kdy koncentrace PM klesají k večeru. V porovnání s oběma předchozími lety jsou tento rok koncentrace nejvyšší a relativně nejstabilnější.⁸¹

⁸¹ Ačkoliv je v 18 hod. pozorován pokles, průměrná koncentrace zaznamenaná v tento čas je přibližně shodná s koncentrací naměřenou v tento čas v roce 2013.



Obr. 44: Denní chody PM [(počet částic) cm^{-3}] zaznamenané pro každý z roků měřicí kampaně (Carslaw a Ropkins, 2012)

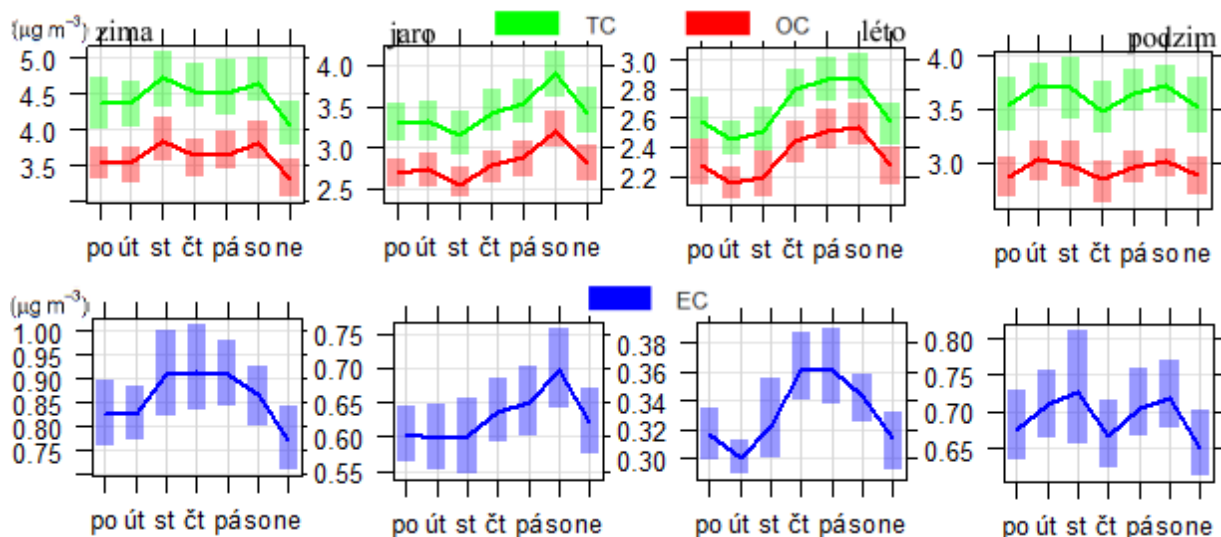
Po dobu měřicí kampaně je pozorován obdobný trend nárůstu AA od ranního minima k večernímu maximu (obr. 44). Rok 2018 je oproti předešlým letům odlišný, nárůst koncentrace AA nastává až po 14. hodině. Opět je markantní velká směrodatná odchylka v tomto roce.

V předešlých kapitolách srovnávaná práce Mbengue et al., 2018, s. 341, uvádí v denním chodu TC, EC a OC obdobné trendy: Nejnižší koncentrace zaznamenali pro 10:00 a nejvyšší v průběhu večera. Shoda nastává i v porovnání jara a podzimu, kdy koncentrace rostou v průběhu podzimního odpoledne rovnoměrněji. V chodu poměru OC/EC také zaznamenali pokles pro měření v 6:00 a 18:00, v průběhu letního rovněž zachytili intenzivní nárůst.

2.2.5 Charakteristika týdenních trendů

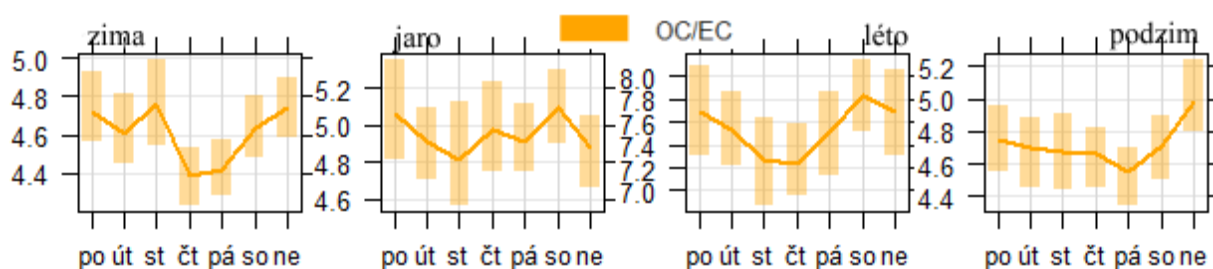
Analýza polutantů v průběhu týdne slouží primárně jako dodatek k předešlé analýze. Jejím cílem je prozkoumat antropogenní vliv na složení ovzduší, neboť přírodní děje nejsou ovlivněny víkendem, kdy je lidská aktivita odlišná.⁸² Trendy sledovaných veličin jsou obdobné jako trendy v průběhu jednotlivých dnů. Ze všech období jsou sledované veličiny nejstabilnější na podzim.

⁸² Přesto pravděpodobně vlivem zdánlivě náhodných výkyvů počasí i W_s a T v průběhu týdne vykazují statistický trend, který by však neměl vzhledem ke své nízké zřetelnosti ostatní veličiny příliš ovlivňovat. Chod průměrných denních W_s a T v průběhu průměrných týdnů každého ročního období je zařazen jako příloha 11.



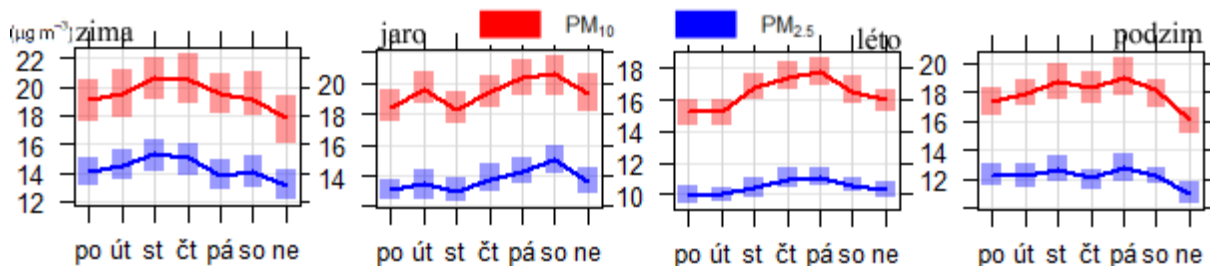
Obr. 45: Chod průměrných denních koncentrací TC, OC EC [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] v průběhu průměrných týdnů každého ročního období (Carslaw a Ropkins, 2012).

V chodu TC, OC a EC (na obr. 45) je zřejmý ve všech částech roku pokles koncentrací v průběhu víkendu, což plyne z poklesu lidské aktivity. Jak je diskutováno v 1.1.1 a 1.1.4, TC patří z velké části k akumulativnímu modu částic, který setrvává v atmosféře po dobu několika dnů, než se usadí. V týdenním chodu je proto vidět, že se částice od začátku týdne až k jeho konci akumulují, a jejich koncentrace tak roste a zůstane vysoká i v průběhu soboty. Tento trend je zřejmý zejména na jaře a v létě pro OC i EC. V zimě přestanou koncentrace OC a EC ve čtvrtek stoupat, na podzim je v tento den zřejmý pokles. V zimě jsou koncentrace OC a EC relativně nejstabilnější v průběhu pracovního týdne, o víkendu nastává propad. Absolutně nejmenší kolísání pro úplně celý týden nastává na podzim, kdy je nedělní průměr v podstatě totožný s čtvrtečním.



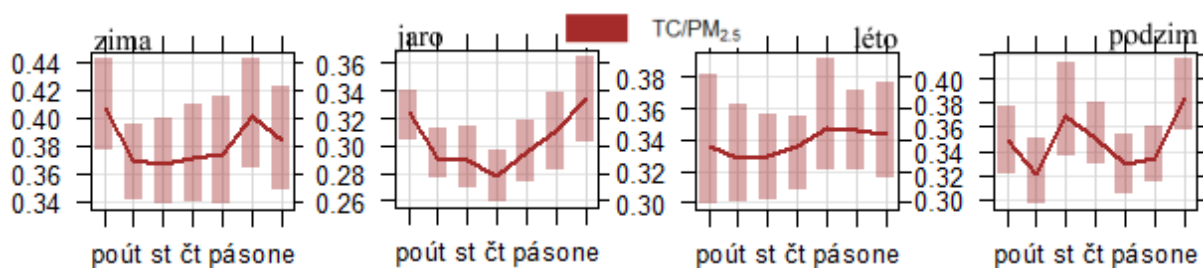
Obr. 46: Chod průměrných denních hodnot poměru OC/EC v průběhu průměrných týdnů každého ročního období (Carslaw a Ropkins, 2012).

Poměr OC/EC je pro všechna období roku nižší v průběhu pracovního týdne než o víkendu (obr. 46), což dobře poukazuje na vliv lidské činnosti. Tento trend je nejzřetelnější v létě, neboť zde nejsou víkendové koncentrace ovlivněny vytápěním a případná tvorba sekundárního OC je dobře zřejmá.



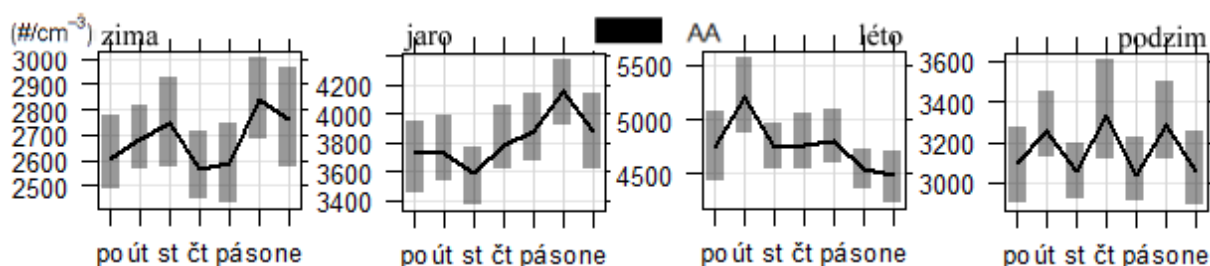
Obr. 47: Chod průměrných denních koncentrací PM_{10} a $PM_{2,5}$ [$\mu g \cdot m^{-3}$] v průběhu průměrných týdnů každého ročního období (Carslaw a Ropkins, 2012).

Také v chodu PM (na obr. 47) je znatelný pokles koncentrace o víkendu, zejména v neděli. Tento trend je dobře výrazný v létě a na podzim, což ukazuje vliv zemědělských aktivit na prašnost, která je o víkendu nižší. Méně jednoznačný je tento jev na jaře, kdy v týdnu jsou koncentrace nejvyšší nejprve v úterý a po středečním poklesu rostou až do soboty.



Obr. 48: Chod průměrných denních hodnot poměru $TC/PM_{2,5}$ v průběhu průměrných týdnů každého ročního období (Carslaw a Ropkins, 2012)

Podíl $TC/PM_{2,5}$ je s výjimkou podzimu nižší v průběhu pracovního týdne, ačkoliv je jeho kolísání na tomto časovém rozlišení relativně malé, viz obr. 48.⁸³



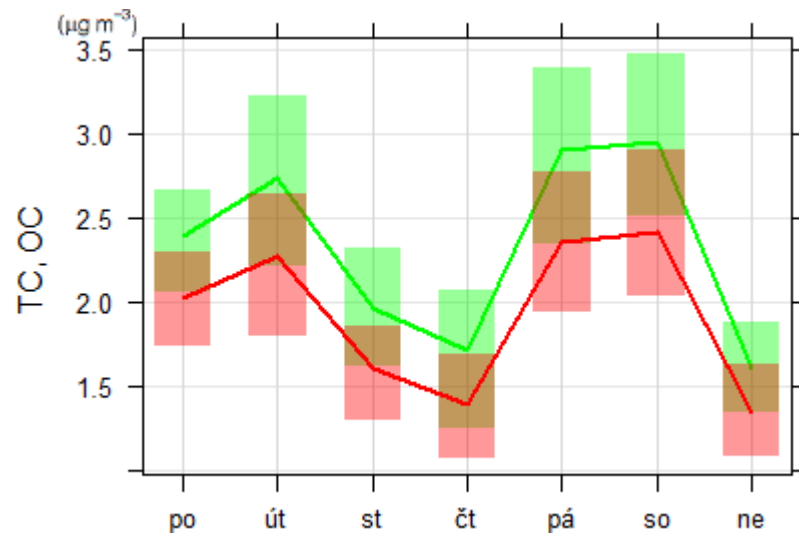
Obr. 49: Chod průměrných denních koncentrací AA [(počet částic) cm^{-3}] v průběhu průměrných týdnů každého ročního období (Carslaw a Ropkins, 2012)

Pro zimu a jaro roste koncentrace AA v průběhu pracovního týdne, projevuje se zde tedy proces akumulace částic, na jejich vzniku se podílí lidská pracovní činnost. Naopak v létě dosahuje

⁸³ Můžeme proto předpokládat, že lidská pracovní aktivita vytváří v oblasti mnoho zdrojů bezuhlíkatého PM, případně že se tato složka usazuje rychleji nežli samotné TC. $TC/PM_{2,5}$ je nejstabilnější v létě. Na podzim tento poměr vzrůstá i v průběhu pracovního týdne.

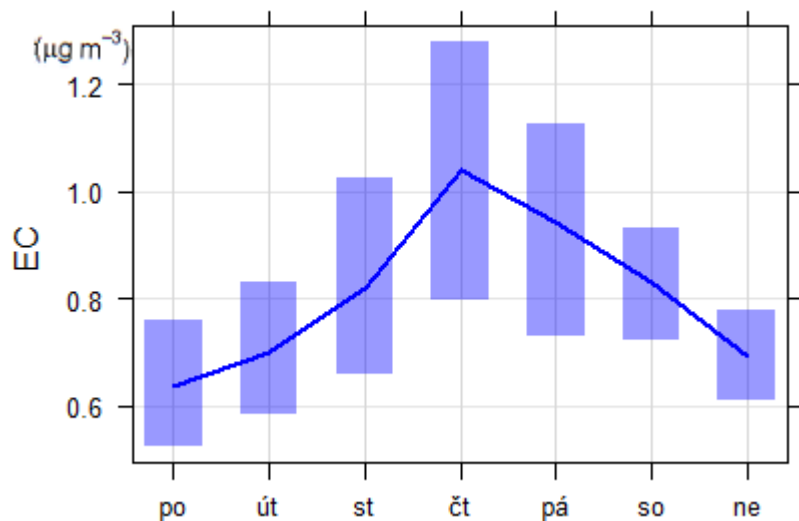
AA nejvyšších hodnot v úterý a pak klesá (obr. 49). Největší počet částic tedy nevzniká v souvislosti s pracovní aktivitou obyvatel. V období podzimu kolísají průměrné koncentrace v nejmenším intervalu a nevykazují žádný trend.

Ve srovnání s výsledky práce Mbengue et al., 2018, s. 341, Fig. 4. je rovněž znatelný vzestupný trend v průběhu týdenního cyklu. V našich datech znatelný pokles koncentrací TC uprostřed podzimního týdne nicméně citovaná práce nezaznamenává, k tomuto výkyvu pravděpodobně přispěl zejména rok 2017, kde je diskutované snížení velmi výrazné (obr. 50).



Obr. 50: Chod TC a OC [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] v průběhu průměrného podzimního týdnu roku 2017 (Carslaw a Ropkins, 2012)

V porovnání cyklu EC s citovanou prací se taktéž projevuje odlišnost v období podzimu, který je ovlivněn výkyvem v roce 2017. Další odchylka je zřetelná pro zimní období, kdy autoři citované práce zaznamenali výrazný nárůst koncentrací EC v úterý. Za tímto rozdílem stojí pravděpodobně rok 2018, kdy se EC navyšovalo v průběhu týdne pozvolněji, viz obr. 51.



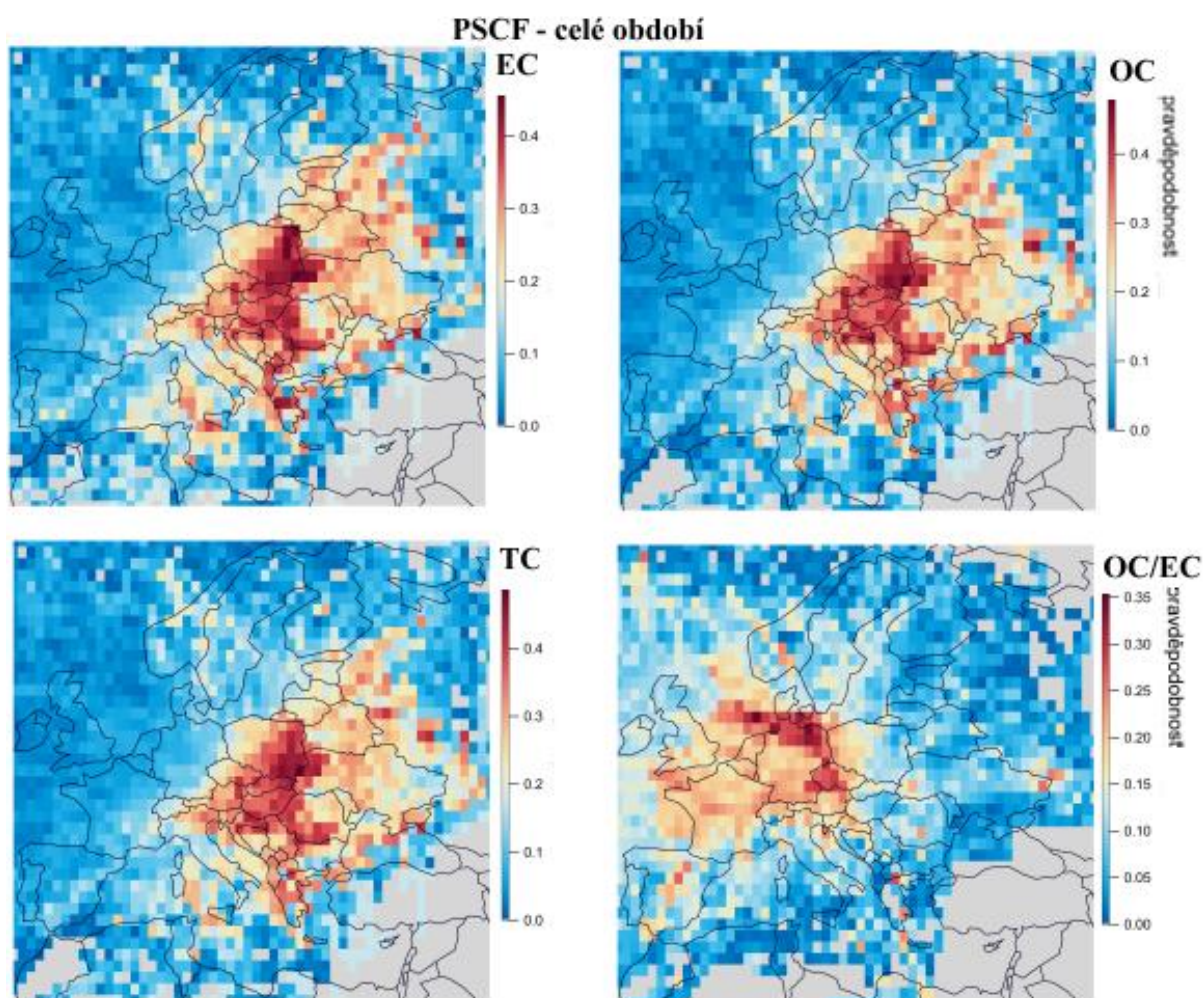
Obr. 51: Chod EC [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] v průběhu průměrného zimního týdnu roku 2018 (Carslaw a Ropkins, 2012)

2.2.6 Analýza metodami PSCF a CBPF

Funkce PSCF a CBPF byly spočítány pro celé šestileté období, pro studenou a teplou polovinu roku, roky 2013 a 2018. Kritériem pro obě funkce byl 0,75 percentil. Nejprve jsou diskutovány výsledky PSCF, poté CBPF.

S největší pravděpodobností k nám přinášejí zvýšené koncentrace EC, OC a TC vzdušné masy přicházející z regionů Východní a Jihovýchodní Evropy, pro tyto tři veličiny jsou výsledky takřka shodné. Významná je zejména jádrová oblast mezi ukrajinským Lvovem, polskou Varšavou a Krakovem. Vzdušné masy přicházející z této oblasti mají statisticky vyšší hodnoty EC, poměr OC/EC má oproti tomu přiřazeny nejvyšší hodnoty pro sever Německa, viz obr. 52.

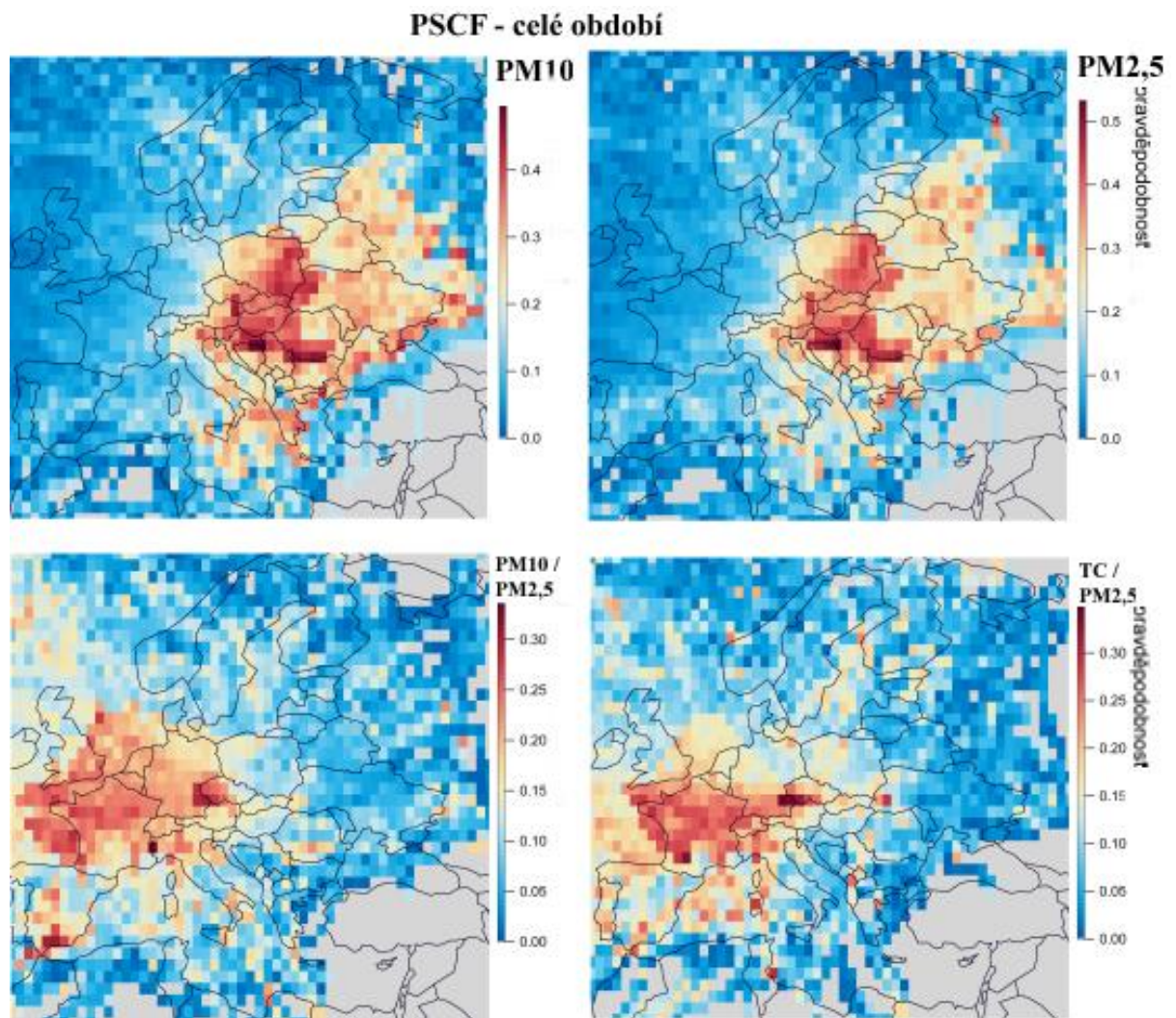
Výsledky PSCF pro veličiny EC, OC, TC ani OC/EC pro studenou a teplou polovinu se příliš neliší, je pozorovatelné jen snížení pravděpodobnosti u EC, OC a TC pro oblast Ukrajiny a Balkánského poloostrova v letním období, což svědčí o vlivu lokálního vytápění pevnými palivy na tamější vzduchové masy. Naopak polská jádrová oblast je výrazná i v létě. Pro podrobnější mapy viz přílohy 12 a 15.



Obr. 52: PSCF veličin EC, OC, TC a poměru OC/EC pro celé sledované období (Petit et al, 2017).

PSCF má pro veličinu PM velmi podobné výsledky jako pro TC, kromě výše diskutovaných lokalit je pro PM_{10} i $PM_{2,5}$ výrazná oblast trojmezí Chorvatska, Bosny a Hercegoviny a Srbska, kde se těží ropa a uhlí. Vysoká pravděpodobnost je přiřazena i oblasti hranice Bulharska a Rumunska, kde se podél Dunaje soustředí sídla i průmysl související se zdejší těžbou ropy. Jak ukazuje PSCF pro poměr $PM_{10}/PM_{2,5}$, z těchto oblastí k nám proudí zejména PM jemné frakce. PM pocházející z východu Evropy rovněž obsahuje nižší zastoupení uhlíkatého aerosolu, jak ukazuje PSCF pro $TC/PM_{2,5}$ (výsledek podrobněji vize na obr. 53).

V zimní polovině je oproti letní pozorován nárůst pravděpodobnosti pro $TC/PM_{2,5}$ v oblasti jihu Francie, v létě je rovněž nižší pravděpodobnost pro oblast pro PM z výše diskutovaného pomezí Rumunska a Bulharska, jinak se opět výsledky příliš neliší, viz přílohy 13 a 16.



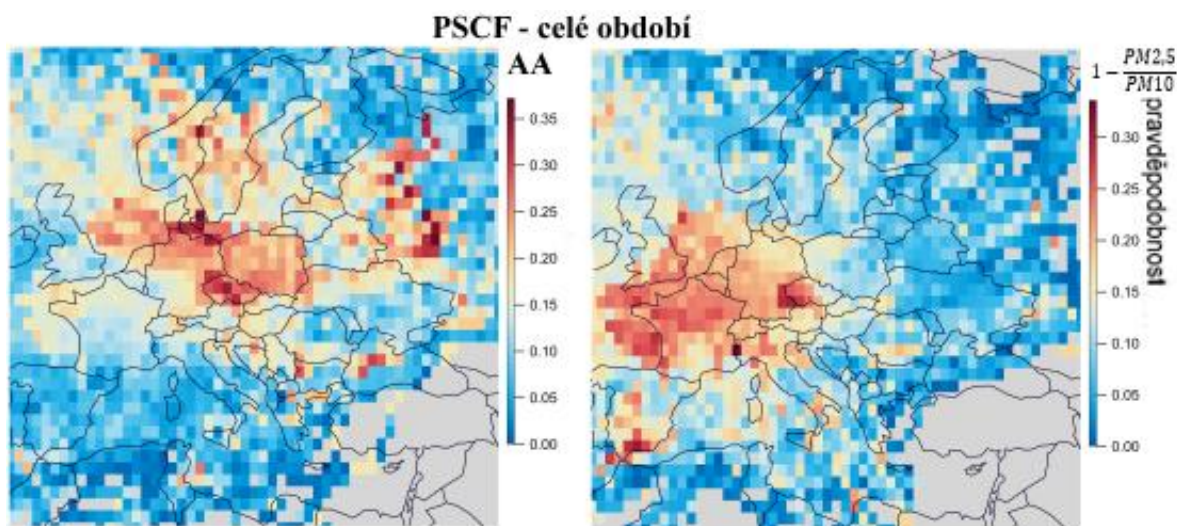
Obr. 53: PSCF veličin PM_{10} , $PM_{2,5}$ a poměrů $PM_{10}/PM_{2,5}$ a $TC/PM_{2,5}$ pro celé sledované období (Petit et al, 2017).

Pravděpodobnost naměření zvýšené koncentrace AA je nejvyšší pro vzdušné masy pocházející ze severu Německa a Dánska, tamější přístavní města jsou tedy pravděpodobně výrazným zdrojem AA. Pro tuto lokalitu byla zároveň vyčíslena i vysoká hodnota poměru OC/EC . Další mar-

kanční zdroje jsou také na západě Ruska. Zvýšená pravděpodobnost byla přiřazena rovněž Severnímu moři, kde se těží ropa a zemní plyn a je zde hustá lodní doprava, což se kombinuje s přirozeným aerosolem z moře. Vyšší hodnota PSCF je pro AA přiřazena také Polsku. V samotné ČR vyšla vysoká hodnota PSCF Praze a Brnu (obr. 54).

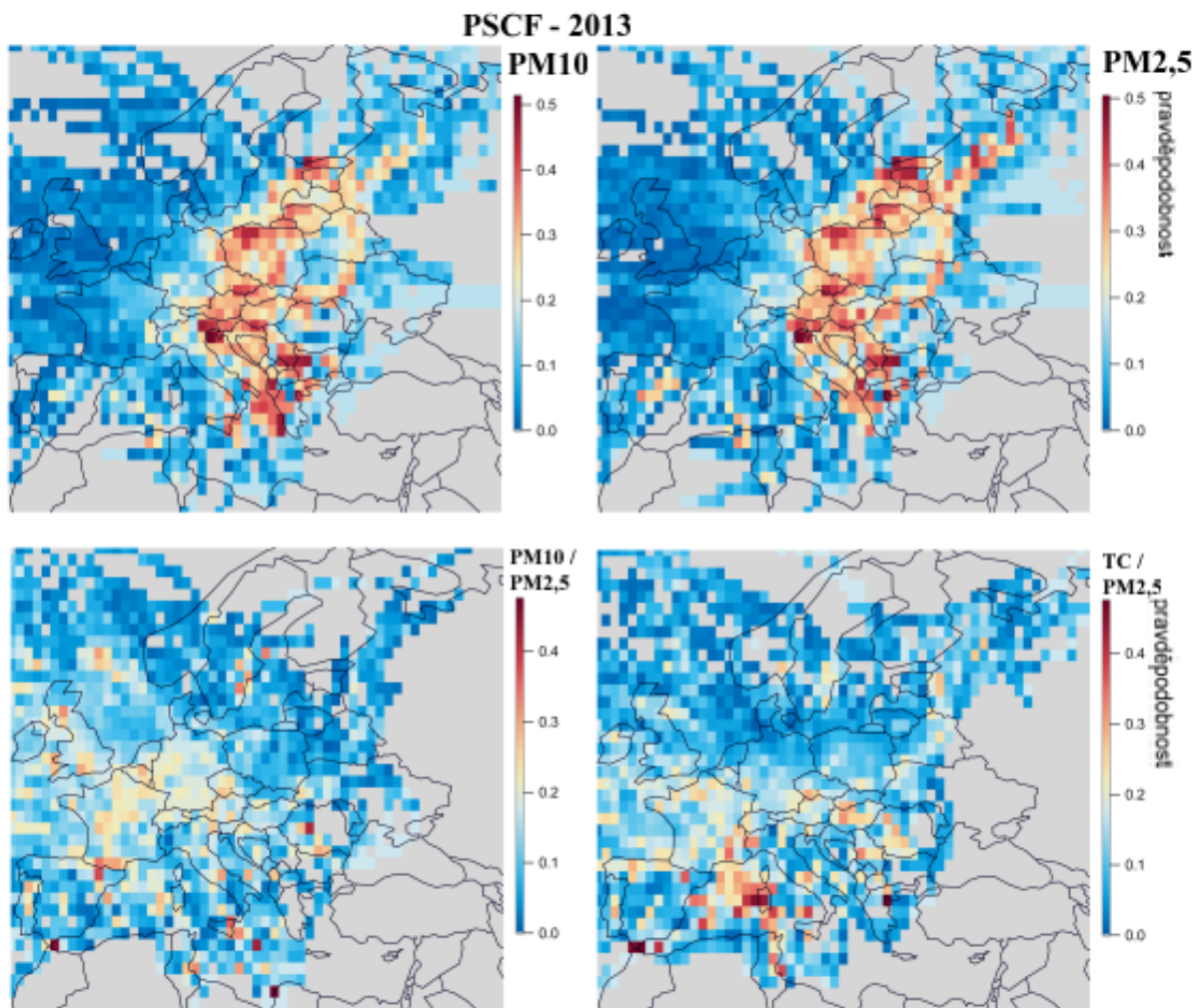
Pro AA se znatelně liší výsledky mezi studenou a teplou polovinou: v teplém půlroce jsou vyšší hodnoty přiřazeny severu Německa a Dánsku, oblasti těžby ropy v Norském a Severním moři. V půlroce chladném je však výraznější oblast Východní Evropy, kde se sezónně stávají nejdůležitějším zdrojem místní topeniště.

Zastoupení nejhrubšího modu PM na celkové hmotě PM_{10} je nejčastěji zaznamenáno při příchodu vzdušných mas ze západu Evropy, což je v průběhu roku takřka neměnné (viz příloha 14 a 17).



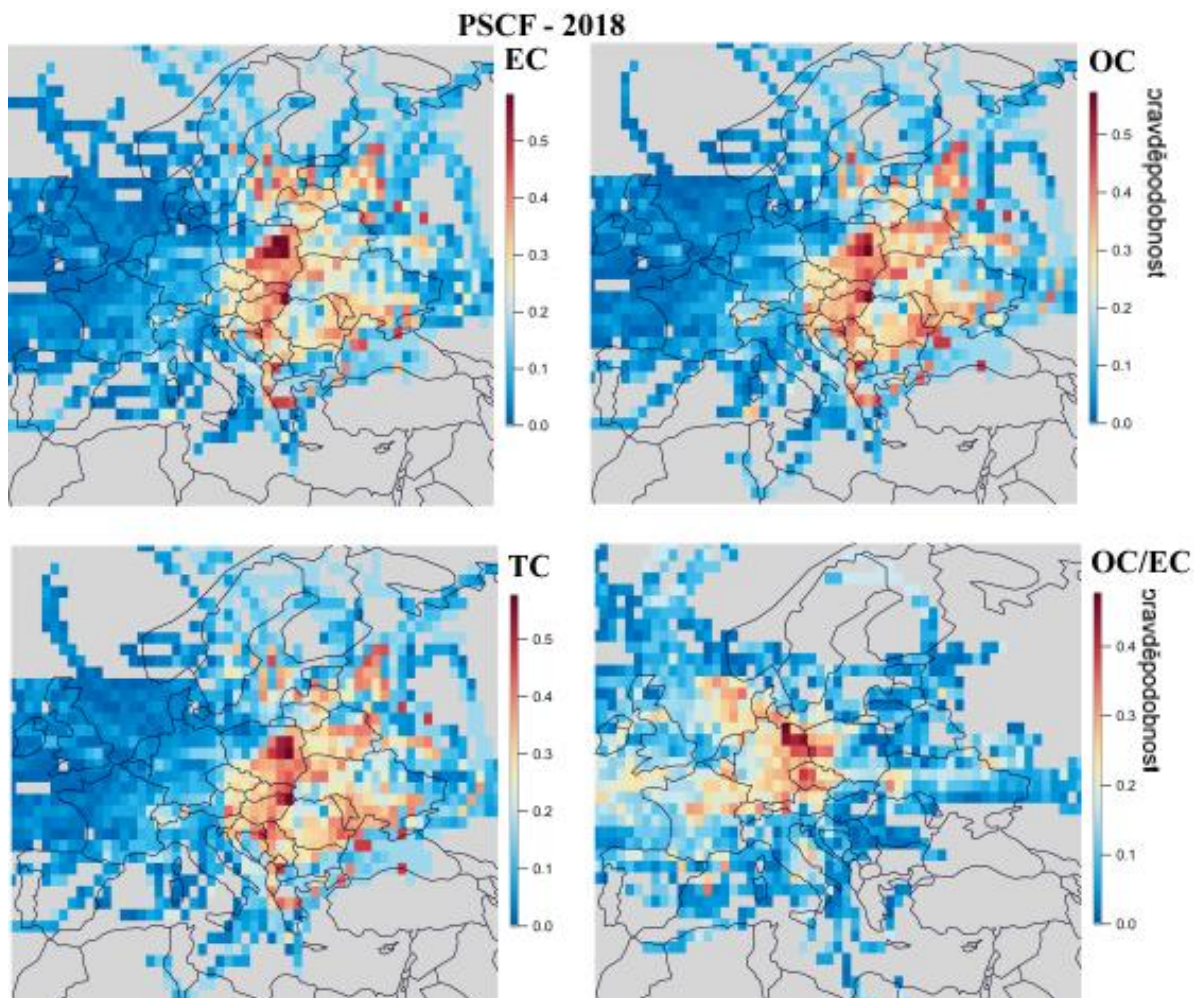
Obr. 54: PSCF veličin AA a zastoupení hrubého modu částic na PM_{10} pro celé sledované období (Petit et al, 2017).

V roce 2013 byla zaznamenána neobvykle nízká hodnota poměru $PM_{10}/PM_{2,5}$ (viz část 2.2.1), proto jsou zde zvláště zmíněny trajektorie PM pro tento rok. Oproti celkovému průměru byly vypočteny zvýšené hodnoty PSCF zejména u $PM_{2,5}$ pro oblast Pobaltských republik, které pozorované zvýšení poměru $PM_{10}/PM_{2,5}$ pravděpodobně zapříčiňují (obr. 55). To by mohlo být způsobeno nižší T v tomto roce oproti zbytku sledovaného období (World Weather Online, Riga Historical Weather).



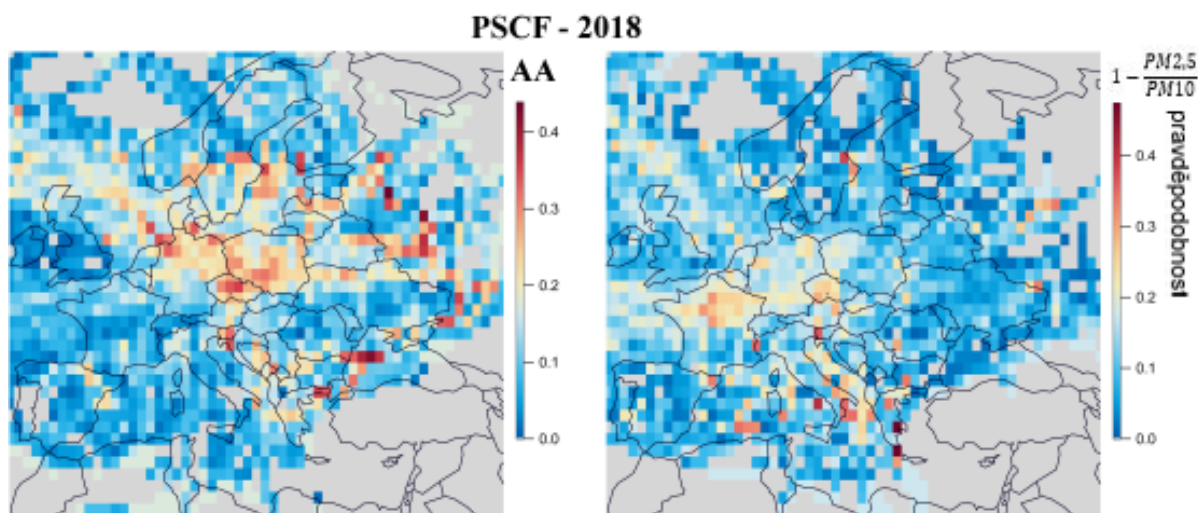
Obr. 55: PSCF veličin PM_{10} , $PM_{2,5}$ a poměrů $PM_{10}/PM_{2,5}$ a $TC/PM_{2,5}$ pro rok 2013 (Petit et al, 2017).

Rok 2018 byl výjimečný vysokými koncentracemi OC a TC i hodnotou OC/EC (viz část 2.2.1). Výsledek PSCF se však takřka neliší od dlouhodobějšího průměru (obr. 56), proto zvýšené hodnoty v tomto období pravděpodobně nejsou důsledkem neobvyklého transportu z jiných lokalit než v dalších sledovaných letech.



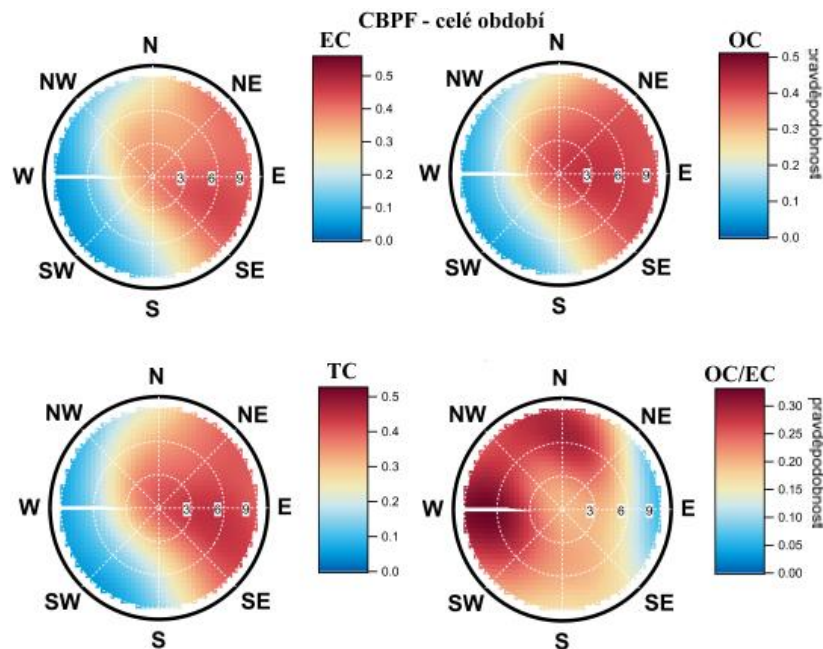
Obr. 56: PSCF veličin EC, OC, TC a poměru OC/EC pro rok 2018 (Petit et al, 2017).

Roku 2018 zasáhly okolí Athén výrazné požáry (Havlín, 2018). Jejich důsledkem je velmi vysoká hodnota PSCF nejhrubšího modu PM na celkové hmotě PM_{10} pro tuto oblast (na obr. 57).



Obr. 57: PSCF veličin AA a zastoupení hrubého modu částic na PM_{10} pro celé sledované období (Petit et al, 2017).

Nejvyšší koncentrace TC a jeho složek byly naměřeny při severovýchodním až jihovýchodním větru jen s malou závislostí na W_s (obr. 58). V tomto směru se nachází největší ze zdejších obcí, Košetice, stejně jako největší města regionu, Světlá nad Sázavou, Havlíčkův Brod, Humpolec, Jihlava nebo Pelhřimov, stejně jako dálnice D1. Z tohoto směru je naopak nejnižší pravděpodobnost vysoké hodnoty OC/EC, což může poukazovat na vyšší příspěvek spalování fosilních paliv. OC/EC má přiřazenou nejvyšší hodnotu CBPF pro západní vítr, na tom se může podílet dřevozpracovatelský závod v Lukavci se spalovnou biomasy (viz část 2.1.).

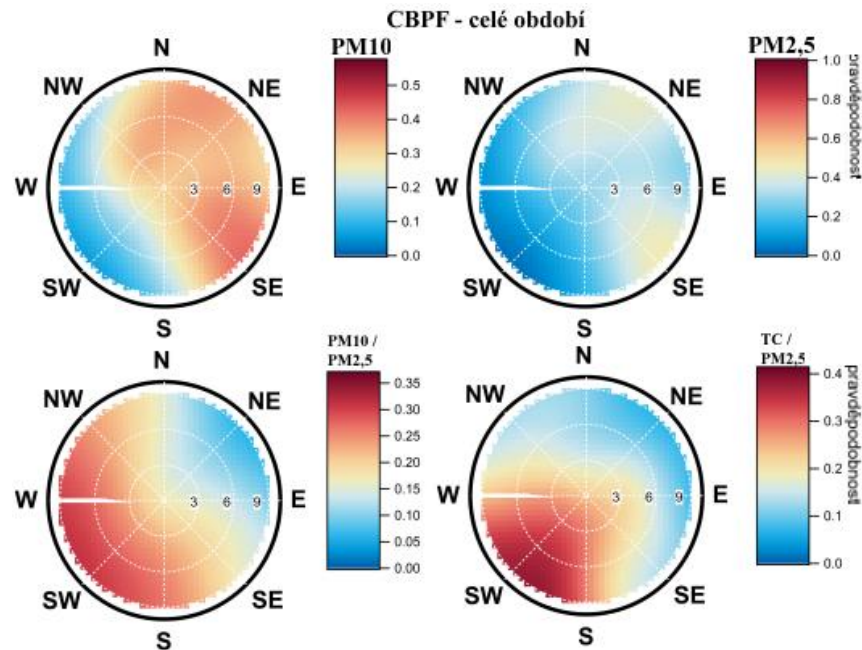


Obr. 58: CBPF veličin EC, OC, TC a poměru OC/EC pro celé sledované období (Petit et al, 2017).

V porovnání studené a teplé poloviny pro EC, OC a TC je znatelný rozdíl. V chladné polovině je výsledek CBPF podobnější výsledku pro celé období, s největším důrazem při větru vysoké W_s ve směru od zmiňovaných měst. V letní polovině je CBPF nejvyšší za bezvětří, východní směr zůstává výrazný jen pro EC. Grafické ztvárnění – viz přílohy 21 a 24.

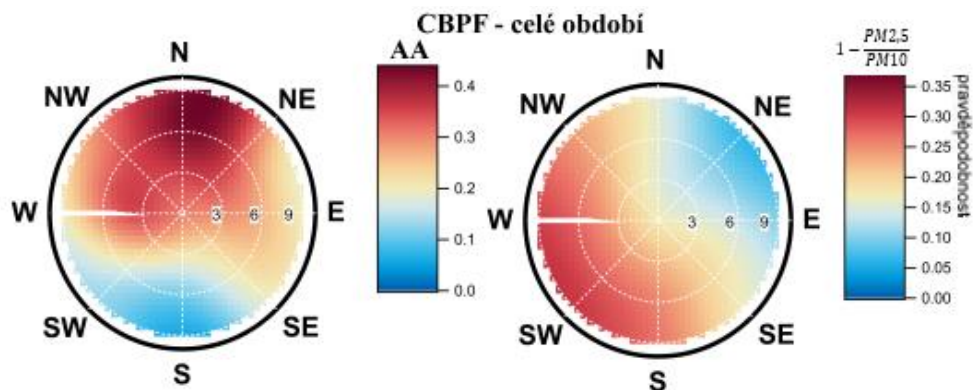
Největší hodnota CBPF pro PM je zaznamenána z velmi podobného směru jako pro TC a jeho složky. Při větru z východních směrů je také s největší pravděpodobností pozorovaný jemnější PM. Z jihozápadu (od Lukavce) je zaznamenán nejvyšší podíl TC/PM_{2,5} (obr. 59). Podobně jako u TC je výsledek CBPF pro PM při porovnání teplé a studené poloviny proměnlivý, městské oblasti jsou v zimě výraznějším zdrojem. Oproti tomu v letní polovině není výsledek CBPF

na W_s a W_d závislý. CBPF pro TC/PM_{2,5} je naopak konstantní v průběhu celého roku (viz přílohy 22 a 25).



Obr. 59: CBPF veličin PM₁₀, PM_{2,5} a poměrů PM₁₀/PM_{2,5} a TC/PM_{2,5} pro celé sledované období (Petit et al, 2017).

Nejvyšší hodnoty AA byly zaznamenávány při severním větru s nadprůměrnou W_s (obr. 60), v tomto směru se jeví jako důležitý zdroj D1. V letní polovině pravděpodobnost naměření zvýšené AA vzrůstá při vyšší W_s severního směru, v zimě spíše při rychlostech nižších. To odpovídá hypotéze o majoritním vlivu lokálních topenišť na AA v zimě. Největší zastoupení hrubého modu na PM₁₀ nastávalo v obou polovinách roku při jihozápadním větru, neboť v tomto směru je nejméně měst, která produkují více jemného PM (grafické výsledky pro teplou a studenou polovinu – přílohy 23 a 26).



Obr. 60: CBPF veličin AA a zastoupení hrubého modu částic na PM₁₀ pro celé sledované období (Petit et al, 2017).

ZÁVĚR

Jedním z hlavních cílů teoretické části práce bylo shrnout informace o vlivu AA na klima a lidské zdraví. Tato část zdůrazňuje vliv AA na globální klima, neboť ovlivňuje tvorbu oblačnosti a zejména ve stratosféře reguluje množství slunečního záření, které dopadne na zemský povrch. Stratosférický AA má rovněž vliv na oslabování ozonové vrstvy. Z globálního hlediska nicméně vzniká většina AA bez závislosti na lidské činnosti. V horizontu lokálním má však hlavní vliv AA antropogenní, který je rizikem pro zdraví lidí, kteří jsou mu přímo vystaveni. Z hlediska zdravotního je nejrizikovější jemný AA, který proniká nejhluběji dýchací soustavou. Důležitým kritériem rizikovosti je i chemické složení, z tohoto hlediska jsou nebezpečné zejména karcinogenní PAH vznikající spalováním.

Cílem praktické části bylo popsat kvalitativní a kvantitativní vlastnosti pozorovaného aerosolu a odhadnout jeho zdroje v lokálním i evropském měřítku. Výsledky ukázaly majoritní vliv lidské činnosti, nejvíce domácího vytápění, na množství i vlastnosti aerosolu. Trendy v koncentracích zejména EC, OC a TC markantně záporně korelují s T, která vytápění podmiňuje. Původ těchto částic ve spalovacích procesech dokládá také nižší zastoupení hrubého aerosolu vůči jemnému. V létě se projevují více jevy přírodní, důležitá je tvorba hrubého PM erozí a procesy vzniku sekundárního OC. K těmto jevům přispívají v teplém půlroce také činnosti zemědělské. Sledován byl trend také v denním chodu koncentrací, ten odpovídá lidské aktivitě a výšce mezní vrstvy atmosféry, koncentrace jsou nejvyšší hlavně večer. Koncentrace se vyvíjejí i v průběhu týdne, o víkendu bývají celkově nižší, což pravděpodobně poukazuje na vliv lidské pracovní činnosti.

Analýza transportu aerosolu pomocí CBPF s PSCF dále podporuje hypotézu antropogenního vlivu, neboť obě metody přiřazovaly zvýšené pravděpodobnosti naměření zvýšených koncentrací zejména pro obydlené a průmyslové oblasti, obzvláště východní a jihovýchodní Evropy. Porovnání výsledků těchto funkcí pro teplé a studené poloviny roku rovněž demonstrovalo vliv domácího vytápění.

Práce *Four Years of Highly Time Resolved Measurements of Elemental and Organic Carbon at a Rural Background Site in Central Europe* (Mbengue et al., 2018) zpracovávala data z NAOK mezi lety 2013–16. Tato práce analyzuje data z košetické stanice v období o dva roky delší, proto spoluvytváří kontinuitu ve zpracování měření na této atmosférické observatoři. V budoucnu tak může přispět při zhodnocování dlouhodobého vývoje kvantity a kvality AA na této lokalitě.

POUŽITÁ LITERATURA

Tištěné zdroje

BRANIŠ, Martin, HŮNOVÁ Iva et al. *Atmosféra a klima: Aktuální otázky ochrany ovzduší*. Praha: Karolinum, 2009. ISBN 978-80-246-1598-1.

HINDS, William C. *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. John Wiley & Sons, 1999. ISBN: 978-0-471-19410-1

KOMÍNKOVÁ, Kateřina, Alice DVORSKÁ and Pavel PROŠEK. *Meteorologické stožáry – historie, účel a současné využití v České republice (Meteorological masts – history, purpose and current uses in the Czech Republic)*. Meteorologické zprávy, Český hydrometeorologický ústav, 2015, vol. 68, No 5, p. 148-152. ISSN 0026-1173.

KULMALA, M. et al. *Direct Observations of Atmospheric Aerosol Nucleation*. *Science*. New York Avenue NW: American Association for the Advancement of Science, 2013, (339), 943-946. ISSN 1095-9203.

MAŠKOVÁ, Ludmila, et al. *Stanovení velikostní distribuce inhalačního aerosolu za podmínek dýchacího ústrojí*. *Chemické listy*, 2018, 112.7: 446-449.

MBENGUE, Saliou, Michal FUSEK, Jaroslav SCHWARZ, Petr VODIČKA, Adéla HOLUBOVÁ ŠMEJKALOVÁ a Ivan HOLOBEK. *Four years of highly time resolved measurements of elemental and organic carbon at a rural background site in Central Europe*. Elsevier. 2018, 2018, (182), 335-346

MOLDAN, Bedřich. *Podmaněná planeta*. Charles University in Prague, Karolinum Press, 2015. ISBN 978-80-246-1580-6

ROM, William N.; MARKOWITZ, Steven B. (ed.). *Environmental and occupational medicine*. Lippincott Williams & Wilkins, 2007. ISBN-13: 978-0781762991

SEINFELD, J. H., et al. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. Wiley, 2006. ISBN-13: 978-0-471-72017-1

STULL, R. B. *An introduction to boundary layer meteorology*. Springer Science & Business Media. Netherlands: Springer, Inc. 1988. ISBN 978-9-027-727-695

VODIČKA, P.; SCHWARZ, J. *Analýza elementárního a organického uhlíku v aerosolech*. *Chemické listy*, 2017, 111.6: 354-362.

VON ENGELN, Axel. *A Planetary Boundary Layer Height Climatology Derived from ECMWF Reanalysis Data*. *JOURNAL OF CLIMATE*. 2013, **17**(26), 6575-6590.

ZÍKOVÁ, Naděžda a Vladimír ŽDÍMAL. *Long-Term Measurement of Aerosol Number Size Distributions at Rural Background Station Košetice*. *Aerosol and Air Quality Research*. 2013, 2013, 13, 1465 [cit. 2019-10-17]. ISSN 2071-1409.

Elektronické zdroje

Aerodynamic Particle Sizer. *MANCHEstER 1824: The University of Manchester* [online]. Manchester: The University of Manchester [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <http://www.cas.manchester.ac.uk/restools/instruments/aerosol/aps/>

Aerosol Science & Engineering [online]. USA: University of Florida, Washington University in St. Louis [cit. 2020-01-29]. Dostupné z: <https://aerosol.ees.ufl.edu/default.htm>

Air Quality Criteria for Particulate Matter: Volume II. Research Triangle Park, NC, USA: EPA United States Environmental Protection Agency, 2004. EPA/600/P-99/002bF. [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: https://ofmpub.epa.gov/eims/eimscomm.getfile?p_download_id=435946

BALÁKOVÁ L. et al. Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2017: Grafická ročenka 2017 [online]. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2018 [cit. 2020-02-26]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/17groc/gr17cz/Ob-sah_CZ.html

CARSLAW, D.C. and K. ROPKINS, (2012). *openair — an R package for air quality data analysis. Environmental Modelling & Software*. Volume 27-28, 52-61.

DAS, Prashant, et al. *Targeting inhaled aerosol delivery to upper airways in children: Insight from computational fluid dynamics (CFD)*. *PloS one*, 2018, 13.11. [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0207711>

Dýchací systém. *Biomach, výpisky z biologie* [online]. [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <http://www.biomach.cz/biologie-cloveka/dychaci-system>

Global Data Assimilation System (GDAS). *NOAA National Centers for Environmental Information* [online]. USA: USA.gov [cit. 2020-08-11]. Dostupné z: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-data-assimilation-system-gdas>

HAVLÍN, Tomáš. Řekům se nedaří uhasit lesní požáry, úřady vyhlásily v blízkosti Atén nouzový stav. In: *Irozhlas.cz* [online]. Praha: Český rozhlas [cit. 2021-01-22]. Dostupné z: https://www.irozhlas.cz/zpravy-svet/pozary-v-recku-ohen-lesni-pozar-evaku-ace_1807232101_per

HOLUBOVÁ ŠMEJKALOVÁ, Adéla, Naděžda ZÍKOVÁ, Vladimír ŽDÍMAL, Helena PLACHÁ a Miroslav BITTER. Atmospheric aerosol growth rates at different background station types. *Environmental Science and Pollution Research*. Springer, 2020. [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-020-11424-5>

HYSPLIT. *NOAA National Centers for Environmental Information* [online]. USA: USA.gov, 2020 [cit. 2020-11-04]. Dostupné z: <https://www.arl.noaa.gov/hysplit/hysplit/>

IPCC, Intergovernmental Panel On Climate Change. *Special report on global warming of 1.5 C (SR15)*. 2019. [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2019.100001>

KUBELOVÁ, Lucie. *Study of aerosol properties with high time resolution*. Praha, 2017 [cit. 2019-10-19]. Disertační práce. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, studijní

program: Environmentální vědy. [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/detail/129232/>

LHOTKA, Radek. *Určování zdrojů PAH ve střední Evropě*. Praha, 2019. Diplomová práce. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Ústav pro životní prostředí. Vedoucí práce RNDr. Naděžda Zíková, Ph.D. [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/106566/120330404.pdf?sequence=1>

M. Vrabec, R. Čekal, A. Jačková, L. Elleder, L. Černá. Roční zpráva o hydrometeorologické situaci v České republice [online]. Praha, 2014 [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/hydro/ohp/2013_RZ.pdf.

MASIOL, et al. *Differential Probability Functions for Investigating Long-term Changes in Local and Regional Air Pollution Sources*. *Aerosol Air Qual.*, 2019. Res. 19: 724-736. [cit. 2020-01-04] Dostupné z: <https://aaqr.org/articles/aaqr-18-09-0a-0327>

NOVOTNÁ, Nikola. *Měření rozptylu světla na atmosférickém aerosolu*. Praha, 2015. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Ústav pro životní prostředí. Vedoucí práce RNDr. Naděžda Slezáčková Zíková, Ph.D. [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/detail/137624/>

OBSERVATOŘ KOŠETICE. *ACTRiS: CZECH REPUBLIC* [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.actris-ri.cz/cs/menu/naok/observator-kosetice/>

OTOPNÁ SEZONA. *Český hydrometeorologický ústav* [online]. ČR [cit. 2020-09-22]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/otopna-sezona>

Petit, J.-E., Favez, O., Albinet, A., Canonaco, F.: A user-friendly tool for comprehensive evaluation of the geographical origins of atmospheric pollution: wind and trajectory analyses. *Environmental Modelling and Software*, 88C, 183-187, doi: 10.1016/j.envsoft.2016.11.022, 2017.

Riga Historical Weather. *World Weather Online* [online]. 2021 [cit. 2021-01-22]. Dostupné z: <https://www.worldweatheronline.com/riga-weather-history/riga/lv.aspx>

Spores and Pollens. *Sporomex* [online]. UK: Sporomex Limited, c2010 - 2020 [cit. 2020-08-11]. Dostupné z: <https://www.sporomex.co.uk/technology/51-pollenspores>

TECHNICKÉ PARAMETRY. *ACTRiS: CZECH REPUBLIC* [online]. ČR [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.actris-ri.cz/cs/menu/naok/atmosfericky-stozar/technicke-parametry/>

TJIPUTRA, J. F.; GRINI, A.; LEE, H. *Impact of idealized future stratospheric aerosol injection on the large-scale ocean and land carbon cycles*. *Journal of Geophysical Research: Bio-geosciences*, 2016, 121.1: 2-27. [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2015JG003045>

URIA-TELLAETXE, Iratxe; CARSLAW, David C. *Conditional bivariate probability function for source identification*. *Environmental modelling & software*, 2014, 59: 1-9. dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815214001339>

- Územní teploty. *Český hydrometeorologický ústav* [online]. ČR [cit. 2020-09-10]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/informace-pro-vas/rocní-vyhodnocení/meteorologicka-pozorovani>
- VODIČKA, Petr. *Studium uhlikatých aerosolů na předměstské stanici ve střední Evropě ve vysokém časovém rozlišení*. Praha, 2015. Disertační práce. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. Vedoucí práce Jaroslav Schwarz: [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://vufind.techlib.cz/Record/000967603>
- Vrstva atmosféry mezní. *Elektronický meteorologický slovník* [online]. ČR: ČMeS, 2017 [cit. 2020-11-07]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/heslo/4423>
- WALDRON, H. A. *A brief history of scrotal cancer*. *British journal of industrial medicine*, 1983, 40.4: 390. [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1009212/>
- WILKINS, E. T. *Air pollution and the London fog of December, 1952*. *Journal of the Royal Sanitary Institute*, 1954, 74.1: 1-21. [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/13118590/>
- XI, Jinxiang; LONGEST, P. Worth. *Transport and deposition of micro-aerosols in realistic and simplified models of the oral airway*. *Annals of biomedical engineering*, 2007, 35.4: 560-581. [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17237991/>
- Zákon č. 201/2012 Sb.: Zákon o ochraně ovzduší. *Zákony pro lidi* [online]. 2010 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-201#cast1>

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Tab. 1: Zdroje a odhady globálních emisí AA. Do přehledu není zahrnut velmi významná část AA, oblaka zkondenzované vodní páry (Hinds, 1999, s. 305).....	15
Tab. 2: Přehled průměrných teplot a rychlostí větru	28
Tab. 3: Zastoupení neprovedených měření v souboru dat	30
Tab. 4 Přehled naměřených koncentrací a směrodatných odchylek aerosolů a základních meteorologických veličin pro jednotlivé roky.....	32
Tab. 5: Přehled naměřených koncentrací aerosolů a základních meteorologických veličin pro studený půlrok	40
Tab. 6 Přehled naměřených koncentrací aerosolů a základních meteorologických veličin pro teplý půlrok	41
Tab. 7: Přehled naměřených koncentrací aerosolů a základních meteorologických veličin pro jarní období měřící kampaně.....	48
Tab. 8: Přehled naměřených koncentrací aerosolů a základních meteorologických veličin pro letní období měřící kampaně.....	49
Tab. 9: Přehled naměřených koncentrací aerosolů a základních meteorologických veličin pro podzimní období měřící kampaně.....	50
Tab. 10: Přehled naměřených koncentrací aerosolů a základních meteorologických veličin pro zimní období měřící kampaně.....	51
Obr. 1: Struktura částic vybraných AA. Jednotlivé snímky nejsou ve stejném rozlišení. (Hinds, 1999, s. 3-7).....	10
Obr. 2: Schéma velikostní distribuce jednotlivých modů, jejich zastoupení v atmosféře i pochody vedoucí k jejich vzniku a zániku. Schéma odpovídá městskému AA (Hinds, 1999, s. 313; Rom et al., 2007, s. 1488).	12
Obr. 3: Schematické znázornění procesu nukleace (Kulmala et al., 2013, s. 346).....	13
Obr. 4: Struktura benzo[a]pyrenu	16
Obr. 5: Dýchací soustava a přibližná depozice AA v ní (podle Biomach, Dýchací systém; Kubelová, 2017, s. 16).....	19
Obr. 6: Poloha NAOK (Mapy.cz, Google Maps)	21
Obr. 7: Schéma SMPS (Kubelová, 2017, s. 42.....	23
Obr. 8: Schéma APS (MANCHEstER 1824, Aerodynamic Particle Sizer)	24
Obr. 9: Průběh analýzy v použitém protokolu EUSAAR2_short. V hranatých závorkách je vždy uvedena teplota, na níž je filtr zahřát, a čas trvání daného teplotního programu. (Vodička, Schwarz, 2017, s. 356)	26
Obr. 10: Vývoj průměrných denních $T[^\circ\text{C}]$ a $Ws [\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ v průběhu sledovaného období (Carslaw a Ropkins, 2012)	28
Obr. 11 Větrná růžice (Carslaw a Ropkins, 2012).....	29
Obr. 12: Průměrné denní hodnoty TC, EC, OC $[\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$, poměru OC/EC, AA [(počet částic) cm^{-3}], $\text{PM}_{10} [\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ a poměru $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2,5}$ (Carslaw a Ropkins, 2012).....	33
Obr. 13: Korelační koeficienty [%] mezi jednotlivými veličinami pro celé sledované období (Carslaw a Ropkins, 2012)	34
Obr. 14: Vývoj koncentrací TC, OC a EC $[\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012).....	35
Obr. 15: Vývoj poměru OC/EC v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012).....	36
Obr. 16: Vývoj koncentrací AA [(počet částic) cm^{-3}] v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012).....	36

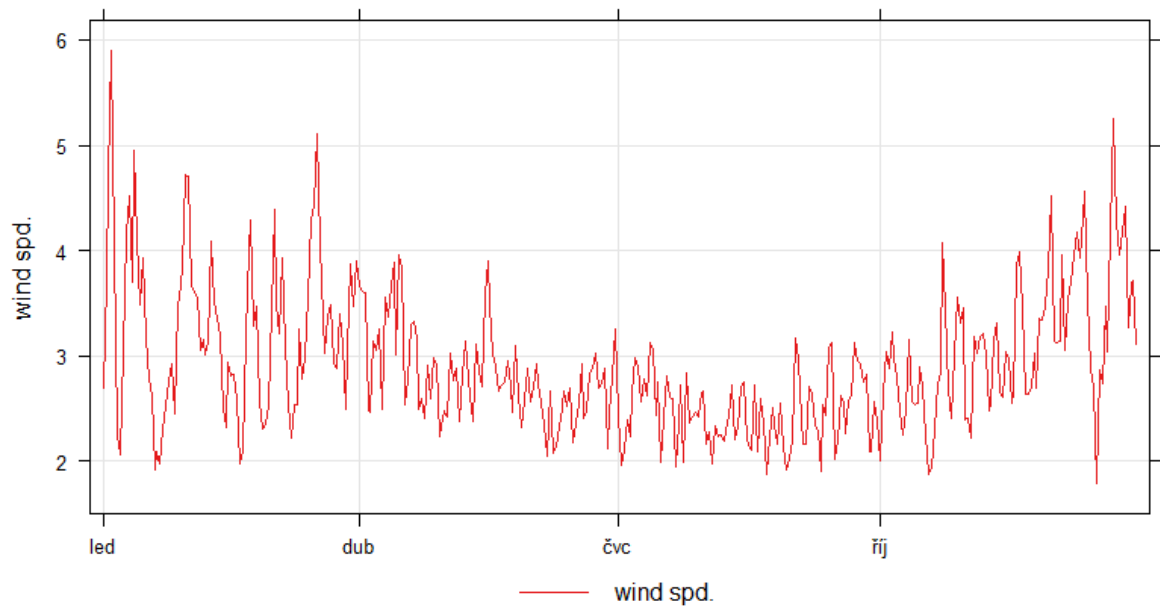
Obr. 17: Vývoj poměru $PM_{10}/PM_{2.5}$ v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012).....	37
Obr. 18: Vývoj zastoupení TC na celkovém $PM_{2.5}$ v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012).	38
Obr. 19: Korelační koeficienty [%] mezi jednotlivými veličinami pro studenou polovinu roku (Carslaw a Ropkins, 2012)	40
Obr. 20 Korelační koeficienty [%] mezi jednotlivými veličinami pro teplou polovinu roku (Carslaw a Ropkins, 2012)	41
Obr. 21: Chod denních koncentrací TC a OC [$\mu g \cdot m^{-3}$] v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012). Zajímavostí je vybarvený peak označený čtverečkem na přelomu dubna a května. Jedná se o důsledek každoročního pálení čarodějnic.	42
Obr. 22: Chod průměrných denních poměrů OC/EC v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012). Kroužkem jsou zvýrazněny periody pravděpodobně doprovázené nejintenzivnější tvorbou sekundárního OC, čtvereček značí zvýšenou tvorbu EC pravděpodobně vlivem zemědělství.	44
Obr. 23: Chod průměrných denních hodnot poměru $TC/PM_{2.5}$ v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012).....	44
Obr. 24: Chod průměrných měsíčních koncentrací PM [$\mu g \cdot m^{-3}$] v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012).....	45
Obr. 25: Chod průměrných denních hodnot poměru $PM_{10}/PM_{2.5}$ v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012).....	45
Obr. 26: Chod průměrného denního zastoupení hrubého modu částic na PM_{10} v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012).	46
Obr. 27: Chod průměrných denních koncentrací hrubého modu částic ($PM_{10}-PM_{2.5}$) v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012).	47
Obr. 28: Graf hodnoty poměru OC/EC v průběhu jara 2018 (Carslaw a Ropkins, 2012). I přes neúplnost dat jsou pozorovatelná výrazná zvýšení tohoto poměru poukazující na možný výskyt sekundárního OC. Pro porovnání s jarem 2017 viz příloha 3.....	48
Obr. 29: Korelační koeficienty [%] mezi jednotlivými veličinami pro jaro (Carslaw a Ropkins, 2012).....	49
Obr. 30: Korelační koeficienty [%] mezi jednotlivými veličinami pro léto (Carslaw a Ropkins, 2012).....	50
Obr. 31: Korelační koeficienty [%] mezi jednotlivými veličinami pro podzim (Carslaw a Ropkins, 2012).....	51
Obr. 32: Korelační koeficienty [%] mezi jednotlivými veličinami pro zimu (Carslaw a Ropkins, 2012).....	52
Obr. 33: W_s [$m \cdot s^{-1}$] v průběhu průměrných dnů každého ročního období (Carslaw a Ropkins, 2012).....	53
Obr. 34: Chod koncentrací TC, OC EC [$\mu g \cdot m^{-3}$] v průběhu průměrných dnů každého ročního období (Carslaw a Ropkins, 2012)	53
Obr. 35: Chod T [$^{\circ}C$] v průběhu průměrných dnů každého ročního období (Carslaw a Ropkins, 2012).....	54
Obr. 36: Chod poměru OC/EC v průběhu průměrných dnů každého ročního období (Carslaw a Ropkins, 2012).....	55
Obr. 37: Chod koncentrací PM [$\mu g \cdot m^{-3}$] v průběhu průměrných dnů každého ročního období (Carslaw a Ropkins, 2012)	55
Obr. 38: Chod poměru $TC/PM_{2.5}$ v průběhu průměrných dnů každého ročního období (Carslaw a Ropkins, 2012).....	56
Obr. 39: Chod koncentrací AA [(počet částic) cm^{-3}] v průběhu průměrných dnů každého ročního období (Carslaw a Ropkins, 2012).....	56

Obr. 40: Denní chody TC a OC [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] zaznamenané pro každý z roků měřicí kampaně (Carslaw a Ropkins, 2012)	57
Obr. 41: Denní chody EC [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] zaznamenané pro každý z roků měřicí kampaně (Carslaw a Ropkins, 2012).....	57
Obr. 42: Denní chody poměru OC/EC zaznamenané pro každý z roků měřicí kampaně (Carslaw a Ropkins, 2012).....	58
Obr. 43: Denní chody PM [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] zaznamenané pro každý z roků měřicí kampaně (Carslaw a Ropkins, 2012).....	58
Obr. 44: Denní chody PM [(počet částic) cm^{-3}] zaznamenané pro každý z roků měřicí kampaně (Carslaw a Ropkins, 2012).....	59
Obr. 45: Chod průměrných denních koncentrací TC, OC EC [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] v průběhu průměrných týdnů každého ročního období (Carslaw a Ropkins, 2012).	60
Obr. 46: Chod průměrných denních hodnot poměru OC/EC v průběhu průměrných týdnů každého ročního období (Carslaw a Ropkins, 2012).....	60
Obr. 47: Chod průměrných denních koncentrací PM ₁₀ a PM _{2,5} [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] v průběhu průměrných týdnů každého ročního období (Carslaw a Ropkins, 2012).	61
Obr. 48: Chod průměrných denních hodnot poměru TC/PM _{2,5} v průběhu průměrných týdnů každého ročního období (Carslaw a Ropkins, 2012).....	61
Obr. 49: Chod průměrných denních koncentrací AA [(počet částic) cm^{-3}] v průběhu průměrných týdnů každého ročního období (Carslaw a Ropkins, 2012).....	61
Obr. 50: Chod TC a OC [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] v průběhu průměrného podzimního týdnu roku 2017 (Carslaw a Ropkins, 2012)	62
Obr. 51: Chod EC [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] v průběhu průměrného zimního týdnu roku 2018 (Carslaw a Ropkins, 2012).....	62
Obr. 52: PSCF veličin EC, OC, TC a poměru OC/EC pro celé sledované období (Petit et al, 2017).....	63
Obr. 53: PSCF veličin PM ₁₀ , PM _{2,5} a poměrů PM ₁₀ /PM _{2,5} a TC/ PM _{2,5} pro celé sledované období (Petit et al, 2017).	64
Obr. 54: PSCF veličin AA a zastoupení hrubého modu částic na PM ₁₀ pro celé sledované období (Petit et al, 2017).	65
Obr. 55: PSCF veličin PM ₁₀ , PM _{2,5} a poměrů PM ₁₀ /PM _{2,5} a TC/ PM _{2,5} pro rok 2013 (Petit et al, 2017).....	66
Obr. 56: PSCF veličin EC, OC, TC a poměru OC/EC pro rok 2018 (Petit et al, 2017).	67
Obr. 57: PSCF veličin AA a zastoupení hrubého modu částic na PM ₁₀ pro celé sledované období (Petit et al, 2017).	67
Obr. 58: CBPF veličin EC, OC, TC a poměru OC/EC pro celé sledované období (Petit et al, 2017).....	68
Obr. 59: CBPF veličin PM ₁₀ , PM _{2,5} a poměrů PM ₁₀ /PM _{2,5} a TC/ PM _{2,5} pro celé sledované období (Petit et al, 2017).	69
Obr. 60: CBPF veličin AA a zastoupení hrubého modu částic na PM ₁₀ pro celé sledované období (Petit et al, 2017).	69

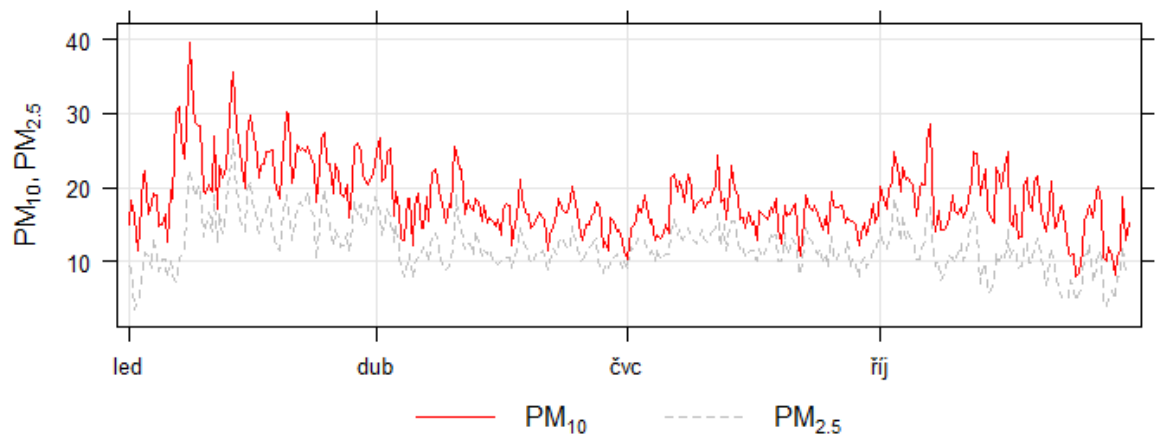
SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1: Průměrné denní rychlosti větru [$m \cdot s^{-1}$] v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012).
- Příloha 2: Chod denních koncentrací PM [$\mu g \cdot m^{-3}$] v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012).
- Příloha 3: Graf hodnot poměru OC/EC v průběhu jara 2017
- Příloha 4: W_s [$m \cdot s^{-1}$] v průběhu průměrného zimního dne (Carslaw a Ropkins, 2012).
- Příloha 5: Chod koncentrací TC, OC a EC [$\mu g \cdot m^{-3}$] v průběhu průměrného zimního dne (Carslaw a Ropkins, 2012).
- Příloha 6: Chod koncentrací TC, OC a EC [$\mu g \cdot m^{-3}$] v průběhu průměrného jarního dne (Carslaw a Ropkins, 2012).
- Příloha 7: W_s [$m \cdot s^{-1}$] v průběhu průměrného jarního dne (Carslaw a Ropkins, 2012).
- Příloha 8: Chod koncentrací TC, OC a EC [$\mu g \cdot m^{-3}$] v průběhu průměrného letního dne (Carslaw a Ropkins, 2012).
- Příloha 9: Chod koncentrací TC, OC a EC [$\mu g \cdot m^{-3}$] v průběhu průměrného podzimního dne (Carslaw a Ropkins, 2012).
- Příloha 10: Chod poměru OC/TC v průběhu průměrného roku (Carslaw a Ropkins, 2012).
- Příloha 11: Chod průměrných denních W_s [$m \cdot s^{-1}$] a T [$^{\circ}C$] v průběhu průměrných týdnů každého ročního období (Carslaw a Ropkins, 2012).
- Příloha 12: PSCF veličin EC, OC, TC a poměru OC/EC pro teplou polovinu roku (Petit et al, 2017).
- Příloha 13: PSCF veličin PM₁₀, PM_{2,5} a poměrů PM₁₀/PM_{2,5} a TC/ PM_{2,5} pro teplou polovinu roku (Petit et al, 2017).
- Příloha 14: PSCF veličin AA a zastoupení hrubého modu částic na PM₁₀ pro teplou polovinu roku (Petit et al, 2017).
- Příloha 15: PSCF veličin EC, OC, TC a poměru OC/EC pro studenou polovinu roku (Petit et al, 2017).
- Příloha 16: PSCF veličin PM₁₀, PM_{2,5} a poměrů PM₁₀/PM_{2,5} a TC/ PM_{2,5} pro studenou polovinu roku (Petit et al, 2017).
- Příloha 17: PSCF veličin AA a zastoupení hrubého modu částic na PM₁₀ pro chladnou polovinu roku (Petit et al, 2017).
- Příloha 18: PSCF veličin EC, OC, TC a poměru OC/EC pro rok 2013 (Petit et al, 2017).
- Příloha 19: PSCF veličin AA a zastoupení hrubého modu částic na PM₁₀ pro rok 2013 (Petit et al, 2017).
- Příloha 20: PSCF veličin PM₁₀, PM_{2,5} a poměrů PM₁₀/PM_{2,5} a TC/ PM_{2,5} pro rok 2018
- Příloha 21: CBPF veličin EC, OC, TC a poměru OC/EC pro teplou polovinu roku (Petit et al, 2017).
- Příloha 22: CBPF veličin PM₁₀, PM_{2,5} a poměrů PM₁₀/PM_{2,5} a TC/PM_{2,5} pro teplou polovinu roku (Petit et al, 2017).
- Příloha 23: CBPF veličin AA a zastoupení hrubého modu částic na PM₁₀ pro teplou polovinu roku (Petit et al, 2017).
- Příloha 24: CBPF veličin EC, OC, TC a poměru OC/EC pro studenou polovinu roku (Petit et al, 2017).
- Příloha 25: CBPF veličin PM₁₀, PM_{2,5} a poměrů PM₁₀/PM_{2,5} a TC/PM_{2,5} pro studenou polovinu roku (Petit et al, 2017).
- Příloha 26: CBPF veličin AA a zastoupení hrubého modu částic na PM₁₀ pro studenou polovinu roku (Petit et al, 2017).

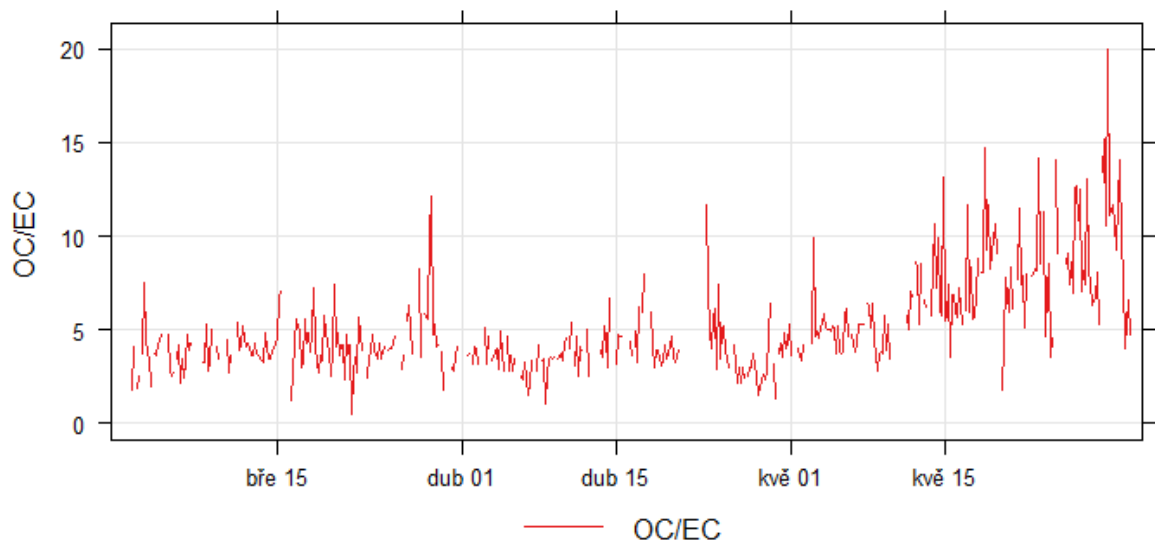
PŘÍLOHY



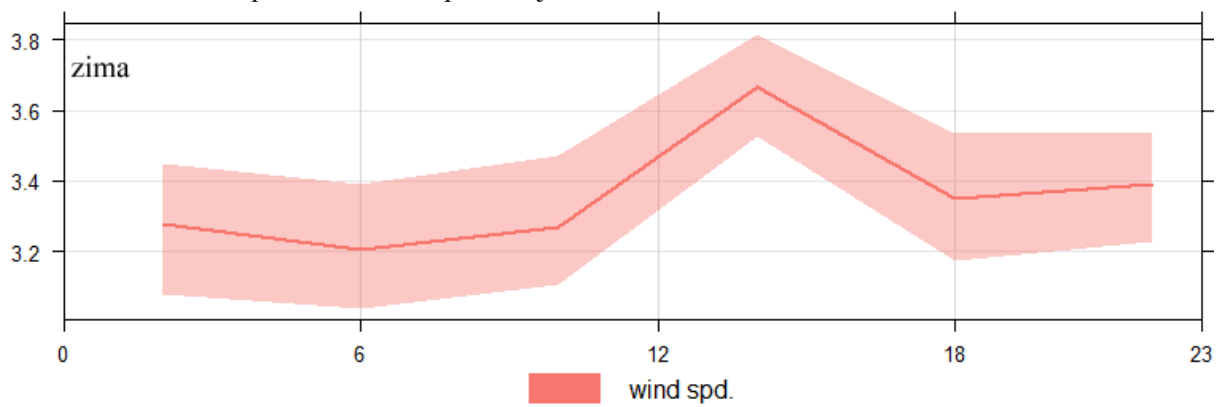
Příloha 1: Průměrné denní rychlosti větru [$m \cdot s^{-1}$] v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012).



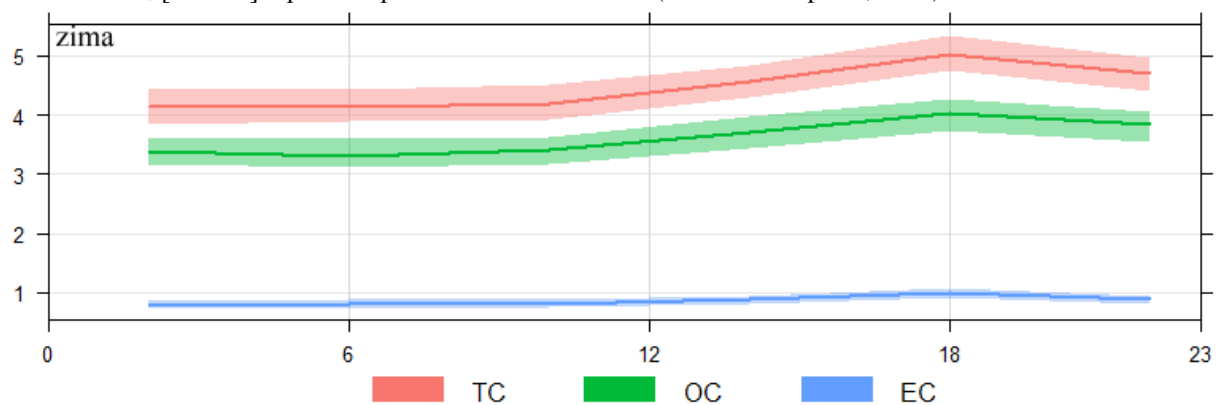
Příloha 2: Chod denních koncentrací PM [$\mu g \cdot m^{-3}$] v průběhu roku (Carslaw a Ropkins, 2012).



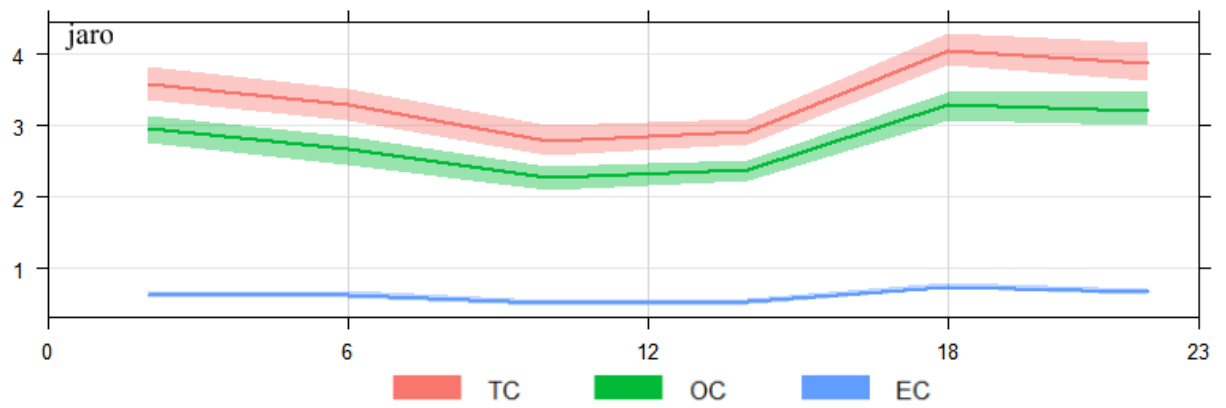
Příloha 3: Graf hodnot poměru OC/EC v průběhu jara 2017



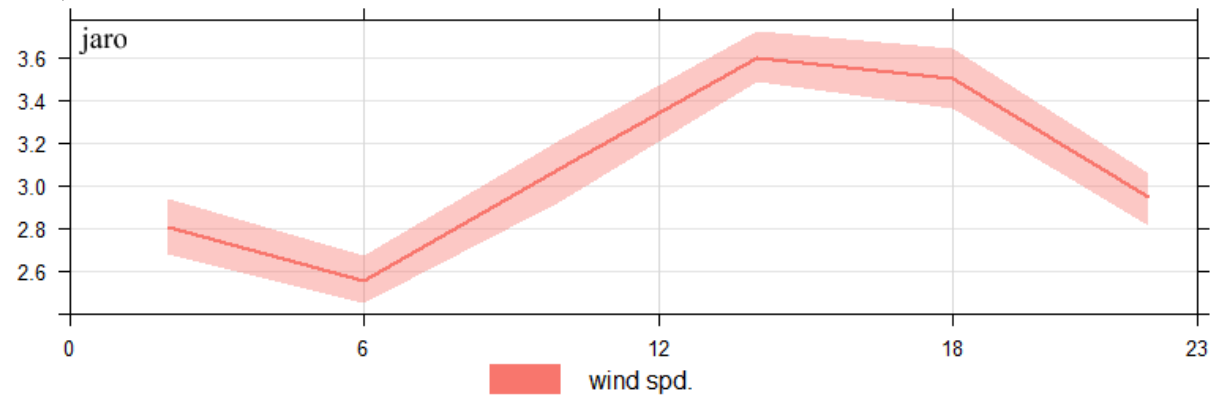
Příloha 4: W_s [$m \cdot s^{-1}$] v průběhu průměrného zimního dne (Carslaw a Ropkins, 2012).



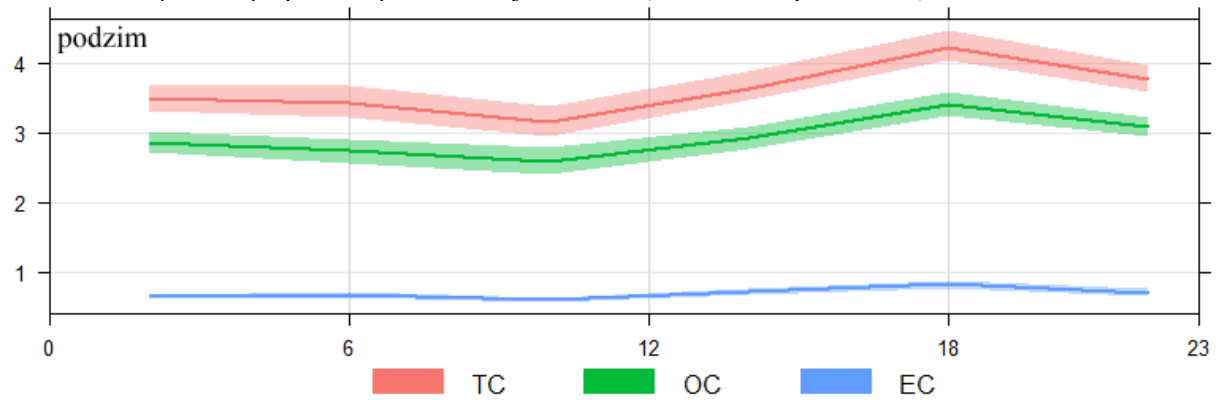
Příloha 5: Chod koncentrací TC, OC a EC [$\mu g \cdot m^{-3}$] v průběhu průměrného zimního dne (Carslaw a Ropkins, 2012).



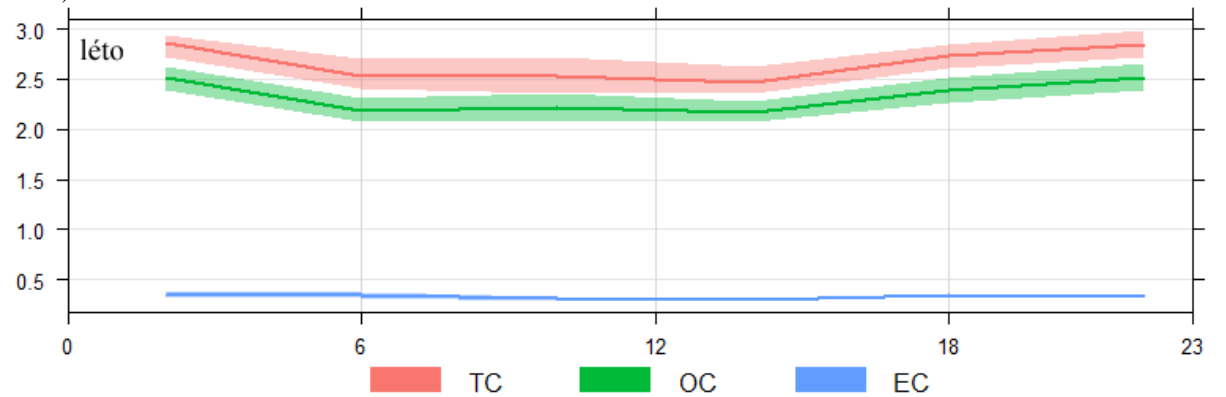
Příloha 6: Chod koncentrací TC, OC a EC [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] v průběhu průměrného jarního dne (Carslaw a Ropkins, 2012).



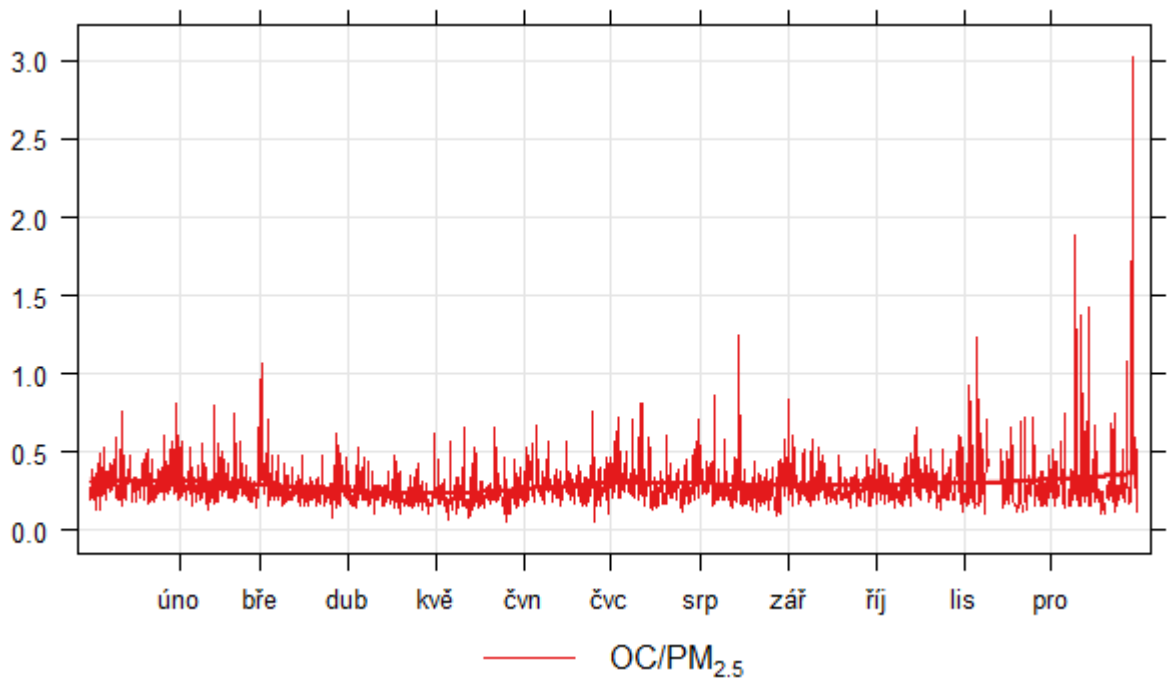
Příloha 7: W_s [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] v průběhu průměrného jarního dne (Carslaw a Ropkins, 2012).



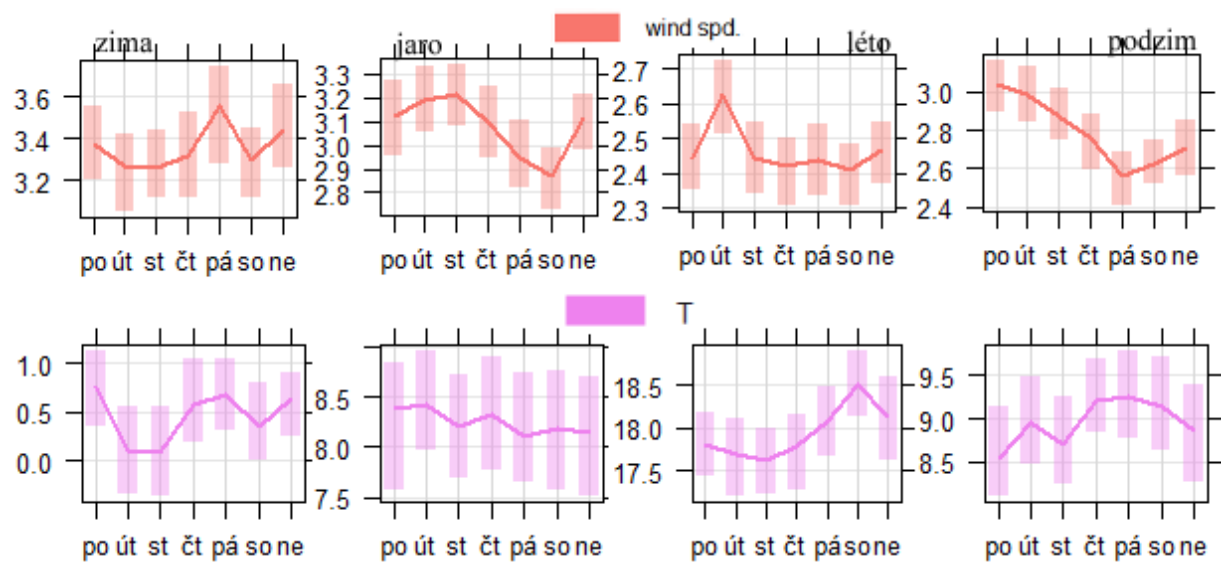
Příloha 8: Chod koncentrací TC, OC a EC [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] v průběhu průměrného letního dne (Carslaw a Ropkins, 2012).



Příloha 9: Chod koncentrací TC, OC a EC [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] v průběhu průměrného podzimního dne (Carslaw a Ropkins, 2012).

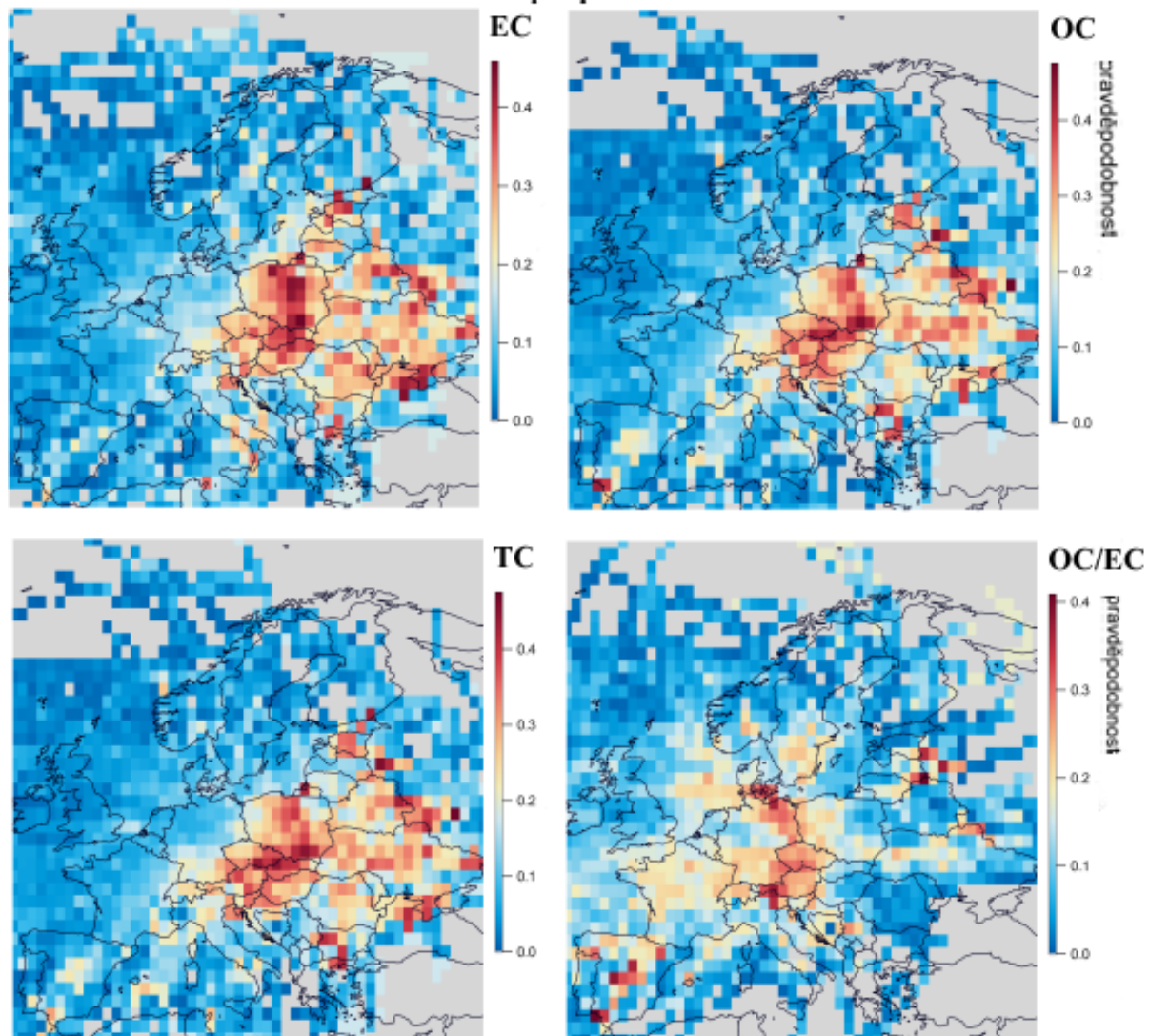


Příloha 10: Chod poměru OC/TC v průběhu průměrného roku (Carslaw a Ropkins, 2012).



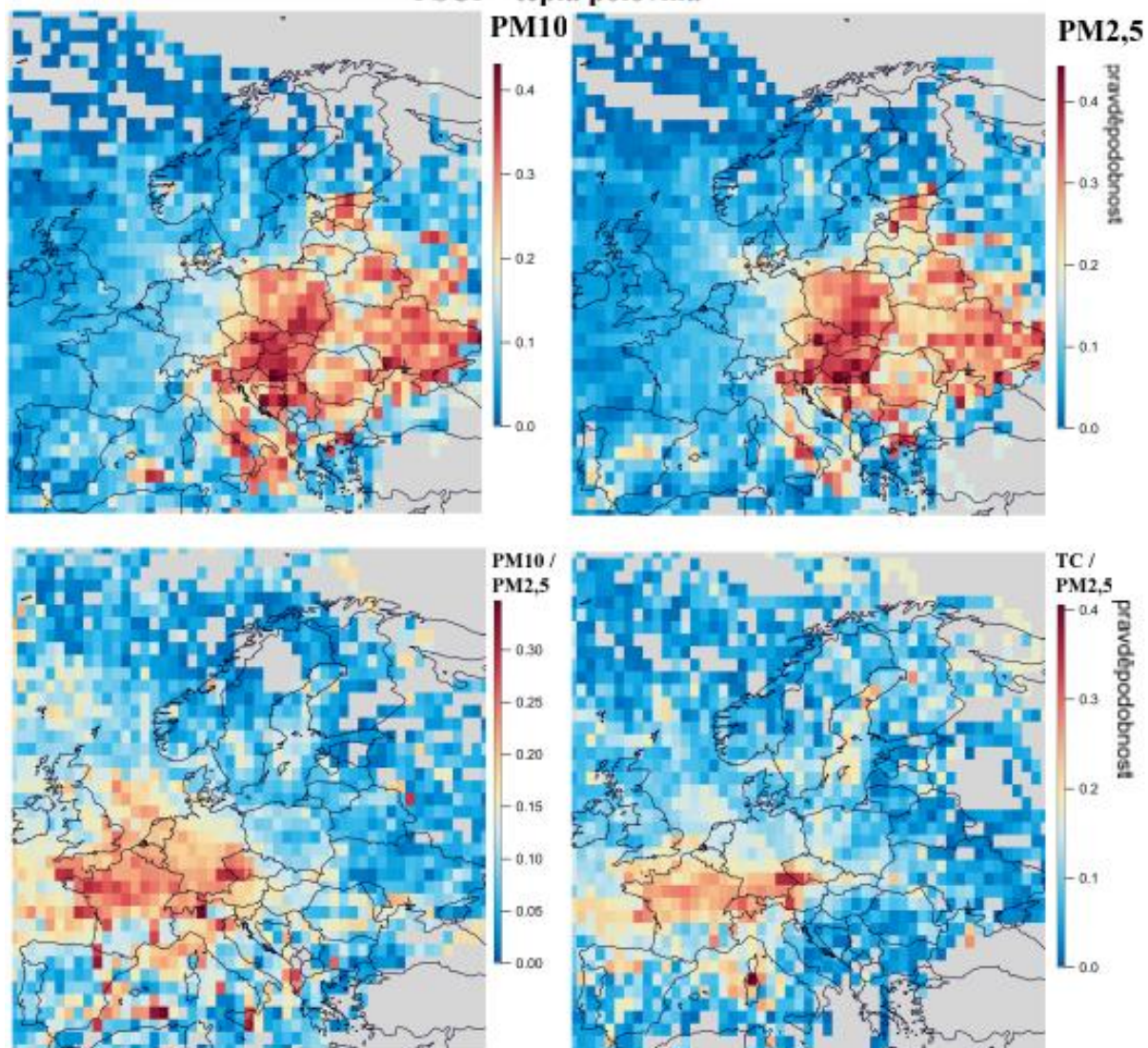
Příloha 11: Chod průměrných denních W_s [$m \cdot s^{-1}$] a T [$^{\circ}C$] v průběhu průměrných týdnů každého ročního období (Carslaw a Ropkins, 2012).

PSCF - teplá polovina



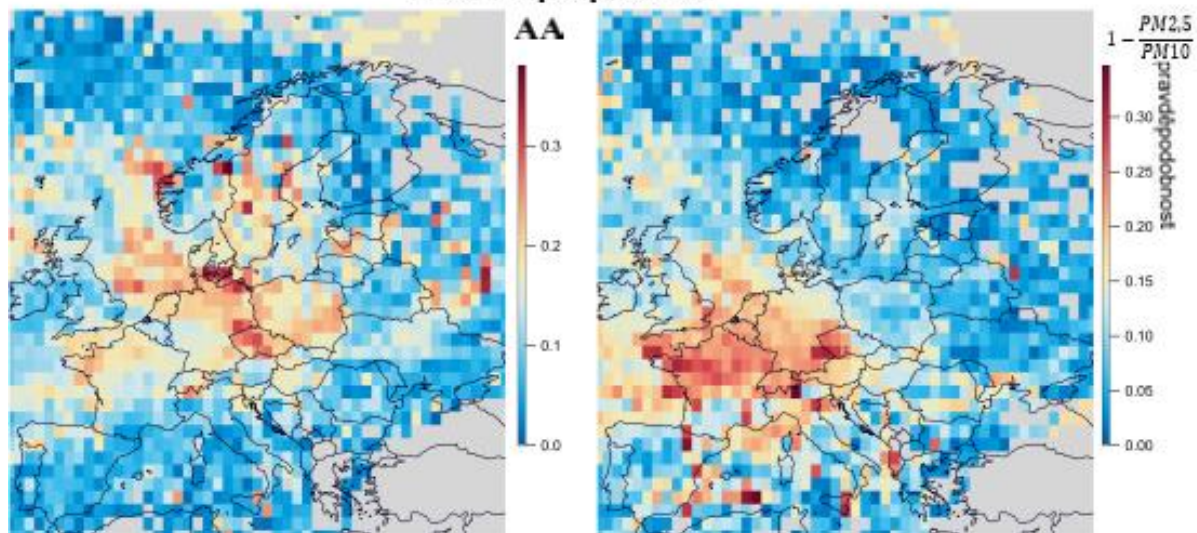
Příloha 12: PSCF veličin EC, OC, TC a poměru OC/EC pro teplou polovinu roku (Petit et al, 2017).

PSCF - teplá polovina



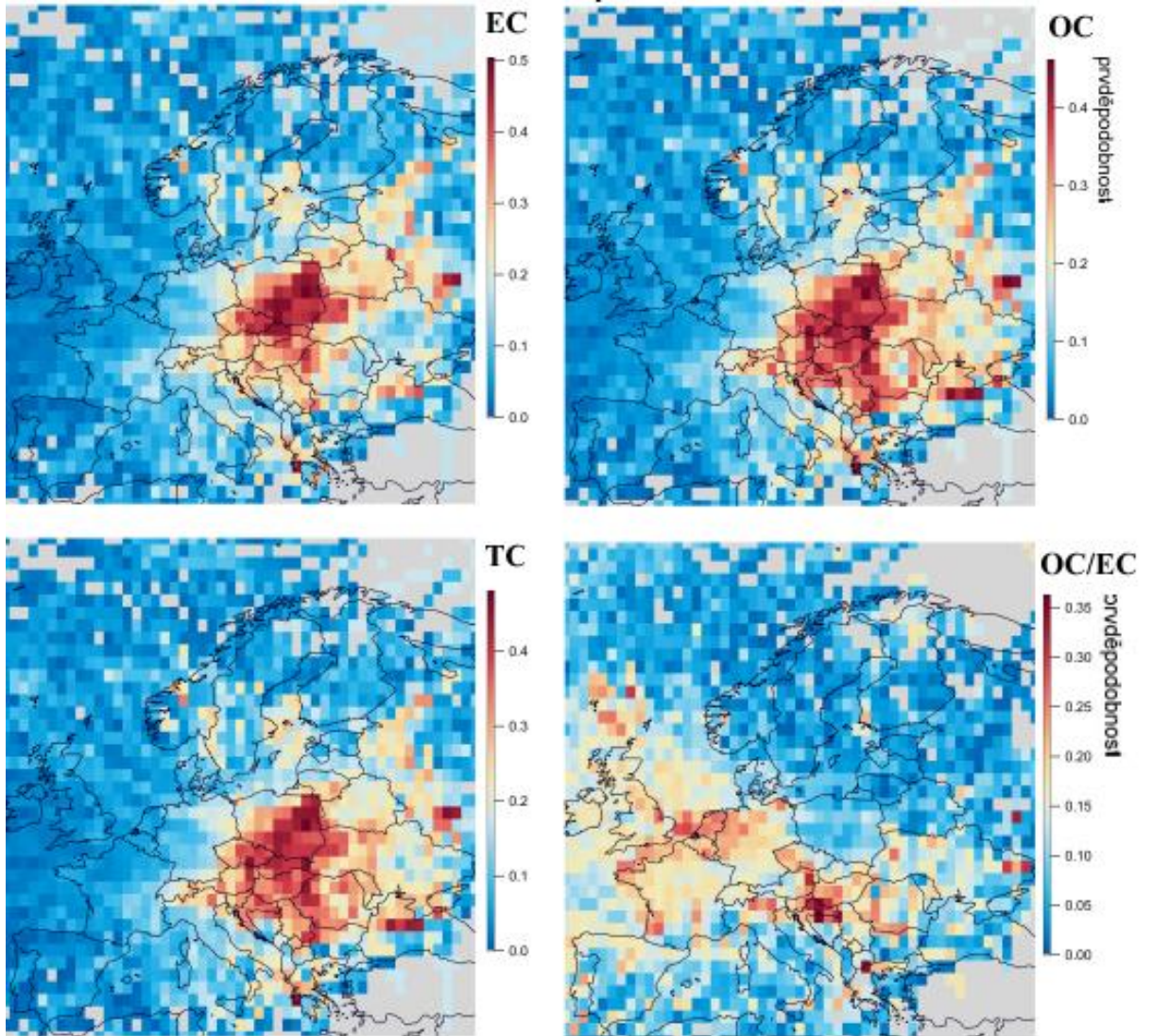
Příloha 13: PSCF veličin PM_{10} , $PM_{2,5}$ a poměrů $PM_{10}/PM_{2,5}$ a $TC/PM_{2,5}$ pro teplou polovinu roku (Petit et al, 2017).

PSCF - teplá polovina



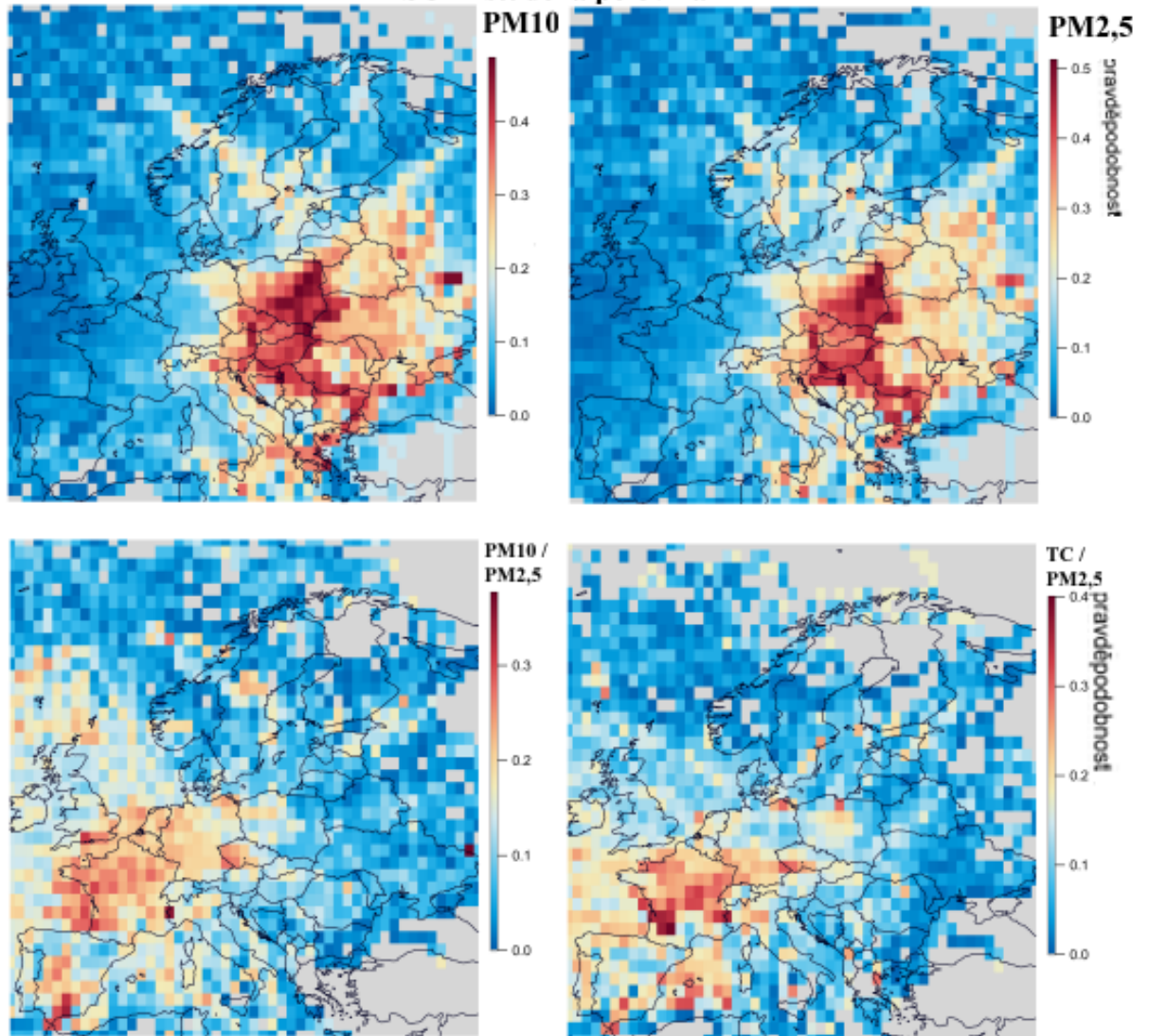
Příloha 14: PSCF veličin AA a zastoupení hrubého modu částic na PM_{10} pro teplou polovinu roku (Petit et al, 2017).

PSCF - studená polovina



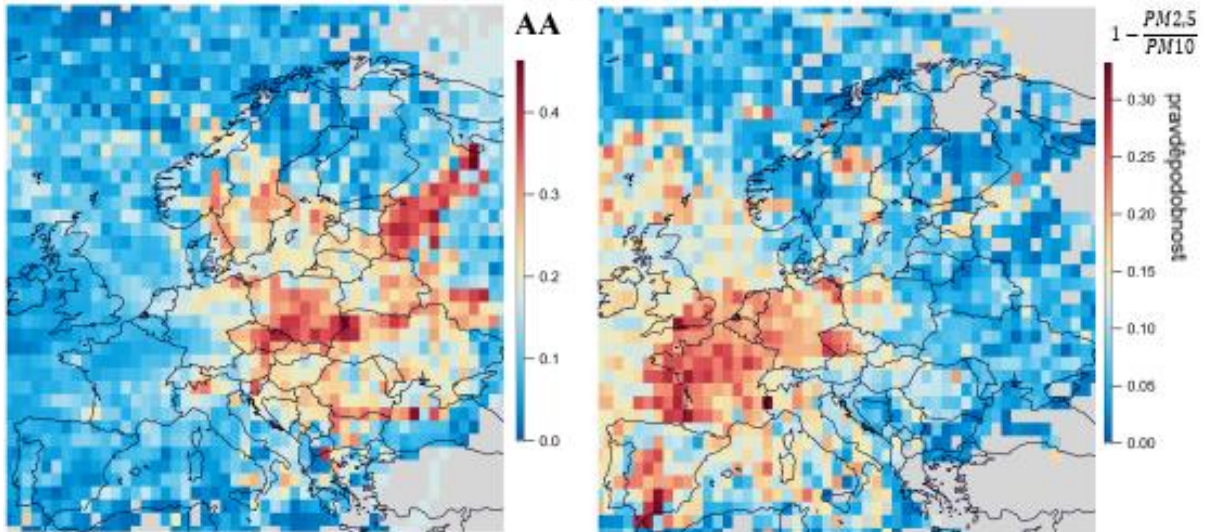
Příloha 15: PSCF veličin EC, OC, TC a poměru OC/EC pro studenou polovinu roku (Petit et al, 2017).

PSCF - studená polovina



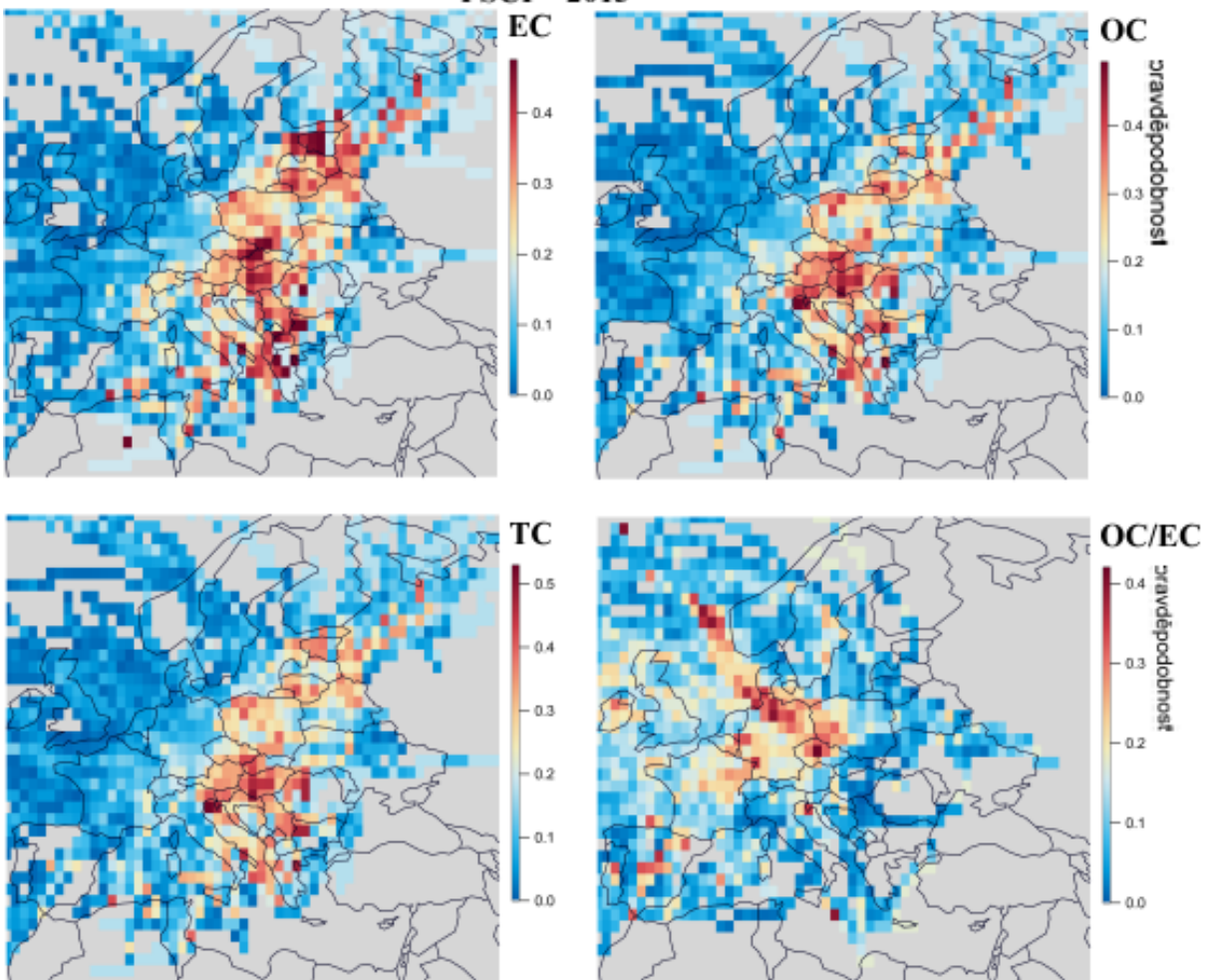
Příloha 16: PSCF veličin PM_{10} , $PM_{2,5}$ a poměrů $PM_{10}/PM_{2,5}$ a $TC/PM_{2,5}$ pro studenou polovinu roku (Petit et al, 2017).

PSCF - studené období



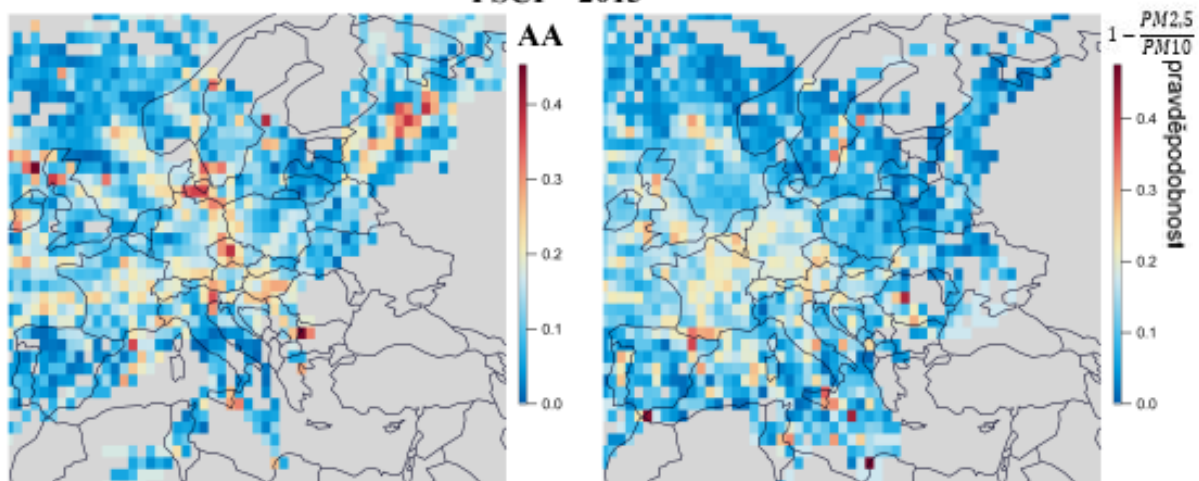
Příloha 17: PSCF veličin AA a zastoupení hrubého modu částic na PM₁₀ pro chladnou polovinu roku (Petit et al, 2017).

PSCF - 2013



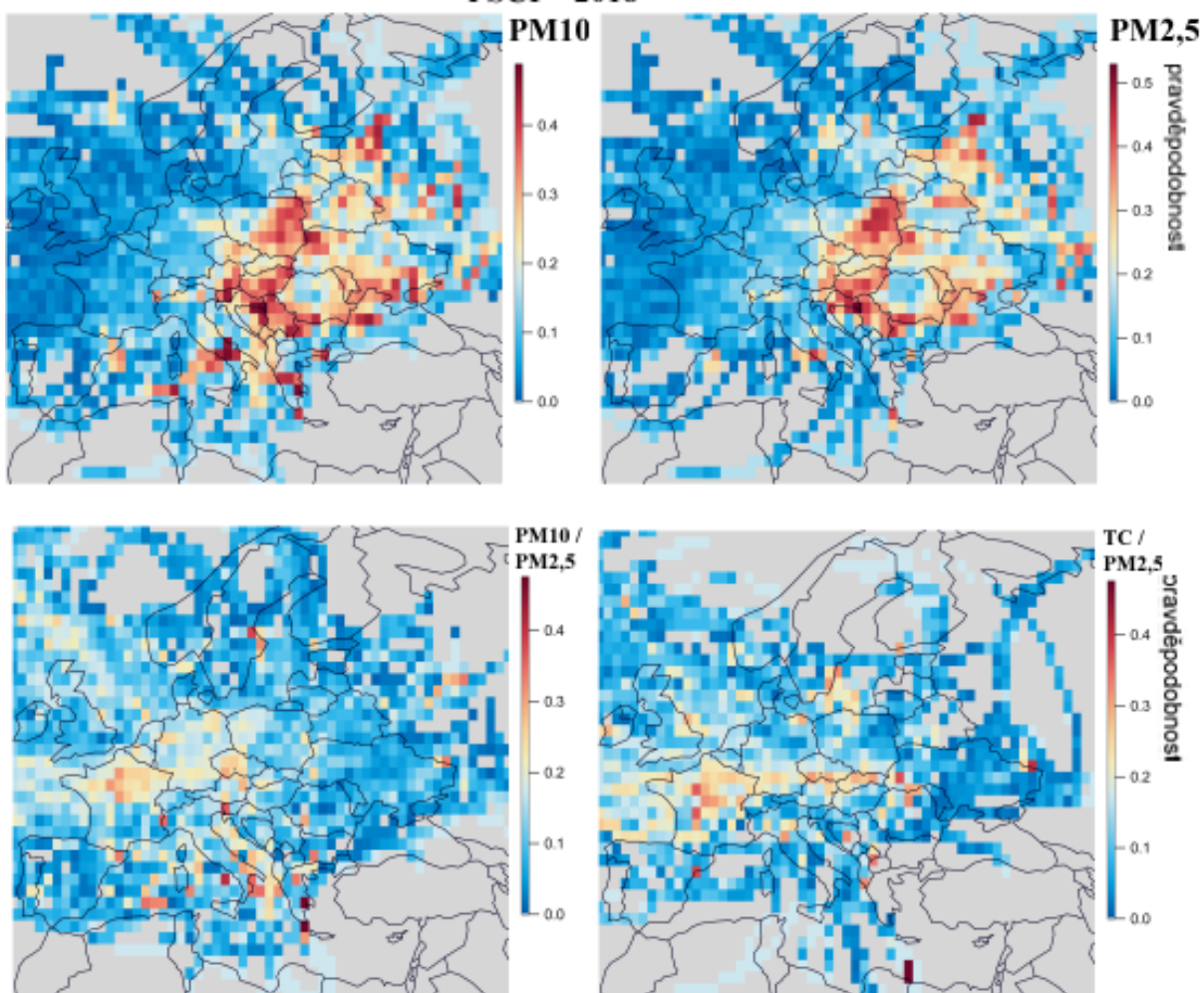
Příloha 18: PSCF veličin EC, OC, TC a poměru OC/EC pro rok 2013 (Petit et al, 2017).

PSCF - 2013

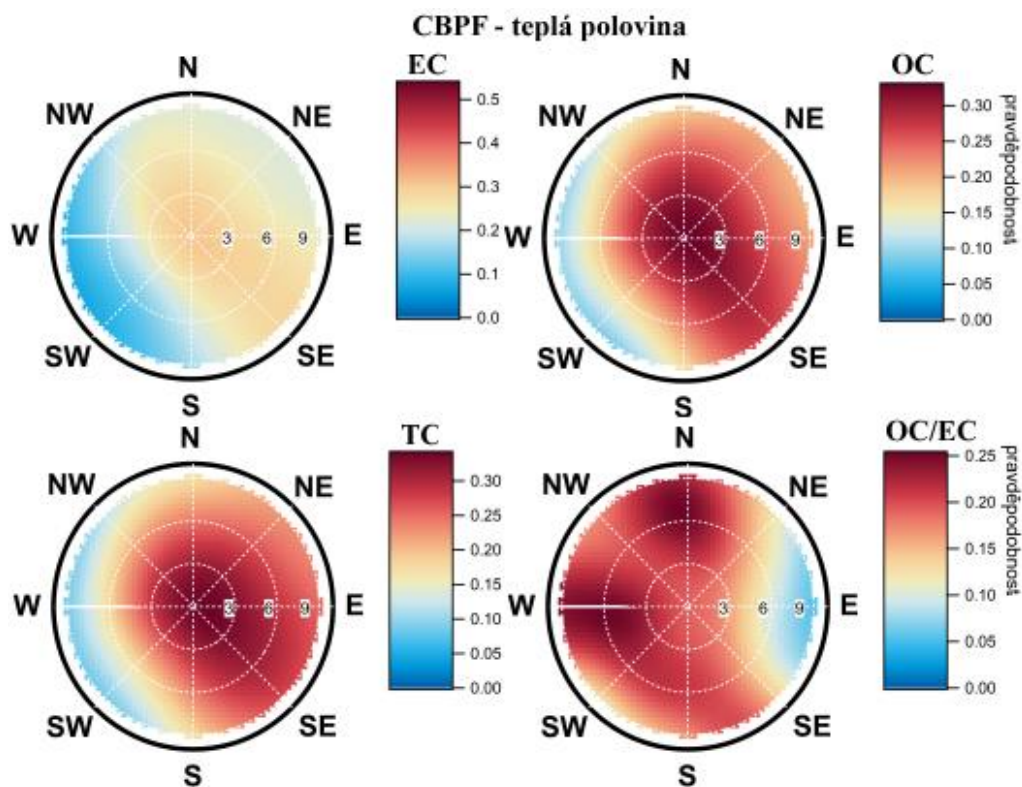


Příloha 19: PSCF veličin AA a zastoupení hrubého modu částic na PM_{10} pro rok 2013 (Petit et al, 2017).

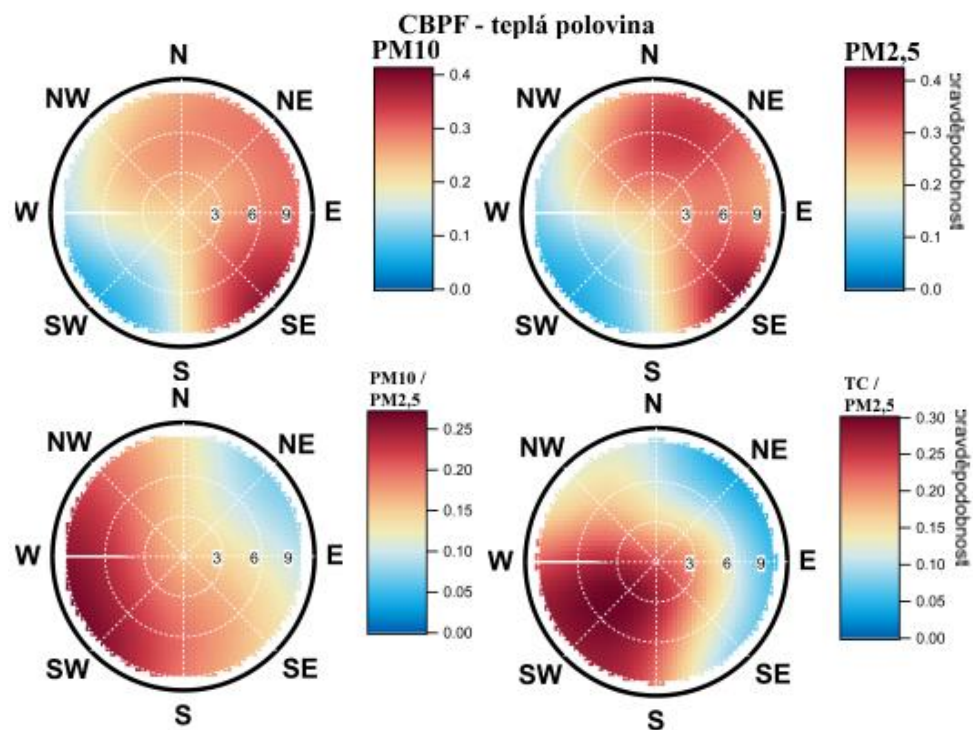
PSCF - 2018



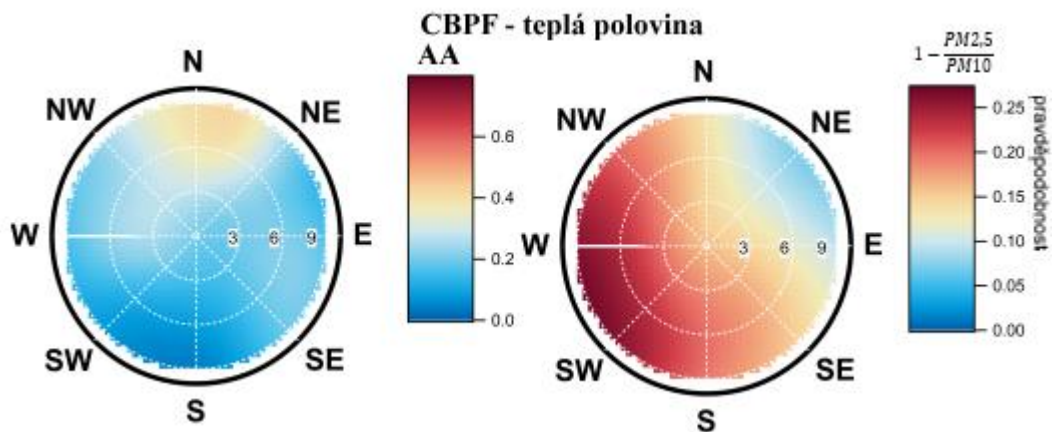
Příloha 20: PSCF veličin PM_{10} , $PM_{2.5}$ a poměrů $\frac{PM_{10}}{PM_{2.5}}$ a $\frac{TC}{PM_{2.5}}$ pro rok 2018



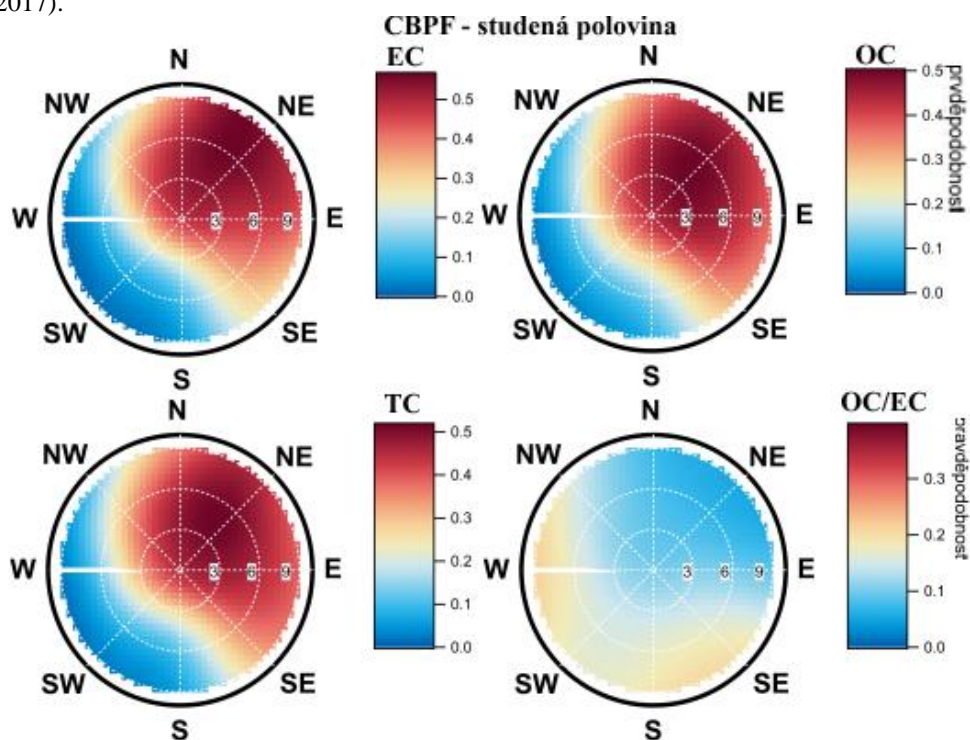
Příloha 21: CBPF veličin EC, OC, TC a poměru OC/EC pro teplou polovinu roku (Petit et al, 2017).



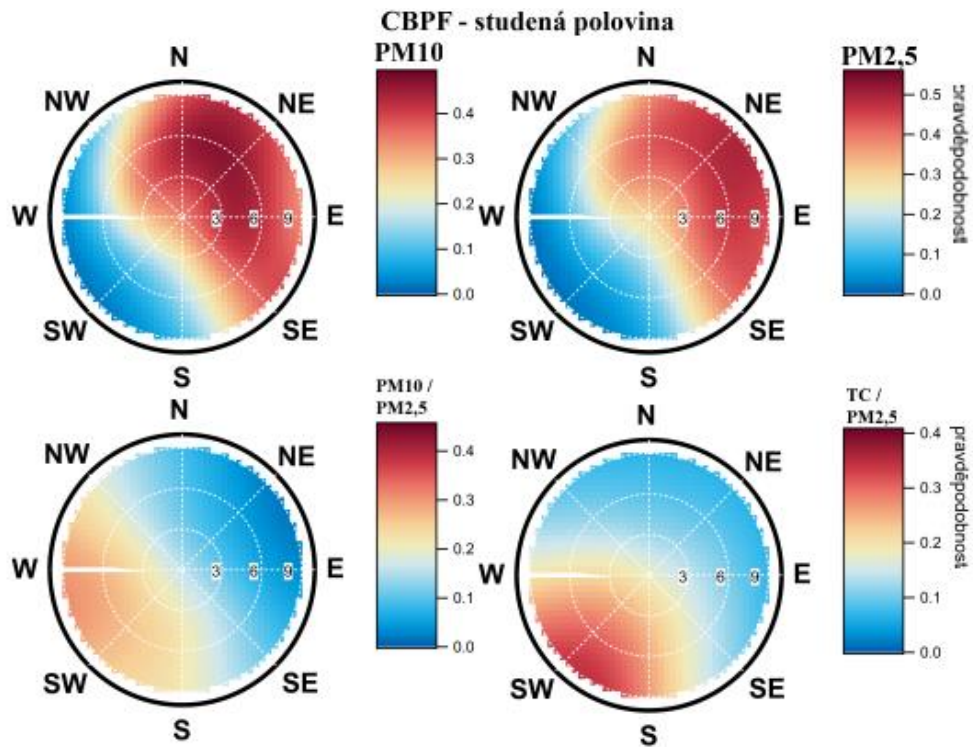
Příloha 22: CBPF veličin PM₁₀, PM_{2,5} a poměrů PM₁₀/PM_{2,5} a TC/PM_{2,5} pro teplou polovinu roku (Petit et al, 2017).



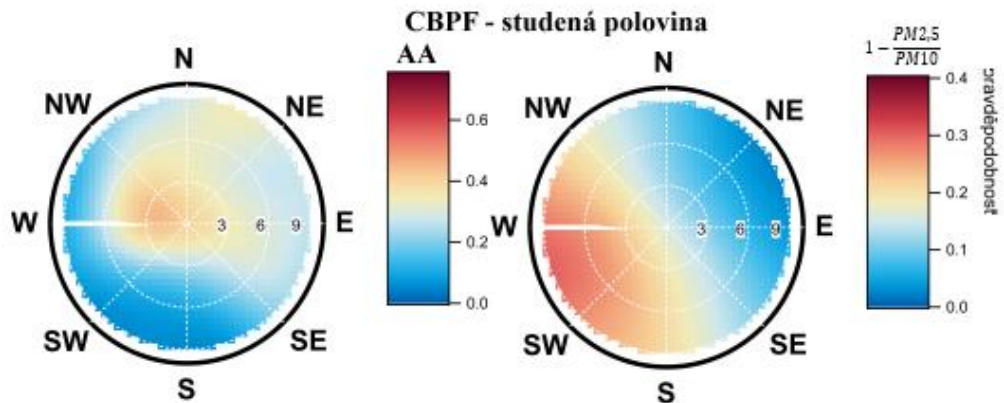
Příloha 23: CBPF veličin AA a zastoupení hrubého modu částic na PM_{10} pro teplou polovinu roku (Petit et al, 2017).



Příloha 24: CBPF veličin EC, OC, TC a poměru OC/EC pro studenou polovinu roku (Petit et al, 2017).



Příloha 25: CBPF veličin PM_{10} , $PM_{2,5}$ a poměrů $PM_{10}/PM_{2,5}$ a $TC/PM_{2,5}$ pro studenou polovinu roku (Petit et al, 2017).



Příloha 26: CBPF veličin AA a zastoupení hrubého modu částic na PM_{10} pro studenou polovinu roku (Petit et al, 2017).