

IV.4 Přízemní ozon

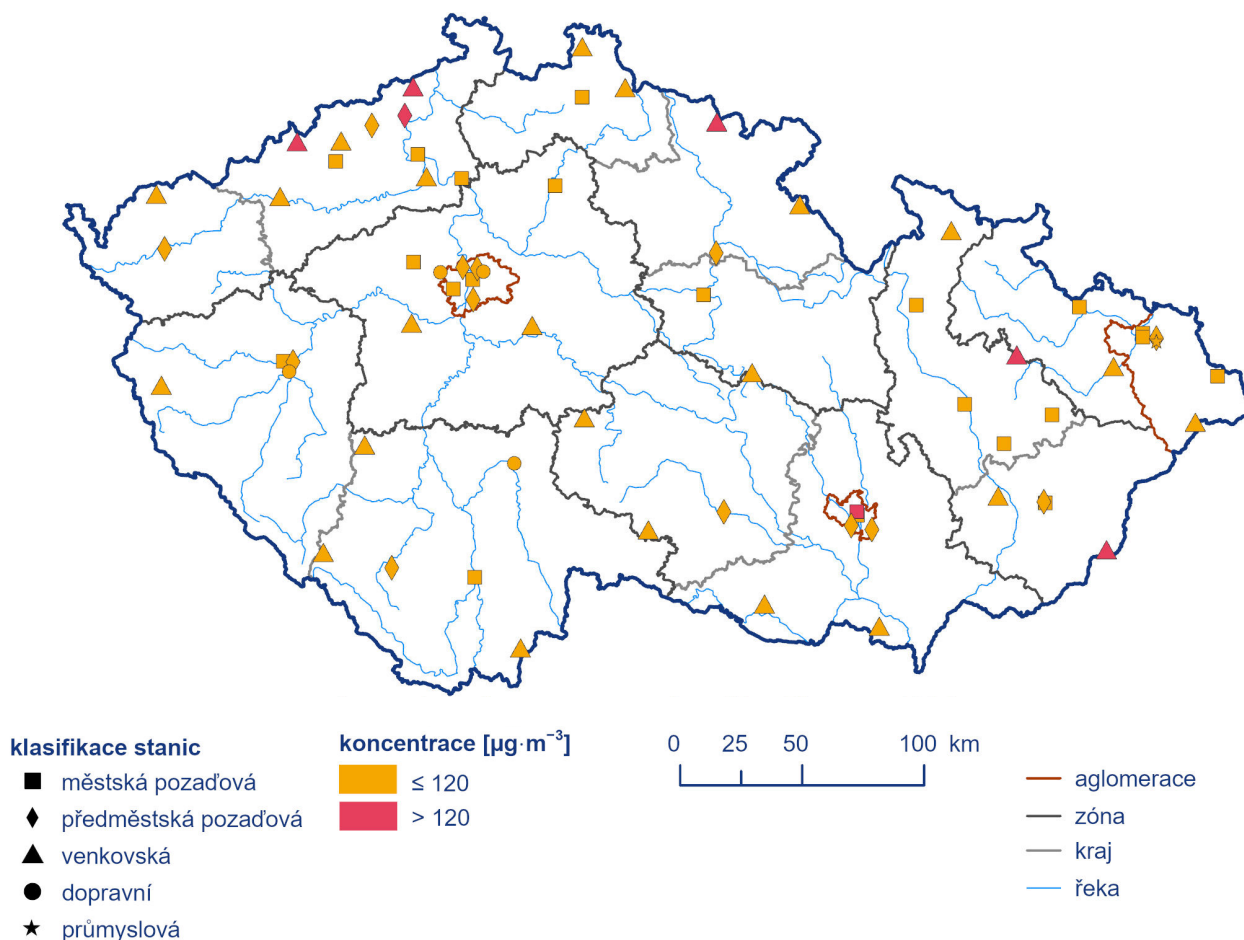
IV.4.1 Znečištění ovzduší přízemním ozonem v roce 2024

Znečištění ovzduší přízemním ozonem v roce 2024 vzhledem k imisním limitům pro ochranu lidského zdraví

Imisní limit přízemního ozonu (O_3) byl za tříleté období 2022–2024¹ překročen na 7 (tj. 10 %) ze 68 stanic s dostatečným množstvím dat pro hodnocení (Obr. IV.4.1, Obr. IV.4.2). Jednalo se o pět regionálních stanic (Sněžník, Rudolice v Horách, Štítná nad Vláří, Krkonoše-Rýchory a Červená hora), jednu předměstskou pozadovou stanicí (Ústí n.L.-Kočkov) a jednu městskou stanicí (Brno-Arboretum). Většina těchto stanic je situována ve vyšších nadmořských výškách a/nebo v Ústeckém kraji. Pro tyto oblasti jsou zvýšené koncentrace O_3 typické. Za předchozí tříleté období

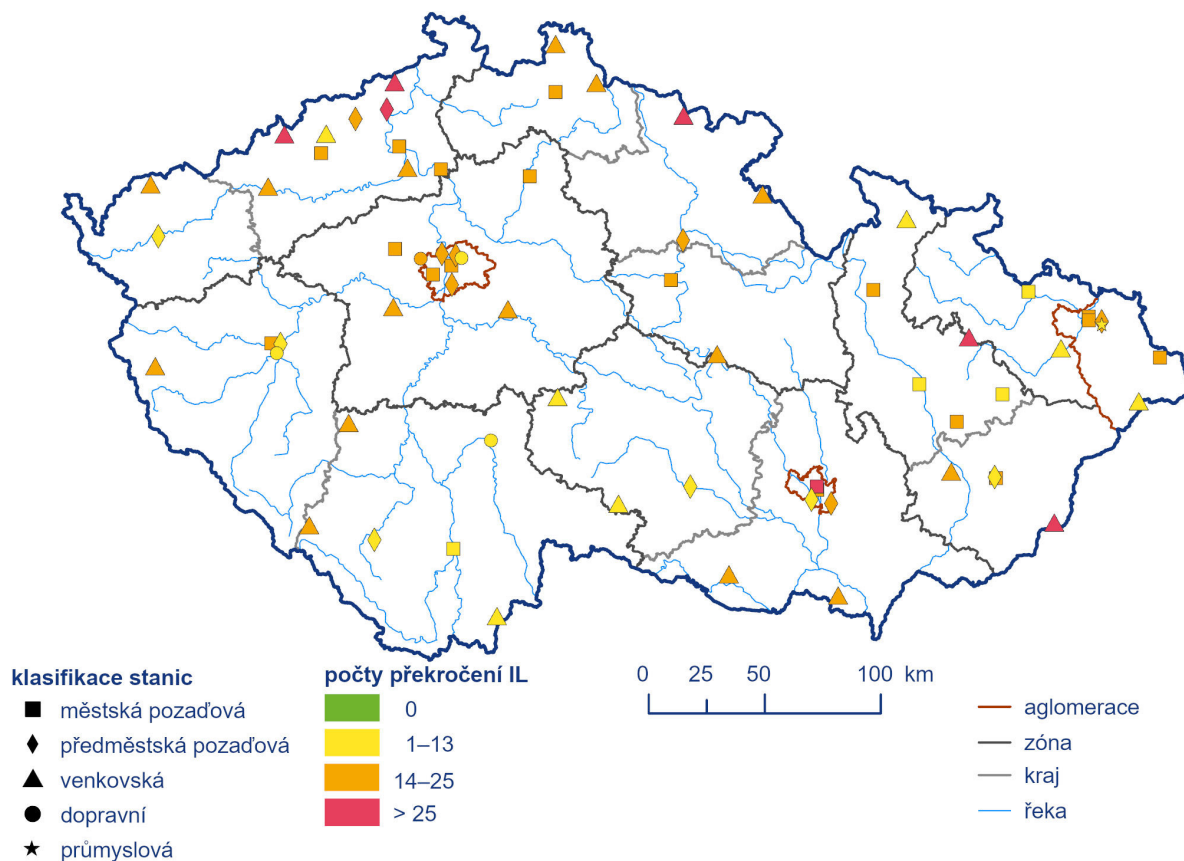
2021–2023 byl imisní limit přízemního O_3 překročen pouze na 4 ze 68 stanic (6 %), za období 2020–2022 na 3 z 68 stanic (4 %), za období 2019–2021 na 4 z 66 (6 %), za období 2018–2020 na 34 z 67 stanic (51 %) a za období 2017–2019 na 36 z 64 stanic (56 %).

K překročení imisního limitu přízemního O_3 došlo ve tříletém období 2022–2024 na pouhých 0,1 % území ČR s 0,03 % obyvatel (Obr. IV.4.3), tedy na přibližně stejné velkém území jako v předchozích třech tříletých obdobích (tj. 0,1 % území ČR v období 2021–2023, 0,2 % území ČR v období 2020–2022 a 2019–2021). Naopak v předcházejících obdobích 2018–2020, resp. 2017–2019 bylo překročeno na 62 %, resp. 71 % území, což bylo dáno výskytem relativně vysokých koncentrací přízemního O_3 v letech 2017–2019. V rámci hodnocených tří let 2022–2024 se na počtu překročení hodnoty imisního limitu nejvíce podílel rok 2022 (21–63 % z celkového počtu překročení na jednotlivých stanicích). Nejnižší podíl na překročení měl aktuálně hodnocený rok 2024 (6–48 %), zatímco rok 2023 zaujal druhé místo (8–48 %; Obr. IV.4.4).

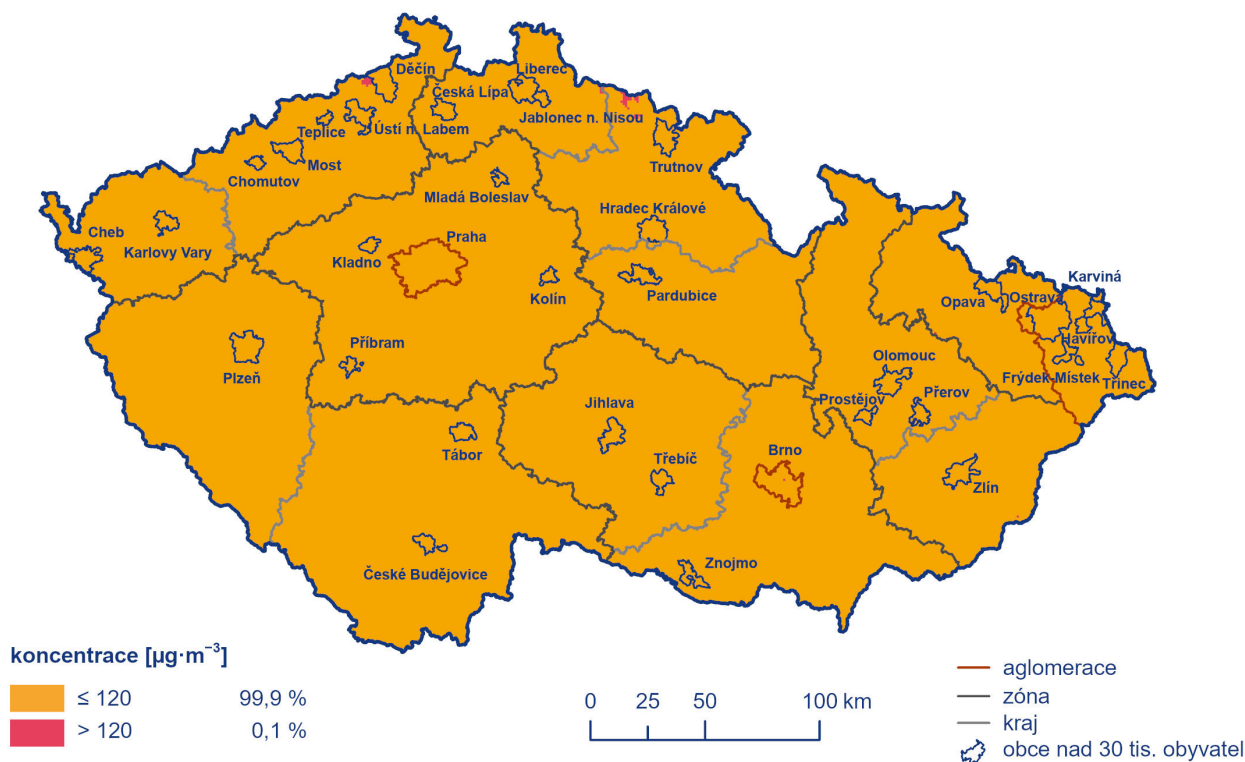


Obr. IV.4.1 26. nejvyšší hodnoty maximálního denního 8hod. klouzavého průměru koncentrací přízemního O_3 v průměru za 3 roky měřené na stanicích imisního monitoringu, 2022–2024

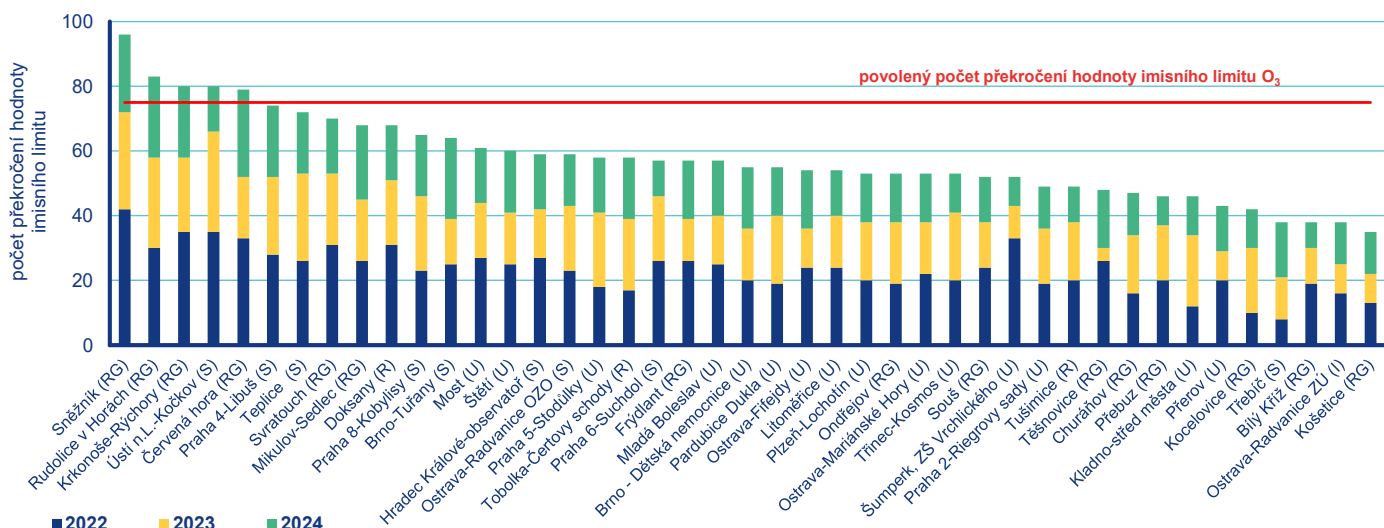
1 Imisní limit je překročen, jestliže byl maximální denní 8hodinový klouzavý průměr O_3 vyšší než $120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ alespoň 26× v průměru za 3 roky.



Obr. IV.4.2 Počty překročení hodnoty imisního limitu pro maximální denní 8hod. klouzavý průměr koncentrace přízemního O₃ v průměru za 3 roky, 2022–2024



Obr. IV.4.3 Pole 26. nejvyššího maximálního denního 8hod. klouzavého průměru koncentrace přízemního O₃ v průměru za 3 roky, 2022–2024



Obr. IV.4.4 Počet překročení hodnoty imisního limitu O_3 (max. denní 8hodinový klouzavý průměr) na měřicích stanicích AIM, 2022–2024

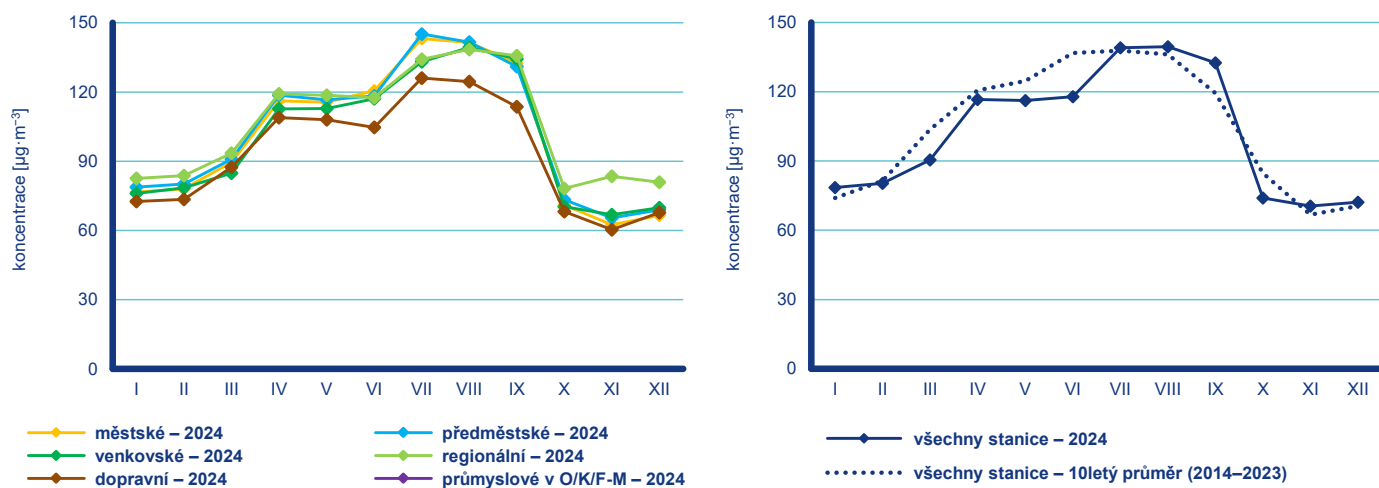
Poznámka: V grafu jsou zobrazeny pouze stanice, které měly platné měření pro celé tříleté období 2022–2024 (na rozdíl od stanovení stanic s nadlimitním počtem překročení hodnoty imisního limitu v kalendářním roce, kdy podle platné legislativy do celkové statistiky vstupují stanice mající platné měření pro jeden až tři roky).

Roční chod průměrných měsíčních koncentrací přízemního O_3 (maximální 8hodinový průměr za daný měsíc, průměr pro jednotlivé typy stanic) je obecně charakterizován nárůstem koncentrací v letním období (duben–září) z důvodu výskytu příznivých meteorologických podmínek pro vznik O_3 (Obr. IV.4.5).

Průměrné měsíční koncentrace O_3 od dubna do června roku 2024 pohybovaly mírně pod hodnotami měsíčního desetiletého průměru (2014–2023), tzn. že byly o cca 3–14 % nižší. V červenci a srpnu byly průměrné měsíční koncentrace O_3 přibližně na úrovni měsíčního desetiletého průměru 2014–2023. V září byly koncentrace nadprůměrné (o 11 % v porovnání s hodnotou desetiletého průměru 2014–2023). Nejvyšší koncentrace O_3 byly v roce 2024 naměřeny v červenci a srpnu, tedy v nejteplejších měsících roku

2024, které jsou teplotně charakterizovány jako nadnormální až silně nadnormální a srážkově jako normální. Kvůli vysokým koncentracím přízemního ozonu byly na konci července vyhlášeny tři smogové situace, a to v aglomeraci Praha a ve Středočeském a Ústeckém kraji (kap. VI.).

Nárůst koncentrací v období duben–září 2024 odpovídá meteorologickým podmínkám v těchto měsících, tj. nadnormálním až silně nadnormálním teplotám a převážně normálním srážkám. Srážkově mimořádně nadnormální úhrn v září je spojený s extrémní srážkovou situací, kdy srážkové úhrny byly regionálně velmi rozdílné a nejvíce srážek spadlo pouze v několika málo dnech (kap. III.).



Obr. IV.4.5 Roční chod průměrných měsíčních koncentrací max. 8hod. klouzavého průměru O_3 (průměry pro daný typ stanice a všechny stanice), 2024

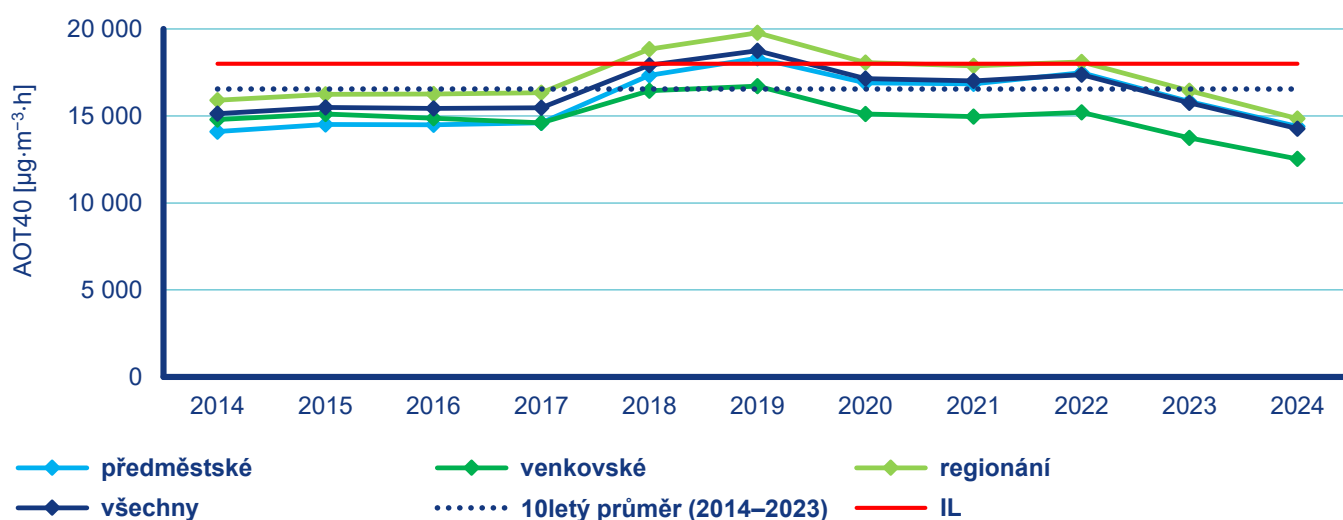
Nejnižší hodnoty koncentrací přízemního O_3 jsou měřeny na dopravně zatížených lokalitách (Obr. IV.4.5, Obr. IV.4.9, Obr. IV.4.10), kde je přízemní O_3 odbouráván chemickou reakcí s oxidem dusnatým (NO), který je součástí oxidů dusíku (NO_x). Lze předpokládat, že koncentrace přízemního O_3 jsou nižší až podlimitní i v dalších dopravně zatíženějších oblastech. Z důvodu absence měření nelze pomocí stávající metodiky tvorby map toto pravděpodobné snížení dokladovat. Hodnoty koncentrací přízemního O_3 na venkovských, předměstských a městských stanicích dosahují podobných úrovní a jsou v porovnání s koncentracemi na dopravních stanicích vyšší. Toto potvrzuje i studie Paoletti et al. (2014), kdy v letech 1990–2010 bylo na stanicích v Evropě a USA pozorováno snížení rozdílů mezi koncentracemi měřenými na lokalitách venkovských a městských. Zároveň na těchto stanicích došlo ke snížení maximálních měřených hodnot. Zmiňovaný pokles koncentrací přízemního O_3 je mimo jiné připisován redukci emisí jeho prekurzorů, zejména NO_x ve vyspělých státech. Snížení koncentrací v relativně čistých oblastech je přisuzováno snížení emisí jak NO_x , tak i těkavých organických látek (VOC) v širším (evropském až globálním) měřítku (Sicard et al. 2013). V posledních letech však bylo pozorováno, že průměrné koncentrace O_3 na městských lokalitách s vysokými hodnotami NO_x rostou a dosahují úrovně srovnatelné s okolními venkovskými oblastmi. Tento nárůst je přičítán snížení tzv. titrace O_3 , tedy chemické reakce O_3 s oxidem dusnatým (NO), jejímž důsledkem je jeho odbourávání. Tato reakce byla dříve významným mechanismem snižování koncentrací O_3 v městském prostředí. Zavedení katalyzátorů ve výfucích dieselových a benzinových vozidel však vedlo ke snížení emisí NO , a tím i k omezení této reakce, což přispívá k vyšším koncentracím O_3 ve městech (Yan et al., 2019). Rostoucí podíl NO_2 v imisních koncentracích NO_x byl prokázán i na řadě lokalit v ČR, zejména tam, kde O_3 nevykazuje klesající trend i přes pokles celkových NO_x (Hůnová, Baumelt 2018).

Znečištění ovzduší přízemním ozonem v roce 2024 vzhledem k imisním limitům pro ochranu ekosystémů a vegetace

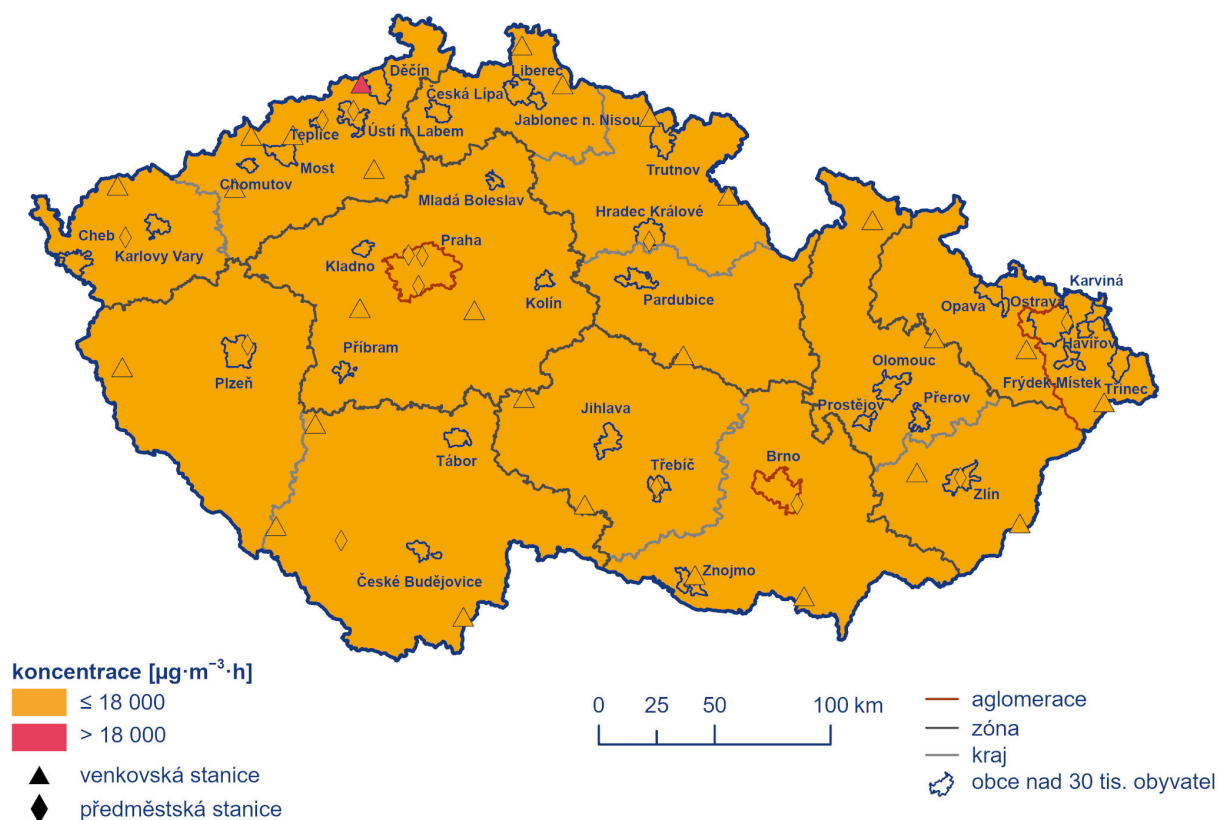
Dle platné české legislativy se hodnotí úroveň ročních koncentrací přízemního O_3 vzhledem k imisnímu limitu pro ochranu ekosystémů a vegetace pouze na předměstských a venkovských lokalitách. Imisní limit přízemního O_3 pro ochranu vegetace $18\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$ (průměr za pět let; Tab. I.2) byl překročen na 1 (regionální stanice Sněžník) ze 40 venkovských a předměstských stanic (3 %), pro které byl podle legislativy relevantní výpočet expozičního indexu AOT40² (průměr za roky 2020–2024). Nejvyšší hodnoty indexu AOT40 za hodnocené období 2014–2024 byly zjištěny v letech 2018, 2019 a 2022 (v průměru pro 32 venkovských a předměstských stanic s úplnou časovou řadou 2014–2024; Obr. IV.4.6).

Mapa hodnot expozičního indexu AOT40 (Obr. IV.4.7) byla připravena pomocí kombinace dat ze všech typů stanic a rozptylového modelu a přináší informace o plošném rozložení úrovní koncentrací expozičního indexu AOT40 v ČR, nikoliv o překročení imisního limitu pro ochranu ekosystémů a vegetace. V české legislativě nejsou vymezené oblasti, ve kterých se má sledovat úroveň koncentrací znečišťujících látek vzhledem k limitům pro vegetaci a ekosystémy, proto jsou v této publikaci hodnoceny úrovně naměřených koncentrací plošně alespoň na území národních parků a chráněných krajinných oblastí (kap. VII.2). Dle plošné mapy hodnot indexu AOT40 došlo v roce 2024 k výskytu zvýšených koncentrací pouze na území Ústeckého kraje, a to na stanici Sněžník.

Roční hodnoty indexu AOT40 dlouhodobě překračují hodnotu dlouhodobého imisního limitu ($6\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$) na všech ven-



Obr. IV.4.6 Hodnoty expozičního indexu AOT 40, klouzavý 5letý průměr, 2014–2024



Obr. IV.4.7 Pole hodnot expozičního indexu AOT40, průměr za 5 let, 2020–2024



Obr. IV.4.8 Roční hodnoty expozičního indexu AOT40 na vybraných stanicích v porovnání s dlouhodobým imisním cílem (DIC), 2020–2024

kovských a předměstských stanicích, s výjimkou stanice Plzeň-Doubravka v letech 2020 a 2021 (hodnocen stejný soubor stanic pro posledních pět let; Obr. IV.4.8). V rámci hodnoceného pětiletí byly roční hodnoty indexu AOT40 v roce 2024 na přibližně polovině stanic druhé nejvyšší.

IV.4.2 Vývoj koncentrací přízemního ozonu

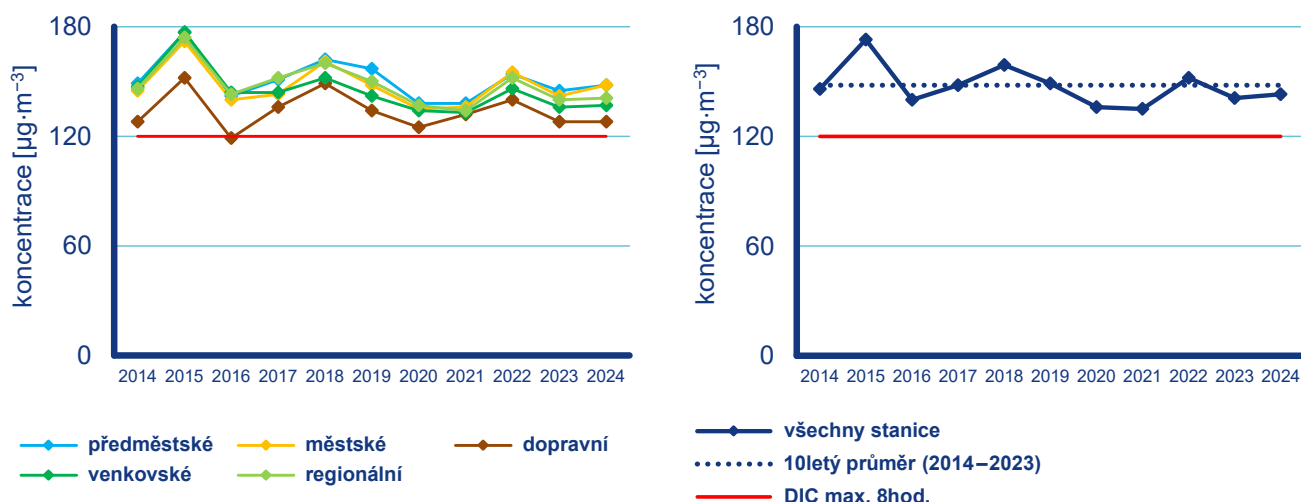
Vývoj koncentrací přízemního O_3 , na rozdíl od předchozích hodnocení založených převážně na tříletých obdobích, hodnotíme na základě maximální 8hod. průměrné koncentrace a 26. maximální 8hod. průměrné koncentrace v daném roce. První z těchto imisních charakteristik je možné porovnat s dlouhodobým imisním cílem (DIC) pro přízemní O_3 resp. s hodnotou imisního limitu ($120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). Maximální roční 8hod. průměrná koncentrace (v průměru ze všech stanic, pro které je k dispozici měření za celé hodnocené období) se v letech 2014–2024 pohybovala v rozmezí od 135 do $173 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 26. maximální 8hod. průměrná koncentrace pak od cca 110 do $129 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

Maximální denní 8hod. a 26. nejvyšší maximální 8hod. průměrné koncentrace přízemního O_3 nevykazují od roku 2014 výrazný vývoj (Obr. IV.4.9, Obr. IV.4.10), neboť koncentrace ozonu jsou silně závislé na meteorologických podmínkách zejména teplého období roku (duben–září). Nejvyšší a 26. nejvyšší maximální denní 8hod. koncentrace byly naměřeny v letech 2015, 2018 a 2022. Všechny tyto roky jsou charakterizovány výskytem meteorologických podmínek vhodných pro vznik O_3 . Roky 2015 a 2018 byly teplotně mimořádně nadnormální, rok 2022 byl teplotně nadnormální, roky 2015 a 2018 i srážkově silně podprůměrné. V roce 2022 byly měřeny vysoké koncentrace v srpnu, ale byly zaznamenány i neobvykle zvýšené koncentrace v březnu. Koncentrace v roce 2024 ($143 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ pro maximální denní 8hod. a $113 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

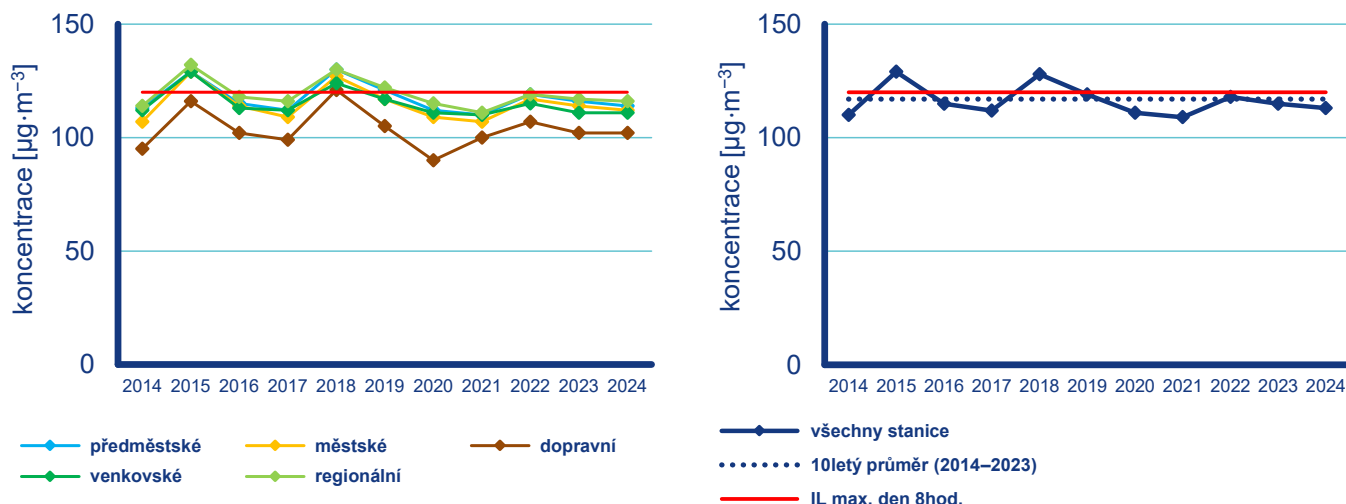
pro 26. maximální denní 8hod. průměrnou koncentraci) byly v rámci jedenáctiletého období 2014–2024 páté nejvyšší. Koncentrace pro rok 2024 jsou nižší než desetileté průměry pro období 2014–2024.

Ve srovnávání koncentrací hrají zásadní roli emise prekurzorů a meteorologické podmínky, tj. intenzita a délka slunečního svitu, teplota, rychlost větru a výskyt srážek, resp. relativní vlhkost vzduchu (Blanchard et al. 2010; Ooka et al. 2011). Vztah mezi množstvím emitovaných prekurzorů a koncentracemi přízemního O_3 však není lineární. Tato nelinearita je způsobena komplikovanou atmosférickou chemií vzniku a zániku přízemního O_3 , dálkovým přenosem přízemního O_3 a jeho prekurzorů a dalšími faktory, mezi které se řadí meteorologické podmínky, změna klimatu, emise VOC z vegetace a požáry lesních porostů (EEA 2013b). Vzhledem k výše uvedeným faktorům nelze meziroční změny blíže komentovat.

Na základě výsledků dlouhodobého monitoringu v ČR, kdy je k dispozici na řadě stanic již více než 30letá řada imisních koncentrací přízemního O_3 , je možné – navzdory vysoké meziroční variabilitě O_3 – smysluplně hodnotit jeho dlouhodobé trendy (Weatherhead et al. 1998). Detailní analýza časoprostorových trendů dlouhodobého měření 26 stanic různého typu (městské, venkovské, horské) za období 1994–2015 ukázala, že navzdory podstatnému snížení emisí prekurzorů i snížení imisních koncentrací přízemního O_3 na většině stanic představuje přízemní O_3 v ČR stále značný problém. Jasně se prokázalo, že pro žádoucí snížení imisních úrovní přízemního O_3 je kritický poměr NO/NO_2 , a samotný současný významný pokles celkových emisí NO_x není tedy pro snížení přízemního O_3 postačující (Hůnová, Baumelt 2018). Současně bylo z výsledků měření ČHMÚ zjištěno, že v posledních letech (přibližně od roku 2014) střední koncentrace přízemního O_3 na českých stanicích rostou, což patrně souvisí s probíhající klimatickou změnou (Hůnová et al. 2020).



Obr. IV.4.9 Koncentrace přízemního O_3 (max. denní 8hod. klouzavý průměr) na jednotlivých typech stanic, 2014–2024



Obr. IV.4.10 Koncentrace přízemního O_3 (26. nejvyšší max. denní 8hod. klouzavý průměr), 2014–2024

IV.4.3 Vznik přízemního ozonu

Přízemní O_3 nemá v atmosféře vlastní významný zdroj. Jedná se o tzv. sekundární látku vznikající v celé řadě velmi komplikovaných nelineárních fotochemických reakcí (např. Seinfeld, Pandis 2006). Prekurzory přízemního O_3 jsou NO_x a VOC a oxid uhelnatý (CO). Důležitou reakcí je fotolýza oxidu dusičitého (NO_2) slunečním zářením o vlnové délce 280–430 nm, při které vzniká NO a atomární kyslík (O). Reakcí atomárního a molekulárního kyslíku (O_2) pak za přítomnosti katalyzátoru dochází ke vzniku molekuly O_3 . Současně probíhá titrace O_3 oxidem dusnatým za vzniku NO_2 a O_2 . Pokud je při této reakci O_3 nahrazen radikály, jeho koncentrace v atmosféře rostou. Důležitou úlohu při těchto reakcích hraje zejména hydroxilový radikál (OH) (podrobněji např. Hůnová, Baumelt 2018). NO_x vznikají při veškerých spalovacích procesech. VOC jsou emitovány z celé řady zdrojů antropogenních (doprava, manipulace s ropou a jejími deriváty, rafinerie, použití barev a rozpouštědel atd.), ale i přirozených, např. biogenní emise z vegetace (Seinfeld, Pandis 2006).

Při vzniku přízemního O_3 nezáleží pouze na absolutním množství prekurzorů, ale i na jejich vzájemném poměru (Sillman et al. 1990; Fiala, Závodský 2003). Ve venkovských oblastech, kde je režim limitovaný NO_x , charakterizovaný relativně nízkými koncentracemi NO_x a vysokými koncentracemi VOC, narůstají koncentrace přízemního O_3 s rostoucími koncentracemi NO_x , zatímco se vzrůstajícími koncentracemi VOC se mění jen málo. Naopak v oblastech s režimem limitovaným VOC dochází k poklesu koncentrací přízemního O_3 s rostoucími koncentracemi NO_x a k nárůstu koncentrací přízemního O_3 s rostoucími koncentracemi VOC. Zvýšení koncentrací přízemního O_3 v důsledku poklesu emisí NO_x , respektive rostoucího poměru NO_2/NO (modernizace a denitrifikace velkých emisních zdrojů) bylo pozorováno v severozápadních Čechách (Hůnová, Baumelt 2018).

Oblasti s vysokým poměrem NO_x/VOC jsou typicky znečištěné oblasti okolo center velkých měst. Závislost vzniku přízemního O_3 na počátečních koncentracích VOC a NO_x se často vyjadřují na diagramech ozonových isopleť. Jedná se o zobrazení maximální dosažené koncentrace přízemního O_3 jako funkce počáteční koncentrace NO_x a VOC (Moldanová 2009). Významnou roli při vzniku přízemního O_3 hrají nejen koncentrace prekurzorů, ale i meteorologické podmínky (Colbeck, Mackenzie 1994). Imisní koncentrace přízemního O_3 narůstají s rostoucí intenzitou ultrafialovým zářením a zvyšující se teplotou vzduchu, naopak klesají s rostoucí relativní vlhkostí vzduchu. Tyto závislosti byly prokázány i na výsledcích dlouhodobých měření ČHMÚ (Hůnová et al. 2019). Vysoké koncentrace bývají spojeny s déletrvající anticyklonální situací. Kromě výše popsaného fotochemického mechanismu se koncentrace přízemního O_3 mohou zvyšovat i epizodicky v důsledku průniku stratosférického ozonu do troposféry a také při bouřkách. V poslední době se rovněž zvyšuje význam dálkového přenosu přízemního O_3 v rámci proudění na severní polokouli do Evropy a Severní Ameriky ze zdrojových oblastí jihovýchodní Asie. Přízemní O_3 je z atmosféry odstraňován reakcí s NO, mechanismem suché či mokré depozice a interakcí s rostlinami (stomatárním tokem).