

9 Onesnaženost zraka z delci in s črnim ogljikom

Kristina Glojek, Asta Gregorič, Griša Močnik, Luka Drinovec, Honey Dawn C. Alas, Andrea Cuesta - Mosquera, Kay Weinhold, Maik Merkel, Thomas Müller, Martina Ristorini, Dominik van Pinxteren, Hartmut Herrmann, Alfred Wiedensohler, Matej Ogrin

Ljudje lahko preživimo tri tedne brez hrane in tri dni brez vode ter le nekaj minut brez zraka. Vendar zrak jemljemo za nekaj samoumevnega. Onesnaženega zraka, ki ga dihamo, večinoma ne vidimo, vendar pa ima številne negativne učinke na naše zdravje in zdravje naših otrok (Fuller, 2019). V Sloveniji zaradi z delci onesnaženega zraka prezgodaj umre okoli 1.700 ljudi na leto, kar je približno petnajstkrat več, kot je smrti v prometnih nesrečah (European ..., 2020). Naravni viri delcev v zraku so na primer vulkanski izbruhi, gozdni požari (tisti, ki niso posledica namernega požiga ali človekove malomarnosti) in prenos puščavskega peska. Virov onesnaženega zraka zaradi človekovega delovanja je prav tako veliko in marsikje povzročajo znatno slabšanje kakovosti zraka. Med boljše znane sodijo promet, industrija, zgorevanje premo-ga, med manj znane pa kmetijstvo in zgorevanje lesa. Najpomembnejše negativne učinke na zdravje ljudi od vseh onesnaževal v zraku povzročajo delci. Najbolj prepoznani so bolezni pljuč, srca in ožilja (WHO, 2013; WHO, 2016; WHO, 2021). Ogljični delci (saje), ki nastanejo pri nepopolnem izgorevanju ogljičnih goriv, so običajno manjši od 1 μm , in tisti del, ki močno absorbira svetlobo, imenujemo črni ogljik (BC). Ti delci so močnejše povezani z nezaželenimi vplivi na zdravje (Jannsen in sod., 2012). Ker BC nastane direktno z izpusti in je v zraku inerten, je dober pokazatelj virov izpustov. Delci PM_{10} pa so vsi delci, manjši od 10 μm , in predstavljajo mešanico primarnih (neposredno povezani z viri izpustov) in sekundarnih delcev (nastajajo v ozračju iz drugih onesnaževal). Zaradi močne absorpcije Sončeve svetlobe pomembno prispevajo tudi h globalnemu segrevanju ozračja (Bond in sod., 2013; IPCC, 2013).

Poleg samih virov onesnaženja na kakovost zraka pomembno vplivajo tudi vremenske razmere in relief. Odras tega so poseljene doline, kotline in kraška polja, kjer so zlasti v hladni polovici leta talne temperaturne inverzije pogost in izrazit pojav (Ogrin, 2003). Običajno se ponoči ob mirnem in jasnem vremenu hladnejši zrak z večjo gostoto steka po pobočjih navzdol in zapolni reliefne kotanje. Tam se ohlajen zrak zadrži in nadalje ohlaja. Spodaj v kotanji je tako najhladnejše, zgoraj pa je topleje – pojav temperaturne inverzije oz. obrata. Inverzna plast doseže višino nekaj deset, lahko tudi nekaj 100 metrov, odvisno od reliefnih karakteristik kotanj (zlasti volumen in odprtost), vremenskih razmer in časa v dnevju. V času inverzije je ozračje pri tleh zelo stabilno in se ne meša z višje ležečimi plastmi, kar vpliva na kopičenje onesnaževal in posledično povečano onesnaženje zraka pri tleh. V alpskih dolinah so v takih primerih koncentracije ogljičnih delcev do 6-krat višje kot na širšem območju in na ravninah (Herich in sod., 2014).

Dosedanje raziskave onesnaženosti zraka so se osredotočale predvsem na onesnaževanje zraka v večjih urbanih središčih, ki ga povzroča promet. Zaradi tehnoloških izboljšav in zakonodaje izpusti iz prometa upadajo, izpusti iz zgorevanja biomase pa v večini evropskih držav še vedno niso regulirani in predstavljajo najpomembnejši vir delcev v zraku (van der Werf in sod., 2010; Briggs, Long, 2016; Klimont in sod., 2017; European ..., 2020). O kakovosti zraka na podeželju vemo malo, saj atmosferski modeli zaradi premajhne prostorske ločljivosti podcenjujejo onesnaženost zraka v manjših poseljenih reliefnih kotanjah (Holmes in sod., 2015), meritev pa ni prav veliko (Chevrier, 2016). Za pridobitev informacij o dejanskem stanju kakovosti zraka na nekem območju so potrebne meritve na območjih, ki so z vidika geografske lege najbolj podvržena h kopičenju onesnaževal v ozračju. V ta namen smo na primeru retijske kotanje v letu 2017/18 izvedli meritve onesnaženosti zraka z delci, katerih pomembnejše ugotovitve predstavljamo tudi v tem prispevku.

9.1 Koncentracije delcev PM_{10} in črnega ogljika (BC)

Za območje meritev smo izbrali kraško polje Retje, ki je širše poznano kot Retijska uvala, in pobočja, ki jo omejujejo. Razmeroma simetrična oblika kotanje, majhna velikost (pribl. 1,5 km² in manj kot 150 m globine), gručasto poseljeno dno in z gozdom porasla širša okolica predstavljajo idealne razmere za preučevanje ozračja hribovitih podeželskih območij. Lega v kotanji vpliva na pogoste temperaturne inverzije, v gručastem naselju na dnu kotanje pa se večina gospodinjstev ogreva na les, kar predstavlja glavni vir BC in ostalih delcev.

Slika 9.1: Pogled na hrib Tabor in kraško polje Retje iz zraka z označenima lokacijama merilnih mest. (Foto: U. Stepišnik)



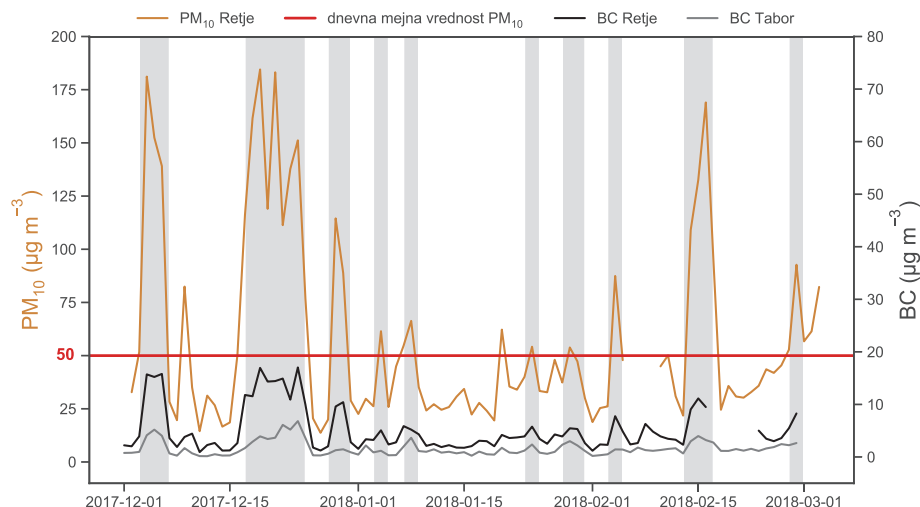
V letih 2017 in 2018 sta bili na tem območju postavljeni dve stacionarni merilni postaji, ena v vasi Retje na dnu kotanje, druga pa na vrhu hriba Tabor (Slika 9.1). Na obeh postajah smo merili BC z Aethalometrom AE33 (Magee Scientific), v Retjah pa smo na filtre vzorčili tudi delce PM_{10} z namenom kemijske karakterizacije (merilnik Digitel DHA-80). Meritve črnega ogljika smo opravljali od konca oktobra 2017 do konca maja 2018, referenčne meritve delcev PM_{10} pa v zimskih mesecih istega leta (december, januar, februar). Poleg onesnaževal so se na postajah spremljale tudi meteorološke spremenljivke, in sicer temperatura zraka, zračni tlak in relativna vlažnost.

Poleg stalnih merilnih postaj, kjer so meritve potekale neprekinjeno, smo v zimskem času trikrat na dan (zjutraj, opoldne in zvečer) opravili tudi mobilne meritve preko celotne kotanje s t. i. nahrbtnikoma TROPOS. Gre za nahrbtnika, ki so jih razvili na Inštitutu za troposferske raziskave TROPOS in sta opremljena z majhnimi merilniki za kakovost zraka (MicroAethalometer AE51 za določanje BC in optični merilnik OPSS, s katerim smo določili koncentracije delcev $PM_{2,5}$). Z namenom določitve prisotnosti temperaturne inverzije vzdolž retijske kotanje smo na nahrbtniku imeli pritrjen tudi temperaturni senzor. Mobilne meritve so potekale peš po vnaprej določeni krožni poti. Skupaj je bilo v 47 dneh opravljenih 107 obhodov (43 jutranjih, 24 opoldanskih in 40 večernih). Mobilne meritve je v 43 primerih opravila ena oseba, za zagotavljanje kakovosti meritev pa so v 64 primerih meritve potekale v paru z dvema merilnikoma. Za mobilne meritve je bilo prehojenih 642 km. Metode meritev so natančneje opisane v znanstveni literaturi, kot npr. Glojek in sod. (2018a, 2020) ter Alas in sod. (2019, 2020).

Na Sliki 9.2 je prikazan časovni potek koncentracij BC in delcev PM_{10} (24-urno povprečje) na vrhu hriba Tabor in v vasi Retje. Z rdečo črto je označena dnevna mejna vrednost za delce PM_{10} , ki znaša $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in glede na Uredbo o kakovosti zunanjega zraka (2011) ne sme biti presežena več kot 35-krat v koledarskem letu. Povprečna letna vrednost pa ne sme presegati $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Za BC mejne vrednosti niso določene, vendar pa je vsako povišanje koncentracij onesnaževal dokazano povezano s povečanim tveganjem tako za akutne kot kronične bolezni (Jannsen in sod., 2012).

Od 88 zimskih dni v letu 2017/18 (1. 12. 2017–3. 3. 2018) jih je v Retjah 34 krepko preseglo mejno vrednost delcev PM_{10} $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in tako že skoraj doseglo dovoljenih 35 preseganj v celem letu. Povprečna vrednost za zimo 2017/18 je znašala $57,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ s standardnim odklonom koncentracij $44,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, kar je več, kot je bilo v istem obdobju izmerjeno v Ljubljani (Gjerek in sod., 2018; Kozlovič in sod., 2019). Tudi zimske koncentracije BC (povprečje \pm standardni odklon) v Retjah $5,2 \pm 7,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ so primerljive z večjimi srednjevropskimi mesti (npr. Fuller in sod. 2014; Manigrasso in sod., 2017; Küpper in sod., 2018), hkrati pa so koncentracije višje, kot so bile v enakem obdobju v Ljubljani (Aerosol, d. o. o., 2018). Koncentracije na vrhu hriba Tabor so zaradi manjšega števila virov v neposredni bližini (gospodinjstva) in večje prevetrenosti precej nižje (3-krat) kot na dnu kotanje v vasi Retje. Povprečne dnevne vrednosti BC na Taboru so pozimi znašale $1,6 \pm 2,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Najvišje koncentracije delcev PM_{10} in BC so bile izmerjene v dveh daljših obdobjih stabilnega ozračja v decembru 2017, ki so ga spremljale izredno nizke temperature – temperatura na postaji v Retjah se je

Slika 9.2: 24-urne koncentracije (od 6.00 do 6.00 naslednjega dne) delcev PM_{10} v Retjah (oranžna črta) ter dnevno povprečje minutnih koncentracij BC v Retjah (črna črta) in na Taboru (siva črta) v zimi 2017/18. Z rdečo črto je označena zakonsko določena mejna dnevna vrednost za delce PM_{10} , s sivo pa so obarvana daljša obdobja s temperaturno inverzijo.



spustila do $-17,4$ °C. Prvo obdobje je trajalo od 4. do 8. decembra, drugo pa od 17. do 25. decembra. V tem času so se povprečne dnevne koncentracije delcev PM_{10} povzpеле tudi do $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Po indeksu kakovosti zraka (EEA, 2020), ki se računa kot 12-urno povprečje onesnaževal, se vrednosti PM_{10} nad $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ uvrščajo v najslabši razred kakovosti zraka. V času temperaturnih inverzij so bile zabeležene višje koncentracije onesnaževal tudi na hribu Tabor.

V času premešanega ozračja, ko temperatura z višino pada, pa koncentracije onesnaževal na območju znatno padejo, in sicer na raven t. i. regionalnega ozadja (postaja Iskrba; Gjerek in sod., 2018; Kozlovič in sod., 2019), za katerega je značilen zanemarljiv vpliv virov izpustov, ki so od območij oddaljeni več deset kilometrov.

9.2 Viri črnega ogljika (BC) in časovno spreminjanje koncentracij

Na podlagi optičnih lastnosti delcev, ki absorbirajo svetlobo, lahko določimo prispevek virov h koncentracijam BC, pri čemer lahko ločimo prispevek prometa in zgorevanja biomase. Spreminjanje absorpcije delcev z valovno dolžino opisuje Ångströmov eksponent (Moosmüller in sod., 2011), ki je za popolnoma črne delce, kot so dizelski izpuhi, blizu 1, za dim, nastal pri zgorevanju biomase, pa je višji od 1,7 (npr. Sandradewi in sod., 2008; Zotter in sod., 2017). Za razločevanje med viroma je bil v Loškem Potoku določen par eksponentov, 1 za promet in 2 za zgorevanje biomase (Sandradewi in sod., 2008). Povprečne vrednosti s standardnim odklonom

in mediane celokupnih koncentracij BC, BC, nastalega z zgorevanjem biomase, in BC iz prometa po letnih časih v Retjah so navedene v Preglednici 9.1. Prispevek zgorevanja biomase in prometa k BC je izražen v absolutnih vrednostih in kot delež celokupnih koncentracij BC.

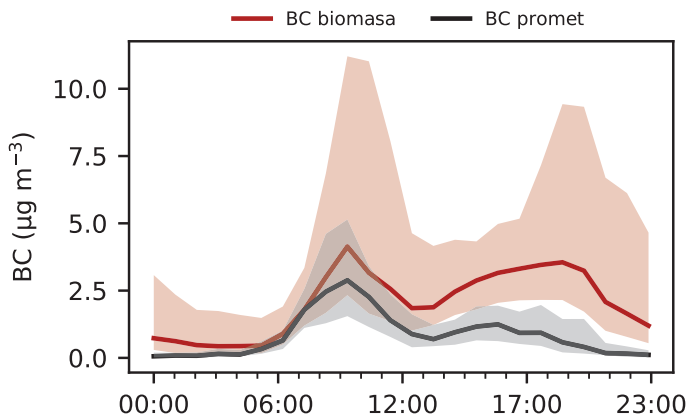
Preglednica 9.1: Aritmetična sredina s standardnim odklonom ($AS \pm SD$) in mediana (MED) celokupnih koncentracij črnega ogljika (BC), črnega ogljika, nastalega z zgorevanjem biomase (BC_{zb}), in črnega ogljika iz prometa (BC_{pr}) v absolutnih vrednostih ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) in kot delež celokupnih koncentracij (%) od jeseni 2017 do pomladi 2018 na merilnem mestu Retje.

Letni čas	BC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		BC_{zb} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		BC_{zb}/BC [%]		BC_{pr} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		BC_{pr}/BC [%]	
	AS \pm SD	MED	AM	MED	AM	MED	AM	MED	AM	MED
Jesen 2017	3,2 \pm 5,2	1,5	1,9 \pm 2,7	0,9	63 \pm 26	63	1,3 \pm 3,6	0,4	37 \pm 26	37
Zima 2017/18	5,2 \pm 7,3	2,4	4,0 \pm 6,0	1,7	75 \pm 23	79	1,1 \pm 2,8	0,3	25 \pm 23	21
Pomlad 2018	2,2 \pm 4,3	1	1,2 \pm 2,3	0,5	54 \pm 26	51	1,0 \pm 2,9	0,4	46 \pm 26	49

K onesnaženju z BC na območju največ prispeva ogrevanje gospodinjstev na lesno biomaso, in sicer pozimi v Retjah med 75 in 80 % oz. $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ od povprečno malo več kot $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ celokupnega BC. Z zmanjšanjem koncentracij BC, nastalega z zgorevanjem biomase v ostalih mesecih opravljenih meritev (konec oktobra, november, marec, april in maj), se zmanjšajo tudi celokupne BC, saj so koncentracije BC iz prometa v vseh letnih časih približno enake in znašajo v povprečju $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. V novembru tako celokupne koncentracije BC padejo na malo več kot $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, od tega zgorevanje biomase prispeva okoli $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pomladi je upad celokupnih koncentracij BC še večji kot proti koncu jeseni. Zaradi večje premešanosti ozračja, ki je posledica močnejšega Sončevega obsevanja, višjih temperatur in daljšega dneva, ter zaradi manjših potreb po ogrevanju (upad relativnega prispevka zgorevanja biomase k celokupnim koncentracijam BC na malo več kot 50 %) v povprečju koncentracije padejo na nekaj več kot $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Na Sliki 9.3 je prikazan dnevni potek koncentracij BC ločeno glede na prispevek zgorevanja lesne biomase in prometa za merilno mesto v Retjah v zimskih mesecih 2017/18. Celokupne koncentracije BC se zjutraj okrog 9. ure in zvečer med 16. in 20. uro v Retjah povzpnejo do $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (tretji kvartil) s srednjo vrednostjo (mediana) $6,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Koncentracije BC, nastalega z zgorevanjem biomase, dosežejo $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (tretji kvartil) z vrednostjo mediane pribl. $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Zjutraj k onesnaženosti z BC nekoliko več prispeva tudi promet, ko se ljudje odpravljajo na delo in v šolo. Prispevek prometa zjutraj doseže do $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Najnižje koncentracije BC so med 3. in 4. uro zjutraj, ko koncentracije padejo pod $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Padec koncentracij povezujemo z manjšo intenzivnostjo virov v teku noči in redčenjem koncentracij čez dan. Na dnevnem poteku koncentracij je viden tudi upad koncentracij okrog 13. ure. Ta je posledica slabitve virov okrog poldneva in redčenja, h kateremu dodatno prispeva vsaj delni razkroj

Slika 9.3: Potek srednjih dnevni (mediana) koncentracij črnega ogljika (BC), ločeno glede na izvor za Retje v zimskih mesecih 2017/18. Črna črta označuje črni ogljik (BC), nastal s prometom, rdeča črta pa črni ogljik (BC), katerega izvor predstavlja zgorevanje biomase. Osenčeno območje predstavlja razpon izmerjenih koncentracij (prvi in tretji kvartil).



ali dvig inverzne plasti, vendar pa koncentracije vseeno ostanejo bistveno višje kot ponoči.

Jutranji in večerni višek koncentracij BC se ujema z ogrevalnimi navadami gospodinjstev, ki v 95 % zakurijo zjutraj in/ali zvečer (Glojek in sod., 2018b), in razvojem temperaturne inverzije. V dneh s temperaturno inverzijo je večerni višek koncentracij kljub majhnemu prispevku prometa še izrazitejši (koncentracije BC dosežejo do 20 µg/m³, od tega pa zgorevanje biomase prispeva kar 96 %). Zgodaj zvečer je namreč inverzna plast tik nad tlemi in zelo plitka (v povprečju 55 m) (Glojek in sod., 2021), saj šele začne nastajati, kar povzroči, da se koncentracije onesnaževal pri tleh hitro dvignejo na zelo visoko raven.

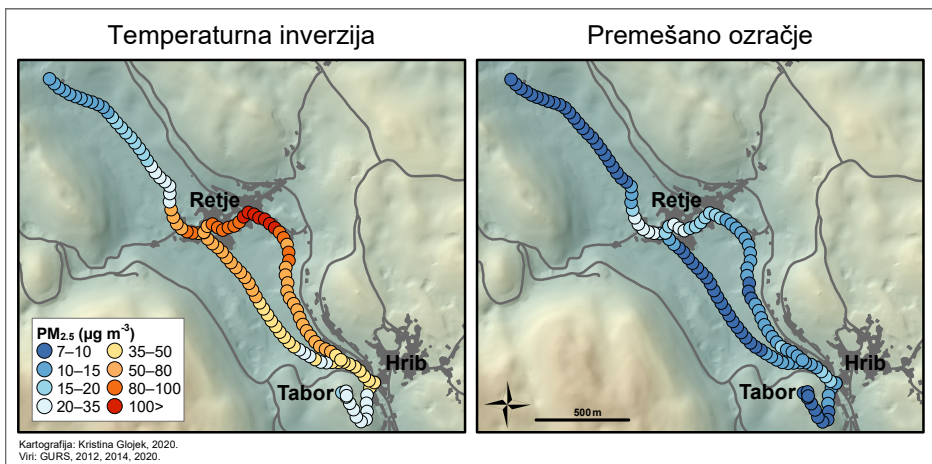
9.4. Prostorsko spreminjanje koncentracij PM_{2.5} glede na stabilnost ozračja

V času zimskih temperaturnih inverzij, ki so bile v zimi 2017/18 prisotne v več kot 70 % noči in juter (Glojek in sod., 2021), se koncentracije BC in delcev PM v retijski kotanji hitro dvignejo na zelo visoko raven. Raven onesnaženosti se poveča v celotni kotanji (Slika 9. 4 levo) in doseže v povprečju 4,5 ± 2,6 µg/m³ BC in 48,0 ± 27,7 µg/m³ delcev PM_{2.5}. Tako visok nivo koncentracij se v času temperaturnih inverzij ohrani čez cel dan in presega priporočeno 24-urno mejno vrednost Svetovne zdravstvene organizacije (WHO) 15 µg/m³ za več kot 3-krat. Vendar pa povečanje ni povsod enako. Najvišje koncentracije so bile izmerjene v vasi Retje blizu merilne postaje pri gasilskem domu in na začetku prve pobočne ceste, ki povezuje vas Retje z naseljem Hrib. V času temperaturnih inverzij povprečne koncentracije delcev PM_{2.5} tukaj znašajo kar 140 µg/m³, kar po indeksu kakovosti zraka (EEA, 2020) sodi med zelo slabo kakovost

zraka. Najnižje koncentracije $PM_{2.5}$ so bile izmerjene na severozahodnem koncu kotanje pri kapelici sv. Florjana, in sicer kar 9- do 13-krat nižje kot v vasi Retje, v povprečju $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ $PM_{2.5}$. Prav tako so bile precej nižje koncentracije, izmerjene na vrhu hriba Tabor, in sicer v povprečju $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Izven jezera hladnega zraka kotanje torej koncentracije padejo na raven, ki po indeksu kakovosti zraka spada v razred dobre kakovosti. Koncentracije delcev $PM_{2.5}$ se ob cesti, ki pelje iz naselja Hrib, po dnu kotanje proti vasi Retje povečujejo, in sicer od 32 do $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

V času premešanega ozračja (Slika 9.4 desno) pa koncentracije delcev $PM_{2.5}$ v celotni kotanji v povprečju ne dosežejo $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (tj. pribl. 4-krat nižje koncentracije v primerjavi z obdobji s temperaturno inverzijo). Vendar pa smo v Retjah v bližini virov izpustov vseeno zabeležili povišanje koncentracij, in sicer v povprečju $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ delcev $PM_{2.5}$, ter $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ $PM_{2.5}$ v naselju Hrib. V Retjah so koncentracije delcev tudi v času dobro premešanega ozračja višje od koncentracij delcev v času temperaturnih inverzij na Taboru.

Slika 9.4: Prostorska razporeditev koncentracij delcev $PM_{2.5}$ v času zimskih temperaturnih inverzij (levo) in v času premešanega ozračja (desno) vzdolž retijske kotanje.



9.5 Loški Potok je pokazatelj kakovosti zraka dolin, kraških polj in drugih kotanj hribovitih območij

Glavni vir onesnaženosti zraka z BC in delci PM na območju predstavlja ogrevanje gospodinjstev na les, ki pozimi v Retjah prispeva okrog 80 % koncentracij BC. Meritve so potrdile ugodne razmere za nastanek talnih temperaturnih inverzij v retijski kotanji, ki so se v zimi 2017/18 pojavile v več kot 70 % noči. Te zelo stabilne razmere preprečujejo učinkovito mešanje in redčenje izpustov, kar povzroči močno povišanje koncentracij v kotanji. V času zimskih temperaturnih inverzij, ko so zaradi nizkih temperatur tudi izpusti virov večji, so koncentracije črnega ogljika, delcev $PM_{2.5}$ in PM_{10} primerljive z izmerjenimi koncentracijami v večjih evropskih urbanih središčih in krepko presegajo

mejne vrednosti, določene za delce PM. Onesnaženost zraka je največja ob večernih temperaturnih inverzijah, ko se ljudje vrnejo domov in zakurijo, ter zaradi plitke temperaturne inverzije, ki zvečer šele nastaja in v povprečju znaša le 55 m.

Za razliko od obdobj s temperaturno inverzijo v času premešanega ozračja koncentracije BC in delcev PM padejo za 4-krat, in sicer na raven, ki ustreza merilnim postajam regionalnega ozadja in se po indeksu kakovosti zraka uvršča v razred dobre kakovosti zraka.

V primerjavi z večjimi in globljimi poseljenimi kotlinami in dolinami je spreminjanje koncentracij onesnaževal v primeru manjše, plitvejše kraške kotanje veliko hitrejše in intenzivnejše. Zaradi manjše prostornine zraka v kotanji že manjše število virov, tj. 243 gospodinjstev, pozimi povzroči onesnaženost zraka z BC in delci PM, ki je primerljiva z večjimi mesti dolin in kotlin. Meritve tudi kažejo, da je lahko onesnaženost zraka z delci v manjših poseljenih kotanjah na podeželju precej večja, kot kažejo modelske napovedi onesnaženosti. V času temperaturnih inverzij so visokim koncentracijam BC in delcev PM na obravnavanem območju najbolj izpostavljeni prebivalci v vasi Retje. Med dopoldanskimi in opoldanskimi inverzijami pa zaradi razvoja šibkega termičnega gibanja zraka znotraj kotanje najbolj onesnažen zrak dihajo prebivalci ob prvi pobočni cesti južno usmerjenega pobočja retijske kotanje. Zgodaj zvečer, ko je inverzija omejena le na samo dno kotanje, pa najbolj onesnažen zrak dihajo na samem dnu, v vasi Retje.

Izmerjene koncentracije obravnavanih onesnaževal v času zimskih temperaturnih inverzij so zelo zaskrbljivoče, saj ob večerih dosežejo nivo najbolj onesnaženih območij na svetu, kot je npr. indijsko metropolitansko območje Delhi (Apte in sod., 2011; Goel in sod., 2015; WHO, 2016). Podobne razmere pa je pričakovati tudi v drugih kotanjah na podeželju, kjer se gospodinjstva ogrevajo na les. Pri sprejemanju ukrepov za izboljšanje kakovosti zraka je treba vključiti vsa gospodinjstva, saj k onesnaženosti zraka prispevajo vsi viri na območju. Poleg številnih možnih tehnoloških izboljšav raziskave kažejo (npr. Klauser in sod., 2017), da je izpuste gospodinjstev mogoče znatno zmanjšati že s samimi ogrevalnimi navadami in optimalno uporabo kurilnih naprav. Pomembno je namreč, kdaj zakurimo (najbolje sredi dneva, ko je premešanost ozračja največja, pa tudi ljudje so večinoma v službi), pravilna priprava, izbira in uporaba ustreznega goriva (suh les) ter uporaba in vzdrževanje kotlov po navodilih proizvajalca. Uporaba skupnih kotlovnice za več stavb je prav tako ena izmed učinkovitih rešitev pri izboljšanju kakovosti zraka na nekem območju. Zagotovo pa veliko pripomore tudi visoka energetska učinkovitost stavb in ogrevalnih sistemov, zato moramo omeniti tudi energetske sanacije objektov.

Viri in literatura

- Aerosol, d. o. o., 2018. Podatki meritev črnega ogljika na Agenciji Republike Slovenije v okviru projekta SBC-SL (Smart black carbon street light).
- Alas, H. D. C., Müller, T., Weinhold, K., Pfeifer, S., Glojek, K., Gregorič, A., Močnik, G., Drinovec, L., Costabile, F., Ristorini, M., Wiedensohler, A., 2020. Performance of

- microAethalometers: Real-world Field Intercomparisons from Multiple Mobile Measurement Campaigns in Different Atmospheric Environments. *Aerosol and Air Quality Research*, 20, 12, str. 2640–2653.
- Alas, H. D. C., Weinhold, K., Costabile, F., Di Ianni, A., Müller, T., Pfeifer, S., Di Liberto, L., Turner, J.R., Wiedensohler, A., 2019. Methodology for High Quality Mobile Measurement with Focus on Black Carbon and Particle Mass Concentrations. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, April, str. 1–27.
- Apte, J. S., Kirchstetter, T. W., Reich, A. H., Deshpande, S. J., Kaushik, G., Chel, A., Marshall, J. D., Nazaroff, W. W., 2011. Concentrations of fine, ultrafine, and black carbon particles in auto-rickshaws in New Delhi, India. *Atmospheric Environment*, 45, 26, str. 4470–4480.
- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., Deangelo, B. J., Flanner, M. G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P. K., Sarofim, M. C., Schultz, M. G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., Bellouin, N., Guttikunda, S. K., Hopke, P. K., Jacobson, M. Z., Kaiser, J. W., Klimont, Z., Lohmann, U., Schwarz, J. P., Shindell, D., Storelvmo, T., Warren, S. G. and Zender, C. S., 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system. A scientific assessment. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 11, str. 5380–5552.
- Briggs, N. L., Long, C. M., 2016. Critical review of black carbon and elemental carbon source apportionment in Europe and the United States. *Atmospheric Environment*, 144, str. 409–427.
- Chevrier, F., 2016. Chauffage au bois et qualité de l'air en Vallée de l'Arve : définition d'un système de surveillance et impact d'une politique de rénovation du parc des appareils anciens Chauffage au bois et qualité de. Grenoble: Université Grenoble Alpes, 248 str.
- EEA [European Environmental agency], 2020. European Air Quality Index (EAQI), URL: <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-index/index> (citirano 13. 10. 2020).
- European Air Quality Index. URL: <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-index> (citirano 13. 10. 2020).
- European Environment Agency (EEA), 2020. Air quality in Europe — 2020 report. URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2020-report> (citirano 13. 10. 2020).
- Fuller, G. W., Tremper, A. H., Baker, T. D., Yttri, K. E., Butterfield, D., 2014. Contribution of wood burning to PM10 in London. *Atmos. Environ.*, 87, str. 87–94.
- Fuller, G., 2019. *The Invisible Killer. The Rising Global Threat of Air Pollution – and How We Can Fight Back*. London: Melville House UK, 224 str.
- Gjerek, M., Koleša, T., Logar, M., Matevž, L., Murovec, M., Rus, M., Žabkar, R., 2018. Kakovost zraka v Sloveniji v letu 2017, Agencija Republike Slovenije za okolje, 151 str.

- Glojek, K., Gregorič, A., Močnik, G., Cuesta-Mosquera, A., Wiedensohler, A., Drinovec, L., Ogrin, M., 2020. Hidden black carbon air pollution in hilly rural areas – a case study of Dinaric depression. *European Journal of Geography*, 11, 2, str. 105–122.
- Glojek, K., Gregorič, A., Ogrin, M., 2018a. Onesnaženost zraka s črnim ogljikom – študija primera iz Loškega Potoka. *Dela*, 50, str. 5–25.
- Glojek, K., Močnik, G., Alas, H. D. C., Cuesta-Mosquera, A., Drinovec, L., Gregorič, A., Ogrin, M., Weinhold, K., Ježek, I., Müller, T., Rigler, M., Pinxteren, D. Van, Herrmann, H., Ristorini, M., Merkel, M., 2021. The impact of Temperature inversions on Black Carbon and Particle Mass Concentrations from Wood-burning in a Mountainous Area. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 34.
- Glojek, K., Ogrin, M., 2018b. Preliminarni rezultati anketiranja gospodinjstev v naseljih Retje in Hrib občine Loški Potok. Ljubljana, Oddelek za geografijo, Filozofska fakulteta.
- Goel, R., Gani, S., Guttikunda, S.K., Wilson, D., Tiwari, G., 2015. On-road PM_{2.5} pollution exposure in multiple transport microenvironments in Delhi. *Atmospheric Environment*, 123, str. 129–138.
- GURS [Geodetska uprava Republike Slovenije], 2012. Zbirni kataster gospodarske javne infrastrukture, GJI.
- GURS [Geodetska uprava Republike Slovenije], 2014. Digitalni model višin, DMV 5 x 5 m.
- GURS [Geodetska uprava Republike Slovenije], 2020. Kataster stavb.
- Herich, H., Gianini, M. F. D., Piot, C., Močnik, G., Jaffrezo, J. L., Besombes, J. L., Prévôt, A. S. H. and Hueglin, C., 2014. Overview of the impact of wood burning emissions on carbonaceous aerosols and PM in large parts of the alpine region, *Atmos. Environ.*, 89, str. 64–75.
- Holmes, H. A., Sriramasamudram, J. K., Pardyjak, E. R., Whiteman, C. D., 2015. Turbulent Fluxes and Pollutant Mixing during Wintertime Air Pollution Episodes in Complex Terrain. *Environ. Sci. Technol.*, 49, 22, str. 13206–13214.
- IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change], 2013. Climate change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (ur.). Cambridge in New York, Cambridge University Press, 1535 str. URL: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf (citirano 7. 8. 2018).
- Janssen, N. A. H., Gerlofs-Nijland, M. E., Lanki, T., Salonen, R.O., Cassee, F., Hoek, G., Fischer, P., Brunekreef, B., Krzyzanowski, M., 2012. Health effects of Black Carbon. World Health Organization, 96 str.
- Klauser, F., Kelz, J., Sturmlechner, R., Stressler, H., Schwabl, M., Reichert, G., Weissinger, A., Halsinger, W., Schmidl, C., 2017. The Model Region Vorau in Styria. Clean Air by biomass. 27th European Biomass Conference and Exhibition, Stockholm.

- Klimont, Z., Kupiainen, K., Heyes, C., Purohit, P., Cofala, J., Rafaj, P., Borken-Kleefeld, J., Schöpp, W., 2017. Global anthropogenic emissions of particulate matter including black carbon. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, str. 8681–8723.
- Kozlovič, L., Gjerek, M., Koleša, T., Logar, M., Matavž, L., Murovec, M., Rus, M., Žabkar, R., 2019. Kakovost zraka v Sloveniji v letu 2018, 170 str.
- Küpfer, M., Quass, U., John, A. C., Kaminski, H., Leinert, S., Breuer, L., Gladtko, D., Weber, S. and Kuhlbusch, T. A. J., 2018. Contributions of carbonaceous particles from fossil emissions and biomass burning to PM 10 in the Ruhr area, Germany. *Atmos. Environ.*, 189, str. 174–186.
- Manigrasso, M., Gualtieri, M., Barnaba, F., Gilardoni, S., Ciampichetti, S., Weinhold, K., Lucarelli, F., Vecchi, R., Padoan, E., Conidi, A., Volpi, F., Argentini, S., Biondi, R., Nava, S., Cordelli, E., Zanini, G., Perrino, C., Ubertaini, S., Malaguti, A., Valentini, S., Wiedensohler, A., Di Ianni, A., Costabile, F., Calzolari, G., Berico, M., Alas, H., Querol, X., Petralia, E., Grollino, M., Simonetti, G., Frasca, D., Petenko, I., Di Liberto, L., Amato, F., Casasanta, G., Bernardoni, V., Canepari, S., Montagnoli, M., Gobbi, G., Valli, G., Facchini, M., Avino, P., Aufderheide, M., Facci, A., Tranfo, G., 2017. First Results of the "Carbonaceous Aerosol in Rome and Environs (CARE)" Experiment. *Beyond Current Standards for PM10. Atmosphere*, 8, 12, str. 1–41.
- Moosmüller, H., Chakrabarty, R. K., Ehlers, K. M., Arnott, W. P., 2011. Absorption Ångström coefficient, brown carbon, and aerosols. Basic concepts, bulk matter, and spherical particles. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 1217–1225 str. URL: <https://www.atmos-chem-phys.net/11/1217/2011/acp-11-1217-2011.pdf> (citirano 17. 3. 2018).
- Ogrin, M., 2003. Vpliv reliefa na oblikovanje nekaterih mezoklimatskih tipov v Sloveniji. *Geografski vestnik*, 75, 1, str. 9–24.
- Sandradewi, J., Prévôt, A. S. H., Weingartner, E., Schmidhauser, R., Gysel, M., Baltensperger, U., 2008. A study of wood burning and traffic aerosols in an Alpine valley using a multi-wavelength Aethalometer. *Atmospheric Environment*, 42, 1, str. 101–112.
- Uredba o kakovosti zunanjega zraka. 2011. Uradni list RS. 9/11,8/15.
- Van Der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Collatz, G. J., Mu, M., Kasibhatla, P. S., Morton, D. C., Defries, R. S., Jin, Y., Van Leeuwen, T. T., 2010. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009). *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 23, str. 11707–11735.
- WHO [World Health Organization], 2013. Health Effects of Particulate Matter, World Health organization 2. URL: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/189051/Health-effects-of-particulate-matter-final-Eng.pdf (citirano 19. 12. 2021)
- WHO [World Health Organization], 2016. Ambient Air Pollution: a global assesment of exposure and burden of disease. Geneva: WHO Document Production Services, 121 str.

WHO [World Health Organization], 2021. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide, World Health Organization. Geneva: World Health Organization.

Zotter, P., Herich, H., Gysel, M., El-Haddad, I., Zhang, Y., Mocnik, G., Hüglin, C., Baltensperger, U., Szidat, S., Prévôt, A.S.H., Moč, G., 2017. Evaluation of the absorption Ångström exponents for traffic and wood burning in the Aethalometer-based source apportionment using radiocarbon measurements of ambient aerosol. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 6, str. 4229–4249.