

Danijela Strle*, Domen Svetlin*, Kristina Glojek**,
Matjaž Kobal***, Katarina Pogačnik*, Matej Ogrin****



MERITVE KONCENTRACIJ ČRNEGA OGLJIKA IN DUŠIKOVEGA DIOKSIDA NA LAVRICI IN V KRANJU

*Izvirni znanstveni članek
COBISS 1.01
DOI: 10.4321/dela.54.5-52*

Izvleček

Onesnaženost zraka v urbanih območjih je pomemben dejavnik kakovosti življenja, nesporen pa je tudi vpliv kakovosti zraka na zdravje ljudi. Med pomembna onesnaževala urbanega ozračja že desetletja uvrščamo dušikov dioksid (NO₂), po letu 2000 pa se vse več raziskav posveča tudi črnemu ogljiku (BC). V prispevku predstavljamo stacionarne in mobilne meritve črnega ogljika ter stacionarne meritve dušikovega dioksida v urbanem območju na dveh primerih. V prvem primeru gre za ugotavljanje vpliva ceste na kakovost zraka v neposredni okolici vrtca in nekdanje osnovne šole na Lavrici, v drugem primeru pa so prikazani rezultati meritev črnega ogljika na cestnem omrežju Kranja v gosti prostorski mreži.

Ključne besede: Kakovost zraka, mesta, črni ogljik (BC), dušikov dioksid (NO₂), stacionarne meritve, mobilne meritve

..... * Envirodual d.o.o., Tepanje 28d, SI-3210 Slovenske Konjice
..... ** Splitska ulica 61, SI-3320 Velenje,
..... *** Srednje Gameljne 56, SI-1211 Ljubljana-Šmartno
..... **** Oddelek za geografijo Filozofske fakultete Univerze v Ljubljani, Aškerčeva 2, SI-
..... 1000 Ljubljana
..... e-pošta: danijela.strle@envirodual.com, domen.svetlin@envirodual.com,
..... k.glojek@gmail.com, matjaz.kobalgm@gmail.com,
..... katarina.pogacnik@envirodual.com, matej.ogrin@ff.uni-lj.si

1 UVOD

Izboljšanje kakovosti zraka v urbanih območjih sodi med pomembne cilje številnih mestnih in državnih politik v Evropski uniji kot tudi v Sloveniji. Mestna območja so območja velike gostote in raznolikosti virov onesnaževanja zraka, hkrati pa so to območja gostejše poselitve. Na svetu v mestih živi 55 % svetovnega prebivalstva, ravno toliko tudi v Sloveniji (Urban population, 2020). A tu ne gre le za stanovanjska območja, pač pa v mestih dnevno preživlja čas tudi velik del prebivalstva iz bolj ali manj oddaljenih suburbanih ter ruralnih območij. Hkrati se moramo zavedati, da na leto na svetovni ravni onesnaženost zraka terja okoli 4 mio. življenj oziroma okoli 7 % vseh smrti. V Sloveniji onesnažen zrak zahteva 800 življenj letno, kar je približno sedemkrat več kot jih zahtevajo prometne nesreče (Mortality and ..., 2020; European Commission, 2020).

Zato v številnih mestih potekajo stalne in občasne meritve kakovosti zraka z namenom spremljanja stanja in vrednotenja ukrepov prometne ter prostorske politike. Poleg rednih meritev državnih ali občinskih okoljskih služb se izvajajo tudi občasne meritve kakovosti zraka. Večinoma gre za stacionarne meritve, to je za merjenje kakovosti zraka na določenem mestu. Prostorsko sliko lahko dobimo tako, da merilnike postavimo v gosti prostorski mreži, npr. v prečnih profilih na cesto ali v pravilno mrežo okoli večjih virov.

Osnovni namen članka je na primerih Kranja in naselja Lavrica predstaviti lokalno onesnaženost zraka, ki smo jo proučili s pomočjo stacionarnih ter mobilnih meritev. Razlog za izbiro Kranja je želja ugotoviti onesnaženost s črnim ogljikom v srednje velikem slovenskem mestu vključno z njegovim predmestjem in zaledjem. Meritve v Lavrici pa smo izvedli zato, ker smo želeli ugotoviti vpliv Dolenjske ceste na kakovost zraka v neposredni okolici Dolenjske ceste, saj na omenjenem območju zaradi prometnih obremenitev lokalna skupnost in država ne najdeta skupnega jezika glede preureditve prometa skozi Škofljico in Lavrico. Na kakovost zraka vplivajo različna onesnaževala. V članku se bomo osredotočili na črni ogljik in dušikov dioksid.

2 METODE

Stacionarne meritve v gosti prostorski mreži praviloma trajajo krajši čas, saj je daljše izvajanje takih meritev drago in zahteva veliko dela. Stacionarne meritve na enem (reprezentativnem) mestu pa običajno trajajo dlje, s čimer dobimo daljše neprekinjene podatkovne nize.

Pri mobilnih meritvah se inštrument premika po vnaprej določeni poti. Z njim dobimo prostorsko informacijo o kakovosti zraka na večjem območju ob določenem času. Za izbrano metodo se največkrat odločimo, ko nas zanima podroben prostorski prikaz onesnaženosti zraka na območju, kjer pričakujemo velike gradientne onesnaženosti, kot je to na primer mestni prostor (npr. Messier in sod., 2018; Jarjour in

sod., 2013). Ker je kakovost zraka odvisna tudi od časa, se mobilne meritve izvedejo večkrat, v različnih delih dneva in ob različnih vremenskih pogojih. Obe metodi imata svoje prednosti in slabosti ter sta primerni za različne pristope ugotavljanja onesnaženosti zraka. Metodi sta komplementarni in ju je najbolje uporabljati skupaj.

Stacionarne meritve smo izvedli pri vrtcu oziroma nekdanji osnovni šoli ob magistralni cesti na Lavrici v občini Škofljica. Lokacija je bila izbrana predvsem zaradi bližine ceste, saj nas je zanimal vpliv prometa na Dolenjski cesti na kakovost zraka v neposredni okolici. Meritve so potekale od 14. 10. do 28. 10. 2019 in so vključevale meritve črnega ogljika, meteorološke parametre, prečni profil koncentracij dušikovega dioksida ter obseg prometa. Štetje prometa je potekalo s sistemom TOPO, izvedlo pa ga je podjetje CESTEL d.o.o. Meritev obsega hitrost ter hrup vozil, hkrati pa klasificira ter šteje vozila glede na njihovo dolžino. Sistem ima certifikat nemškega razvojnega inštituta za avtoceste. Prednosti tega sistema so mobilnost, enostavnost ter hiter prenos podatkov.

Mobilne meritve smo izvedli med 8. 10. in 11. 11. 2019 v Mestni občini Kranj. Meritve so vključevale samo črni ogljik. Ker so koncentracije odvisne od letnega časa, je priporočljivo, da se meritve izvedejo v vseh letnih časih. Tako bi zajeli vse spremembe, povezane s črnim ogljikom, ki se dogajajo na območju Kranja tekom leta. Redne meritve so nujno potrebne v primeru izvajanja dolgoročnih ukrepov za izboljšanje kakovosti zraka, saj je le tako mogoče izmeriti njihovo učinkovitost. Meritve, ki so potekale dva tedna jeseni, niso referenčne za celo leto. Pričakujemo lahko, da so zimske vrednosti višje, spomladanske podobne, poletne pa nižje od izmerjenih. Pri izpustih se predvsem poveča količina črnega ogljika zaradi izgorevanja biomase, medtem ko prometni del ostaja podoben, saj je odvisen le od prometnih tokov, ki bolj sledijo dnevni ritmu kot ritmu letnih časov. Da bi dobili boljši vpogled v ravni letne onesnaženosti, bi morali meritve ponoviti še vsaj pozimi in poleti.

2.1 Meritve dušikovega dioksida

Dušikov dioksid nastaja na več načinov. Najpomembnejša sta, ko atmosferski dušik (N_2) vstopa v proces izgorevanja ali ko se dušik nahaja v gorivu. V obeh primerih ob reakciji s kisikom (O_2) nastane molekula NO_2 (Kumar, 2002). Zelo pogosto v prvi fazi nastane dušikov monoksid (NO), ki pa zaradi svoje neobstojnosti kmalu reagira s prostim atomom kisika v bolj obstojno obliko NO_2 . Med prometnimi izpusti dušikovih oksidov dušikov monoksid celo prevlada. Ker se zaradi hitrih reakcij blizu virov koncentracija obeh plinov hitro spreminja, pogosto oba plina skupaj imenujemo dušikovi oksidi (NO_x), čeprav v to skupino sodi še več dušikovih spojin in ne le NO in NO_2 . Dlje kot smo od virov dušikovih oksidov, večji je delež dušikovega dioksida med dušikovimi oksidi in na koncu povsem prevlada. Nad mesti se ob visokih koncentracijah dušikovih oksidov oblikuje značilna, rdečkasto obarvana atmosfera, ki je izraziteje vidna ob nizkem Soncu pozimi (Ogrin, 2007).

Pri koncentracijah, ki presegajo $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ima dušikov dioksid pomembne negativne učinke na zdravje (WHO air quality ..., 2006). Hkrati je dušikov dioksid indikator snovi, ki nastajajo v mešanici onesnaževal iz cestnega prometa, kot so ultrafini delci (ang.: ultrafine particles), dušikov oksid, delci ali benzen. Med negativne učinke dušikovega dioksida na zdravje sodijo tudi draženje sluznice in posledično povečano tveganje za dihalne infekcije (gripa), trajna ali pogosta izpostavljenost višjim koncentracijam pa lahko poveča pojav akutnih bolezni otrok (Air quality ..., 2007). Dušikov dioksid je tudi pomembna sestavina fotokemičnega smoga, ki je pomemben dejavnik pri nastajanju ozona pri tleh (WHO air quality ..., 2006).

Številne meritve dušikovega dioksida so že opravljali v preteklih desetletjih, v zadnjih letih pa so se raziskave krepile tudi na področju delcev in še posebej črnega ogljika (npr. Bond in sod., 2013; Glojek, Gregorič, Ogrin, 2019; Health effects of ..., 2012; Invernizzi in sod., 2011; Jereb in sod. 2018; Ježek in sod., 2018; Ogrin in sod., 2014; Ogrin in sod., 2016; Ramanathan, Carmichael, 2008; Tiwari in sod., 2013; Understanding air pollution ..., 2020). Pri tem so bile uporabljene različne metode in merilne naprave.

Meritve dušikovega dioksida so potekale na Lavrici s pomočjo difuzivnih vzorčevalnikov, v našem primeru smo uporabili Palmesove vzorčevalnike. Gre za metodo, ki je že bila podrobneje opisana v tujih (npr. Palmes in sod, 1976) ter domačih raziskavah (npr. Ogrin, 2007) in je na tem mestu ne bomo ponovno opisovali. Razlog za uporabo te metode je v dostopni ceni in možnosti izvedbe večjega števila meritev, kar omogoča tudi ugotavljanje širjenja onesnaženja s ceste v okolico. V našem primeru je šlo za postavitev treh merilnih točk na različni oddaljenosti na vsaki strani ceste, ki so bile izpostavljene od 15. do 28. oktobra 2019. Oddaljenost merilnih mest od ceste je bila na jugozahodno stran ceste 3,5 m, 18,5 m in 36,3 m ter na severovzhodno stran ceste 4,1 m, 14,5 m ter 35,5 m. Višina meritev je bila med 2,6 in 3,2 m nad tlemi (preglednica 1). Vzorčevalniki so bili zaradi večje zanesljivosti meritev postavljeni v parih ali v troje, koncentracijo dušikovega dioksida za merilno mesto pa smo določili tako, da smo izračunali aritmetično sredino obeh oziroma dveh bližnjih vrednosti, kjer so bili vzorčevalniki trije. Vzorčevalnike smo vstavili v zaklone, s čimer smo preprečili vdor turbulence v vzorčevalnik, kar lahko negativno vpliva na kakovost rezultatov. Vzorčevalnike v zaklonih smo pritrdili na obcestne objekte in infrastrukturo ob cesti, kot so semafor, prometni znak, žleb ob stavbi in kozolec. Pripravo in analizo vzorčevalnikov je opravil laboratorij podjetja Gradko International. V času meritev smo opravljali referenčne meritve z dvema vzorčevalnikoma na merilnem mestu ARSO Ljubljana Bežigrad. S tem smo lahko primerjali rezultate meritev z vzorčevalniki z meritvami referenčne metode ARSO v enakih oziroma zelo podobnih vremenskih razmerah kot na območju meritev. Povprečna koncentracija dušikovega dioksida, izmerjena z vzorčevalniki, je bila $29,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, medtem ko je bila povprečna koncentracija dušikovega dioksida na merilni postaji ARSO $27,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Vse izmerjene vrednosti smo zato korigirali s faktorjem 0,94.

Preglednica 1: Metapodatki o meritvah dušikovega dioksida na Lavrici od 15. 10. 2019 do 28. 10. 2019.

Merilno mesto	Oddaljenost od voznega pasu (m)	Višina nad tlemi (m)	Število vzorčevalnikov	Tip merilnega mesta
Škofljica JZ 1	3,5	3	2	prometno
Škofljica JZ 2	18,5	3,2	2	prometno
Škofljica JZ 3	36,3	3	3	prometno
Škofljica SV 1	4,1	3	3	prometno
Škofljica SV 2	14,5	2,6	3	prometno
Škofljica SV 3	35,5	2,8	3	prometno
ARSO	referenčna meritev	referenčna meritev	2	urbano ozadje

Slika 1: Difuzijski zaklon, v katerem se nahajajo difuzivni vzorčevalniki, smo pritrdili na žleb kozolca ob cesti (foto: D. Strle).



2.2 Meritve črnega ogljika

Nepopolno izgorovanje ogljičnih goriv, tj. fosilnih goriv, biogoriv in biomase, povzroča izpuste črnega ogljika (Center for climate ..., 2010). Črni ogljik je definiran kot snov, ki absorbira svetlobo in je sestavljena iz ogljika (Petzold in sod., 2013). Je primarno onesnaževalo in poleg požarov ter vulkanskih izbruhov nima drugih naravnih izvorov. To pomeni, da je edinstven indikator za izgorovanje ogljičnih goriv (Ježek, 2015; Drinovec in sod., 2015).

Zaradi pomembnega vpliva na zdravje ljudi in prispevka k podnebnim spremembam je črni ogljik vse pomembnejše in vse pogosteje obravnavano onesnaževalo (European Environmental Agency, 2013). Z vidika vpliva na zdravje ljudi ima črni ogljik negativen vpliv, saj povzroča resne zdravstvene težave. Povezan je z astmo in drugimi težavami z dihalni, srčnim infarkt in pljučnim rakom (Janssen in sod., 2012; Grahame in sod., 2014). Študije o kratkoročnih in dolgoročnih vplivih na zdravje ljudi zaradi onesnaženosti s črnim ogljikom kažejo na to, da črni ogljik sicer nima neposrednega negativnega vpliva, temveč škoduje, ker s seboj nosi najrazličnejše strupene kemikalije, ki posledično prodirajo v človeško telo (Health effects of ..., 2012). Črni

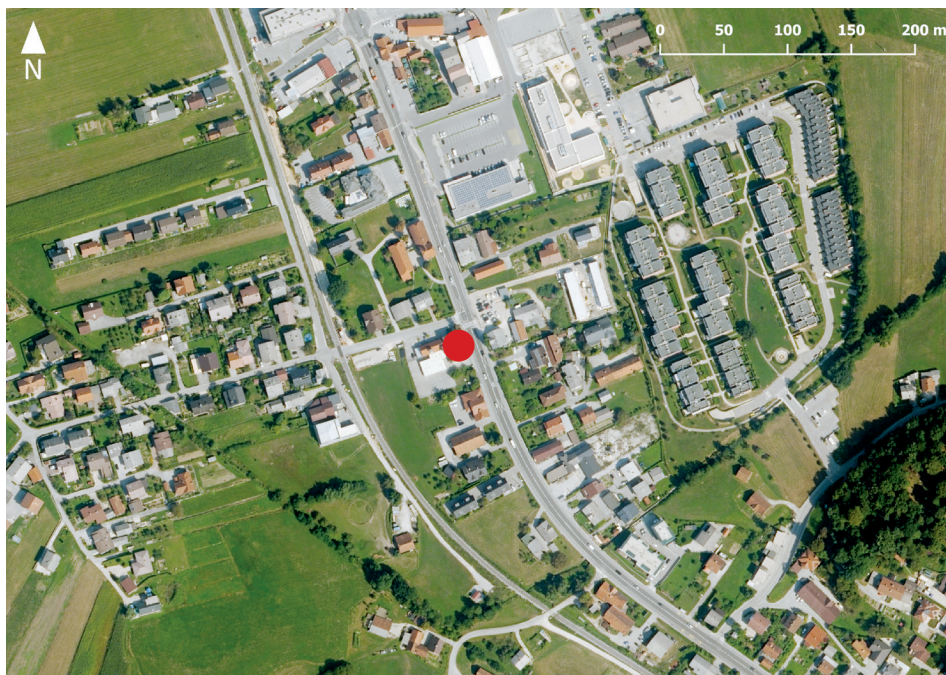
ogljik ima tudi negativen vpliv na podnebje (Bond in sod., 2013; IPCC, 2013). V atmosferi vpliva na sevalne tokove planeta, saj absorbira vidni spekter Sončeve svetlobe in na tak način segreva ozračje, ob tem pa lahko vpliva na pojav in lastnosti oblakov. Odlaganje črnega ogljika na sneg ali led vpliva na absorpcijo Sončeve svetlobe, kar privede do segrevanja ozračja ter pospeši taljenje snežne odeje in ledu (Bond in sod., 2013; Center for Climate ..., 2010; Ramanathan, Carmichael, 2008). Črni ogljik je takoj za ogljikovim dioksidom prepoznan kot drugo najpomembnejše antropogeno onesnaževalo v ozračju z vplivom na podnebne spremembe (Bond in sod., 2013; IPCC, 2013). Glavna vira črnega ogljika v urbanih območjih sta promet in kurjenje biomase za ogrevanje v gospodinjstvih (Ježek, 2015). Na podeželju dosedanje meritve in raziskave kažejo, da h koncentracijam delcev v zraku (med njimi tudi črnega ogljika) v Sloveniji največ prispeva izgorevanje biomase za ogrevanje gospodinjstev (Glojek, Gregorič, Ogrin, 2019). Les je v Sloveniji zelo pomemben energent za ogrevanje gospodinjstev (Gjerek in sod., 2019; Ježek, 2015; Ogrin in sod., 2016), kar potrjuje tudi dejstvo, da je 58 % države pokrite z gozdom (Zavod za gozdove Slovenije, 2019), hkrati pa je kar 76 % gozdov v zasebni lasti (Zavod za gozdove Slovenije, 2020). Raba lesne biomase kot vira toplote je v Sloveniji zakoreninjena že stoletja.

Stacionarne in mobilne meritve črnega ogljika so potekale z Aethalometrom AE33 (Drinovec in sod., 2015). Meritve potekajo s pomočjo meritve atenuacije svetlobe pri različnih valovnih dolžinah, kar omogoča karakterizacijo absorpcije delcev v spektru od ultravijolične do infrardeče. Spektralno odvisnost absorpcije (vpijanjanja) lahko posplošeno opišemo s potenčnim zakonom: $b_{\lambda} = 1 / \lambda^{\alpha}$, kjer je α Ångströmov eksponent (Moosmüller in sod., 2011). S slednjim je mogoče razlikovati med delci črnega ogljika, katerih izvor je izgorevanje lesne biomase, in tistimi, ki nastajajo pri izgorevanju dizelskih goriv. Izpust iz dizelskih motorjev vsebuje velik delež črnega ogljika in ima, dokler je svež, Ångströmov eksponent blizu 1 (enakomerna absorpcija svetlobe skozi celoten vidni valovni spekter) (Schnaiter in sod., 2003). Poleg koncentracij črnega ogljika nam merilnik nudi tudi informacijo o tem, kolikšen delež prispeva promet in kolikšen delež izgorevanje biomase (lesa).

2.2.1 Stacionarne meritve koncentracij črnega ogljika

Aethalometer smo postavili v zaprt prostor nekdanje Osnovne šole Škofljica, da je bila naprava na tak način zavarovana pred zunanji vplivi. Dovod zraka je bil speljan skozi okno, ki je usmerjeno proti Dolenjski cesti, smer Ljubljana–Kočevje. Poleg cevi za zajem zraka smo postavili tudi meteorološki senzor AMES TPR 159, da smo pridobili podatke o temperaturi, relativni vlagi in zračnem tlaku na lokaciji meritev. Meritve so potekale z zajemom podatkov v časovni ločljivosti 1 minute, mesto vzorčenja je bilo na višini 4 m nad tlemi.

Slika 2: Lokacija stacionarnih meritev črnega ogljika in meritev dušikovega dioksida na Lavrici.



Vir kartografske podlage: DOF 2019.

2.2.2 Mobilne meritve koncentracij črnega ogljika

Meritve v Mestni občini Kranj smo izvajali v sedmih dneh v obdobju od 8. 10. do 11. 11. 2019, torej v začetku kurilne sezone. Zaradi toplega vremena ogrevanje stavb ni bilo na ravni prave kurilne sezone. Izvedli smo 16 meritev v različnih delih dneva, tj. zjutraj, popoldne in zvečer:

- med 7^h in 9^h: v času jutranje prometne konice in pogoste temperaturne inverzije,
- med 12^h in 15^h: v času razbremenitve prometnih tokov med obema konicama in najbolj premešanega ozračja,
- med 17^h in 20^h: v času popoldanske prometne konice in začetka ogrevanja ter vzpostavitve temperaturne inverzije.

Mobilne meritve smo izvajali z osebnim avtomobilom. Merilno opremo smo naložili v prtljažnik, cev za zajem zraka smo speljali skozi zadnje okno vozila na desni strani. Dolžina cevi je znašala 2 m, kar pomeni, da je bil časovni zamik meritev manjši od 1 s in ga pri določanju lokacije nismo upoštevali. Zajem podatkov je bil nastavljen

na časovno ločljivost 1 sekunde. Vse merilne naprave so bile priključene na akumulator, kar je omogočilo izvajanje meritev tudi pri ugasnjem motorju. To je pomembno pri meritvah ozadja, kjer vozilo miruje in bi pri obratovanju motorja lahko izmerili lastne izpuhe.

Pri izbiri trase smo bili pozorni, da smo v meritve vključili različne tipe prostora glede na rabo tal (cestni koridor, rezidenčna raba, odprt nepozidan prostor), glede na vire (ceste, naselja s prevladujočim ogrevanjem na zemeljski plin, ekstra lahko kurilno olje ali lesno biomaso in ozadje), glede na reliefne značilnosti površja (doline, ravnine in višje lege) in glede na rabo prostora (mestno središče, nakupovalni centri, šole, bolnice, rekreacijski centri ipd.). V mestu smo v meritve vključili glavne ceste ter stanovanjske dele. Prav tako smo meritve izvajali po cesti na Šmarjetno goro in tako dobili vpogled v koncentracije črnega ogljika nad mestom in nad inverzno plastjo, kadar se pojavi radiacijska inverzija. Posamezna vožnja je trajala približno dve uri. Hitrost vožnje je bila določena z omejitvami in razmerami na cesti. Mobilne meritve so vključevale tudi 15-minutne meritve na lokaciji urbanega ozadja.

3 REZULTATI IN RAZPRAVA

3.1 Prometne obremenitve na Lavrici

Preden pogledamo rezultate meritev onesnaženosti zraka pogledajmo še prometne obremenitve v času meritev. Meritve se nanašajo na dva tedenska cikla, ki sta se v našem primeru začela v torek. Le zadnji trije dnevi (od sobote 26. 10. 2019 do ponedeljka 28. 10. 2019) so bili dnevi jesenskih šolskih počitnic, kar pa, kot je vidno iz primerjave s prejšnjim tednom, praktično ni vplivalo na prometni tok. Tako so imeli počitniška sobota 2,7 %, nedelja 3 % in ponedeljek le 1,2 % nižjo prometno obremenitev od tedna prej. Rezultati meritev prometa so pokazali, da je povprečni dnevni promet znašal 18.017 vozil. Največji delež vseh vozil, ki so peljala mimo števnege mesta, predstavljajo osebna vozila (84,8 %). Delež težkih vozil je znašal 3,5 %.

S povprečnim dnevnim prometom okoli 18.000 vozil sodi ta cestni odsek sicer med bolj obremenjene slovenske cestne odseke, a še zdaleč ne dosega najbolj obremenjenih, kot so deli ljubljanske obvoznice, deli nekaterih vpadnic v večja mesta ali posamezni odseki avtocestnega križa, kjer so obremenitve lahko višje za faktor 2–4. Tudi delež tovornega prometa je nizek, saj tranzitni tovorni promet proti Dolenjski in iz nje potuje po bližnji avtocesti.

Preglednica 2: Prometne obremenitve na Dolenjski cesti skozi Škofljico od 15. 10. 2019 do 28. 10. 2019.

Datum	NV	M	OV	DV	OVP	T	TP	V	AB	Skupaj
15. 10. 2019	885	153	16.584	1.144	200	282	390	128	120	19.886
16. 10. 2019	861	139	15.890	1.066	155	152	365	121	128	18.877
17. 10. 2019	947	181	16.348	1.101	172	180	407	83	134	19.553
18. 10. 2019	960	128	16.883	1.114	209	217	428	117	128	20.184
19. 10. 2019	623	264	14.719	562	151	49	192	19	44	16.623
20. 10. 2019	418	165	11.765	247	66	2	44	5	26	12.738
21. 10. 2019	834	170	15.661	1.102	180	222	499	131	127	18.926
22. 10. 2019	867	207	15.624	1.032	195	167	364	109	145	18.710
23. 10. 2019	888	183	16.325	1.126	174	201	441	114	116	19.568
24. 10. 2019	926	202	16.234	1.137	164	171	454	106	113	19.507
25. 10. 2019	974	189	17.037	1.113	195	247	429	132	128	20.444
26. 10. 2019	656	199	14.251	591	160	44	211	16	47	16.175
27. 10. 2019	389	267	11.291	242	92	8	38	5	20	12.352
28. 10. 2019	848	106	15.384	1.101	210	271	530	128	121	18.699
Delež (%)	4,4	1	84,8	5	0,9	0,9	1,9	0,5	0,6	100

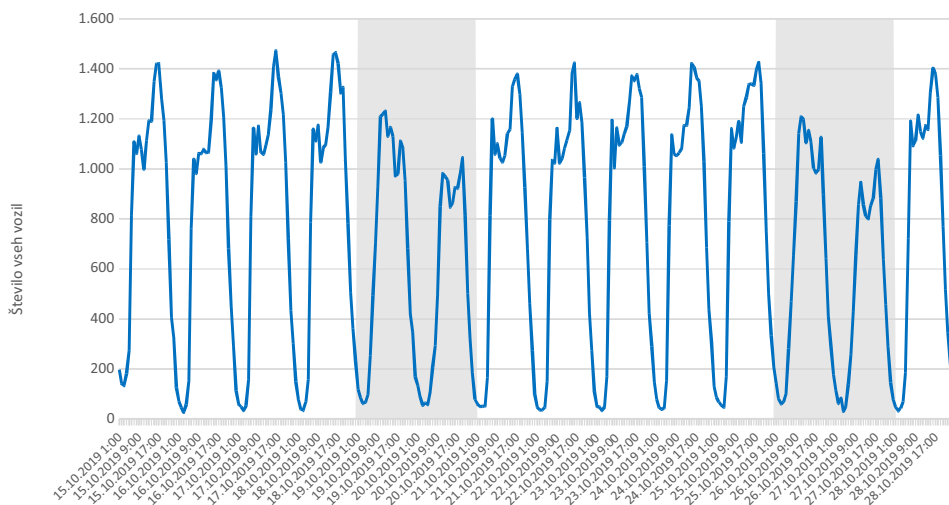
Legenda:

NV: neklasificirana vozila, M: motorji, OV: osebna vozila, DV: dostavna vozila, OVP: osebna vozilo s prikolico, T: tovornjaki, TP: tovornjaki s prikolico, V: vlačilci, AB: avtobusi

Dnevi v tednu: sobota, nedelja.

Vir podatkov: lastne meritve.

Slika 3: Število vozil po dnevih na Dolenjski cesti skozi Škofljico na lokaciji meritev od 15. 10. 2019 do 28. 10. 2019.



Vir podatkov: lastne meritve.

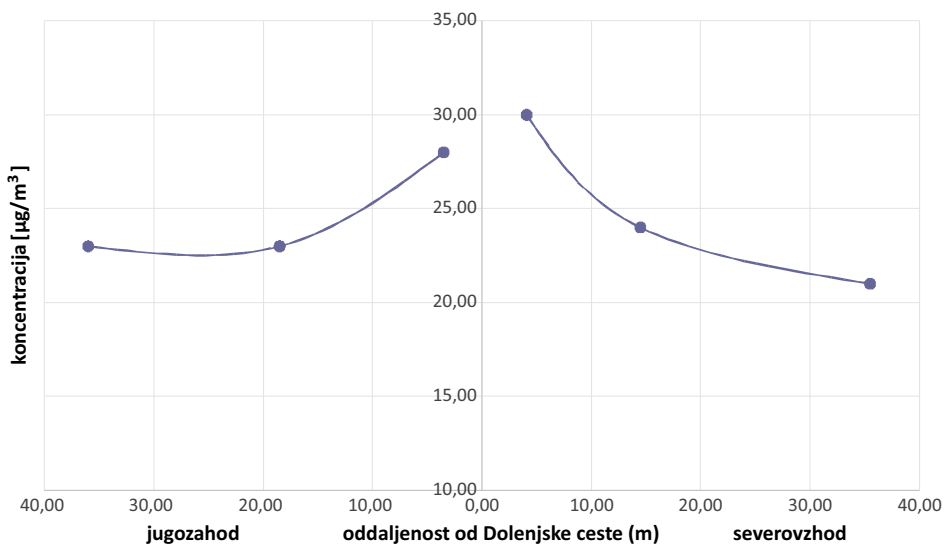
Iz prikaza (slika 3) je razvidno, da ima potek prometne obremenitve obliko dnevne migracijske krivulje med mestom in okolico, kjer je jutranja konica nekoliko manj izrazita kot popoldanska, dopoldanski upad prometa pa je neizrazit. Po drugi strani pa je nočni upad zelo močan, saj obseg prometa pade skoraj na ničlo. Časovni potek prometne obremenitve se ne razlikuje bistveno med različnimi dnevi delavnika, opažna pa je razlika ob koncu tedna.

3.2 Koncentracije dušikovega dioksida na Lavrici

Rezultati meritev dušikovega dioksida pokažejo pričakovan padec koncentracij z oddaljenostjo od ceste, hkrati pa lahko ugotovimo, da so bile v času meritev koncentracije nizke, saj niti cestišču najbližji merilni mesti nista presegli mejne letne povprečne koncentracije ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Padec koncentracij z oddaljenostjo je pričakovan, pri čemer je malce manj izrazit na južni strani ceste, kjer so meritve potekale vzdolž stranske ulice (Vrečarjeva ulica) in ob manjšem parkirišču, kar lahko vpliva na nekoliko manjši padec. Rezultati so v okviru pričakovanj glede na podobne meritve v preteklih letih v Ljubljani ob cestah s podobnimi obremenitvami (npr. Ogrin, 2007; Vintar Mally, Ogrin, 2015). Ugotovljamo, da kljub prevladujoči južni smeri vetrov nad Ljubljano v času meritev ti očitno niso bistveno vplivali na asimetričnost razporeditve koncentracij.

Slika 4: Profil povprečnih koncentracij dušikovega dioksida [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] ob Dolenjski cesti na Lavrici od 15. 10. 2019 do 28. 10. 2019.



Vir podatkov: lastne meritve.

Preglednica 3: Povprečne koncentracije dušikovega dioksida [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] na merilnih mestih ob Dolenjski cesti na Lavrici od 15. 10. 2019 do 28. 10. 2019.

	Škofljica JZ 3	Škofljica JZ 2	Škofljica JZ 1	Škofljica SV 1	Škofljica SV 2	Škofljica SV 3
Razdalja od ceste [m]	36,3	18,5	3,5	4,1	14,5	35,5
Koncentracija [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	23	23	28	30	24	21

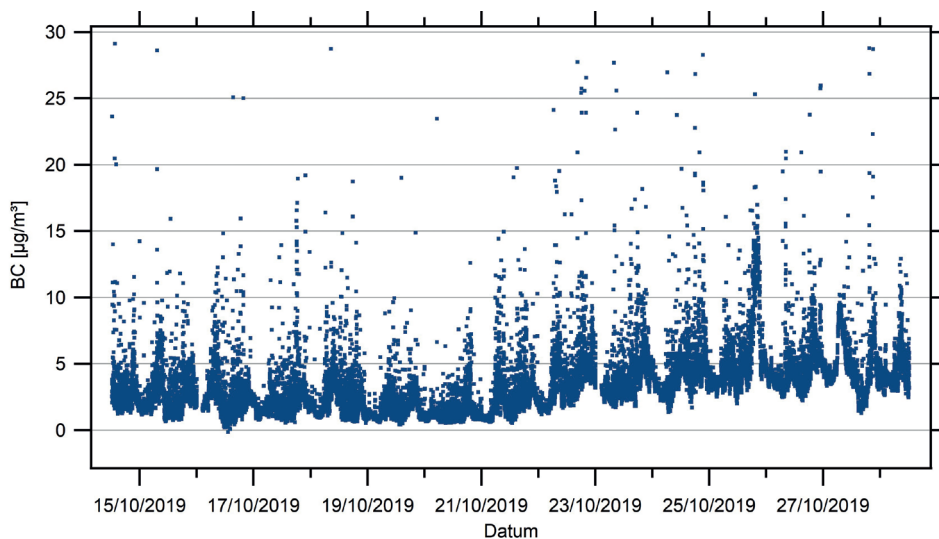
Vir podatkov: lastne meritve.

Ponovitev meritev pozimi, spomladi in poleti ter meritve ozadja lahko bistveno pripomorejo k ugotovitvi vpliva ceste na onesnaženost zraka z dušikovim dioksidom na Škofljici in Lavrici na letni ravni. Hkrati bi bilo zelo koristno opravljati tudi sočasne meritve vetra na lokaciji meritev. Vseeno pa kaže, da vpliv ceste na onesnaženost z dušikovim dioksidom v času meritev ni prekomeren.

3.3 Koncentracije črnega ogljika na Lavrici

Na izmerjene koncentracije črnega ogljika je pomembno vplivalo obdobje meritev, tj. jesenski čas, saj se je že začela kurilna sezona, ki zaradi toplega in v prvem tednu pogosto vetrovnega vremena ni bila izrazita. V Ljubljani je bila v obdobju meritev povprečna temperatura zraka 14,9 °C, kar je v povprečju bolj značilno za konec septembra kot za konec oktobra. Zaradi pogosto vetrovnega in sončnega vremena so bile vremenske razmere za širjenje in redčenje onesnaževal v zraku razmeroma ugodne. Meritve koncentracij črnega ogljika so pokazale, da so na razdalji 4 m od ceste v obdobju meritev povprečne koncentracije znašale $3,6 \pm 3,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Standardni odklon je velik, kar je značilno za takšno obcestno lokacijo, kjer se koncentracije zelo hitro spreminjajo. Spreminjanje vrednosti koncentracij v obdobju meritev je pokazalo na pomemben vpliv vremenskih razmer. Koncentracije so bile v drugem tednu meritev, ko je prevladoval anticiklonalni tip vremena in se je pojavljala jutranja temperaturna inverzija v Ljubljanski kotlini, povišane. Mešanje in redčenje črnega ogljika v zraku je bilo tedaj slabše.

Slika 5: Časovni potek minutnih koncentracij [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] črnega ogljika na Lavrici v obdobju od 14. do 28. 10. 2019.

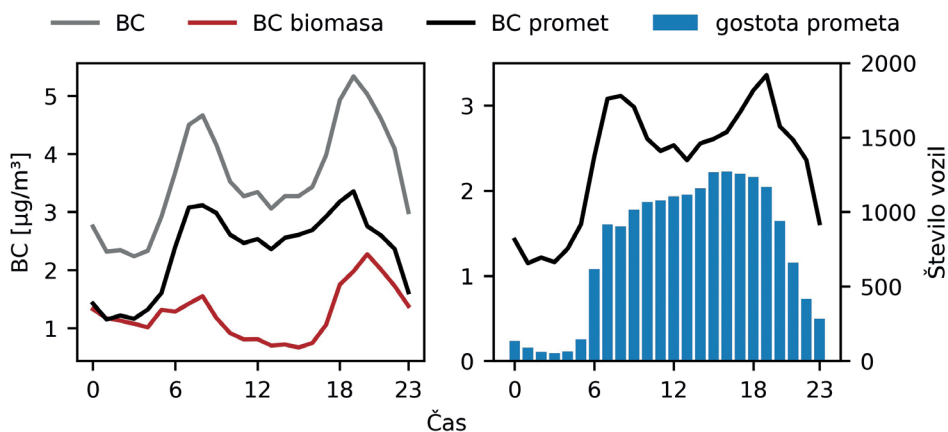


Vir podatkov: lastne meritve.

Nižje temperature, ki so bile zabeležene v drugem tednu meritev, so povzročile tudi rahlo povečano potrebo po ogrevanju v gospodinjstvih. Z opredelitvijo vira emisij črnega ogljika smo ugotovili, da je povečana potreba po ogrevanju na lesno biomaso pomembno prispevala k povečanim koncentracijam črnega ogljika.

Vrednost Ångströmovega eksponenta je za celotno obdobje meritev znašala 1,3, kar kaže na prevlado izpustov iz prometa in je glede na lokacijo meritev pričakovano. V obdobju meritev je 64 % črnega ogljika nastalo z izpusti iz prometa, 36 % pa zaradi izgorevanja biomase. Oba prispevka sta se tekom dneva spreminjala. Pri prometu smo opazili jutranji vrh (med 6. in 8. uro) in večerni vrh (med 16. in 20. uro), ki deloma sovpadata z jutranjo in povsem z večerno prometno konico. Koncentracije so v času jutranje konice znašale med 4 in 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, v času večerne pa malo nad 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Glavni razlog za višje koncentracije v času večernega vrha je v večjem prispevku ogrevanja na biomaso v gospodinjstvih. Maksimalne koncentracije črnega ogljika, nastale zaradi izgorevanja biomase, se zvečer pojavijo okoli dve uri kasneje kot maksimalne koncentracije, nastale iz prometa.

Slika 6: Povprečni dnevni potek koncentracij ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) črnega ogljika (BC) ter prispevka prometa (BC promet) in izgorevanja biomase (BC biomasa) (levo) ter primerjava povprečnega dnevnega poteka koncentracij črnega ogljika iz prometa (BC promet) in števila vozil (gostota prometa) (desno) na lokaciji Lavrica pri OŠ Škofljica.



Vir podatkov: lastne meritve.

Črni ogljik iz virov, ki uporabljajo biomaso, predstavlja manjši del, kar je še posebej vidno v jutranjem času (slika 6). Popoldansko-večerni višek je pri obeh virih bolj izrazit od jutranjega, bolj pa se poveča delež biomase. Desni del slike 6 kaže povezavo med prometnimi obremenitvami in koncentracijami črnega ogljika zaradi prometa. Jutranjemu porastu prometnih obremenitev sprva hitro sledi tudi koncentracija črnega ogljika, ki pa doseže višek okoli 7. ure. Medtem ko prometne obremenitve naraščajo tekom celega dopoldneva, koncentracije črnega ogljika padejo za skoraj 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Razlog za nižje koncentracije črnega ogljika sredi dneva je večje mešanje atmosfere in s tem povezano redčenje. Jutranji višek koncentracij povezujemo z jutranjo

temperaturno inverzijo. Dodati je treba, da se slika 6 nanaša na vse dni in upošteva tudi sobote in nedelje, ko je potek dnevnih konic manj izrazit, prometa pa je manj.

Rezultati meritev so pokazali, da so povprečne koncentracije na izbrani lokaciji med tednom višje kot med vikendi. V obdobju meritev so bile celokupne koncentracije črnega ogljika ob koncu tedna v povprečju manjše za $0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Razlog je manjša gostota prometa ob koncih tedna, ko ljudje praviloma ne delajo, na kar kaže zmanjšanje koncentracij črnega ogljika iz prometa za $0,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. So se pa ob koncih tedna povečale koncentracije črnega ogljika, nastalega z izgorevanjem biomase, in sicer za $0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ob koncu tedna so ljudje namreč več doma in so potrebe po ogrevanju gospodinjstev večje, vendar zaradi toplega vremena to še ni bilo izrazito. Če meritev ne bi izvajali v času kurilne sezone, bi bil upad koncentracij črnega ogljika ob koncu tedna večji. Takšna slika je bila ugotovljena tudi za druge mestne prometne lokacije (npr. Ogrin in sod., 2014; Ogrin in sod., 2016). Povprečne koncentracije črnega ogljika so bile v času meritev primerljive s koncentracijami, izmerjenimi na lokaciji mestnega ozadja v Ljubljani v zimi 2013/2014 (Ogrin in sod., 2016). So pa koncentracije precej nižje od povprečnih koncentracij v središču Ljubljane ($6,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na Vošnjakovi in $4,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pri glavni pošti).

3.4 Mobilne meritve koncentracij črnega ogljika v Mestni občini Kranj

Mobilne meritve koncentracij črnega ogljika v Mestni občini Kranj so bile izvedene v oktobru in novembru 2019, ko je že potekala kurilna sezona, a je bilo vreme toplo in ogrevanje manj intenzivno kot običajno v tem času ali pozimi. Izvedenih je bilo 16 meritev v različnih delih dneva.

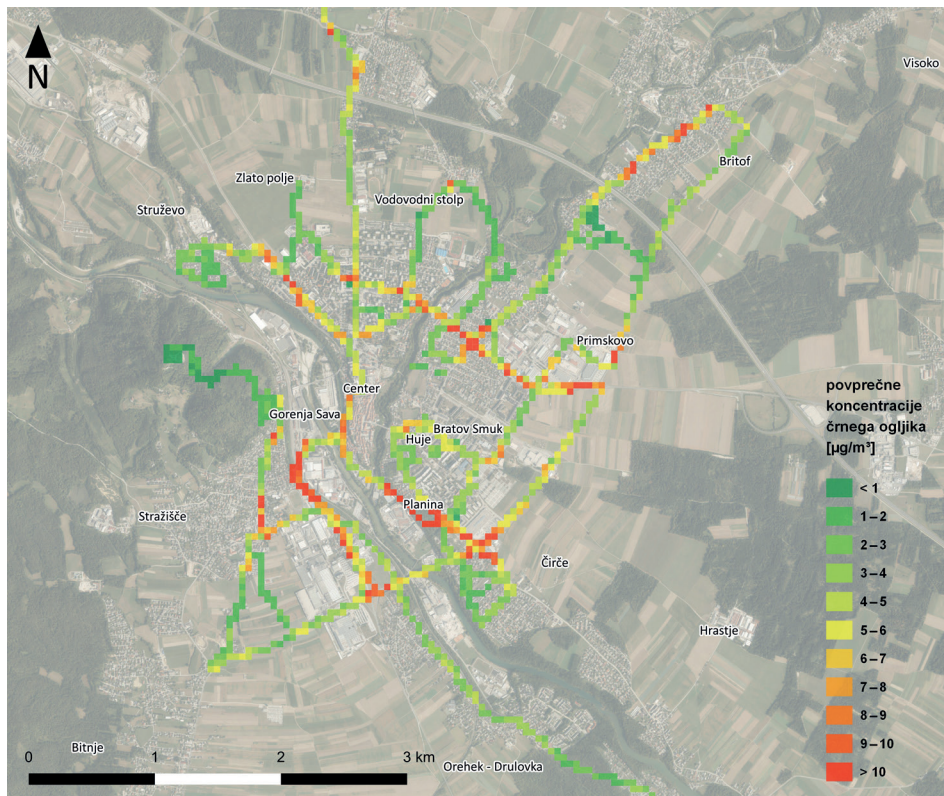
Preglednica 4: Pregled mobilnih meritev črnega ogljika od 8. 10. 2019 do 11. 11. 2019 v Mestni občini Kranj.

Datum	Ura začetka	Mediana [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Povprečje [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Maksimum [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Ozadje [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	T [$^{\circ}\text{C}$]	Lokalni prispevek	Delež ogrevanja
8. 10.	08.00	2,9	4,9	107	0,8	7°	85 %	30 %
8. 10.	13.00	1,5	3,4	194	0,9	15°	75 %	20 %
9. 10.	07.40	2,6	5,0	84	1,9	10°	60 %	25 %
9. 10.	13.25	3,4	5,6	36	1,0	15°	80 %	25 %
10. 10.	13.05	1,7	3,8	77	0,5	14°	85 %	20 %
10. 10.	18.50	3,0	5,0	129	1,6	13°	70 %	30 %
11. 10.	12.40	2,1	5,2	245	0,8	11°	85 %	20 %
7. 11.	09.00	2,9	4,2	78	0,5	10°	90 %	25 %
7. 11.	14.00	1,1	2,4	82	0,6	13°	80 %	25 %
7. 11.	19.30	5,2	7,3	647	0,6	4°	90 %	40 %
9. 11.	08.45	2,5	4,6	134	1,1	9°	75 %	30 %
9. 11.	14.00	1,3	2,9	88	0,5	11°	85 %	25 %
9. 11.	19.40	1,9	2,9	44	0,6	3°	80 %	45 %
11. 11.	08.45	3,9	5,1	103	2,0	5°	60 %	40 %
11. 11.	13.40	1,8	3,4	83	1,0	7°	70 %	35 %
11. 11.	20.10	3,6	6,1	168	0,9	6°	85 %	40 %

Vir podatkov: lastne meritve.

Koncentracije črnega ogljika so se med posameznimi meritvami spreminjale. Povprečne koncentracije izvedenih meritev so znašale $4,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zjutraj, $3,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sredi dneva in $5,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zvečer. Najvišje koncentracije smo izmerili zvečer in zjutraj. Razlog za to sta jutranja in večerna prometna konica ter močnejše mešanje atmosfere sredi dneva. K nastanku višjih koncentracij črnega ogljika iz prometa lahko privedejo tudi izredni dogodki, kot so prometne nesreče, zastoji in cestne zapore. V večernem času je pomembno prispevalo tudi ogrevanje na lesno biomaso. V istem časovnem obdobju so bile vrednosti urbanega ozadja $1,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zjutraj, $0,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sredi dneva in $0,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zvečer. Meritve urbanega ozadja so pokazale, da je okoli 80 % koncentracij črnega ogljika lokalnega izvora. H koncentracijam iz lokalnih virov na cesti je v času meritev od 60 % do 80 % prispeval promet, kar pomeni, da je od 20 % do 40 % prispevalo ogrevanje na biomaso.

Slika 7: Povprečne koncentracije črnega ogljika [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] na izbrani trasi cest v času meritev v oktobru in novembru 2019 v Kranju.



Vir kartografske podlage: DOF 2019. Vir podatkov: lastne meritve.

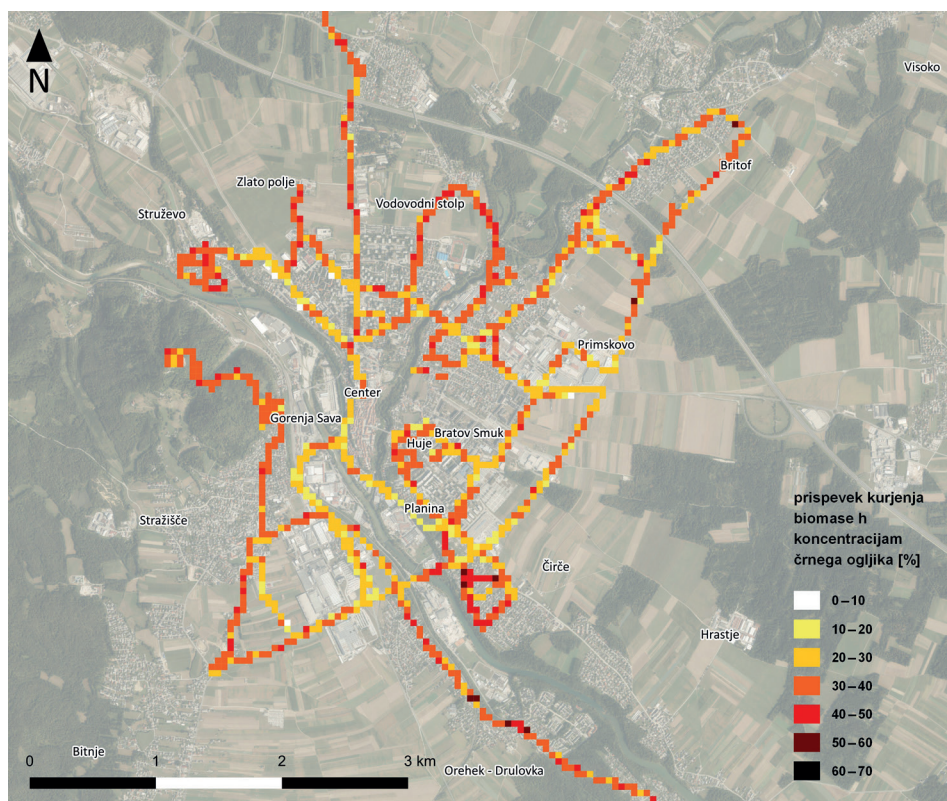
Kadar nas zanima izpostavljenost prebivalstva črnemu ogljiku v zunanjem zraku, vzamemo povprečne koncentracije vseh meritev (slika 7), saj tako zajamemo vsa časovna obdobja, to je obdobja povišanih koncentracij zjutraj in zvečer ter obdobje nizkih koncentracij sredi dneva.

Najbolj obremenjena območja presežejo koncentracije $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (slika 7), kar je 5–10 krat več od urbanega ozadja. To so območja ob glavnih cestnih povezavah: Ljubljanska cesta, Savska cesta, Cesta 1. maja, Cesta Staneta Žagarja, Kidričeva cesta, Oldhamska cesta, Stara cesta, cesta proti Naklem in vzhodna obvoznica (Primskovo–Kranj). V stanovanjskih delih so povprečne koncentracije okrog $2,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Najnižje izmerjene povprečne koncentracije so bile okrog $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Medtem ko ima promet značilen dnevni potek, ki je odvisen predvsem od tega, ali gre za delavnik ali vikend, na ogrevanje stavb poleg dela tedna vplivajo tudi vremenske

razmere. Prispevek ogrevanja na biomaso h koncentracijam črnega ogljika je bil zaradi višje temperature čez dan in dejstva, da je velik delež prebivalcev tedaj zdoma, višji zvečer kot sredi dneva. Sredi dneva smo izmerili posamezna lokalna povišanja, ki so najverjetneje posledica individualnih kurišč. Prispevek ogrevanja na biomaso je v naseljih zaradi manjšega prispevka prometa večji kot ob prometnicah.

Slika 8: Povprečen delež prispevka ogrevanja z biomaso (%) h koncentracijam črnega ogljika v Kranju v času meritev v oktobru in novembru 2019.



Vir kartografske podlage: DOF 2019. Vir podatkov: lastne meritve.

Slika 8 pokaže različen delež biomase pri onesnaževanju s črnim ogljikom v Kranju. Visok biomasni delež še ne pomeni slabe kakovosti zraka, pač pa nakaže le majhen vpliv prometnega onesnaževanja na koncentracije črnega ogljika. Pri tem je treba poudariti, da so meritve potekale na cesti, kar pomeni, da nikjer v okolici merilne točke prečno na smer gibanja (levo in desno od ceste) prispevek (in tudi delež) prometnega

onesnaževanja s črnim ogljikom ni bil večji, saj je vpliv prometnega onesnaževanja največji ravno na cestišču. Drugače povedano, če je na neki cesti izmerjen visok delež virov ogrevanja in nizek delež prometnih virov, je nekaj deset metrov stran od ceste, npr. na vrtovih ali ulicah, prispevek ogrevanja še večji. Vidimo, da se visok delež biomase pojavi tam, kjer so bile izmerjene nizke koncentracije črnega ogljika v območjih nizkih prometnih obremenitev na obrobju Kranja, npr. vzdolž Partizanske ceste mimo Rupe na Cesto Kokrškega odreda, v Čirčah in vzdolž Stanetove ceste, v Struževem ter na Stražiškem polju. Potek območij z visokim deležem kurjenja biomase v času naših meritev praviloma ni sledil območjem z visokimi koncentracijami črnega ogljika.

Vedeti moramo, da bi bile poleti, ko individualna kurišča na biomaso ne obratujejo (razen ponekod za ogrevanje sanitarne vode), povprečne koncentracije črnega ogljika nižje od teh, ki smo jih izmerili jeseni, saj bi bil delež onesnaženja z biomaso v urbanem okolju zanemarljiv. To bi se najbolj poznalo na območjih, kjer je bil sedaj delež biomase visok, hkrati pa so bile tudi povišane koncentracije črnega ogljika. Pozimi, ko so temperature nižje kot so bile v času meritev, bi bile koncentracije višje, saj so takrat potrebe po ogrevanju večje. Kjer je delež virov iz biomase večji, se bo pozimi kakovost zraka poslabšala. Spomladi bi bile koncentracije predvidoma primerljive z jesenskimi, saj so potrebe po ogrevanju podobne. Glede na izmerjene koncentracije črnega ogljika za gosteje poseljena območja mesta Kranj lahko ugotovimo, da so te tipične za urbana okolja.

4 SKLEP

Ker je območje Lavrice obremenjeno z dnevnimi zastoji, so že dlje časa prisotne ideje o razbremenitvi prometa po Dolenjski cesti z obvozno cesto. Ne glede na končno odločitev prometne politike nam ta raziskava nakazuje, da prometno obremenjevanje niti ob cesti ne presega dovoljenih vrednosti dušikovega dioksida, višina koncentracij črnega ogljika pa je prav tako na ravni suburbanega ozadja. Vpliv prometnega onesnaževanja z oddaljenostjo od ceste hitro pada. Po našem mnenju je namesto novih obvoznih cest smiselno razmisliti o ukrepih umirjanja prometa in krepitvi javnega potniškega prometa, ki lahko prevzame pomemben delež dnevnih migrantov iz Kočevsko-Ribniškega območja, ki danes po Dolenjski cesti dnevno prihajajo v Ljubljano. Zanimiva bi bila ideja uvedbe reverzibilnega voznega pasu. Gre za ukrep, da bi se v času povečanega prometnega povpraševanja (npr. zjutraj) v eno smer vzpostavila dva vozna pasova, v obratni smeri pa bi bil le eden. Ko se popoldne prometni tokovi obrnejo, bi bila dva vozna pasova v drugo smer. Vsako nadaljnje širjenje prometnih površin Dolenjske ceste bi povečevalo prometne tokove in povečalo prometno onesnaževanje. Obvozna cesta bi sicer razbremenila Dolenjsko cesto, hkrati pa prenesla prometne obremenitve na nov odsek. Denar, ki se prihrani ob opustitvi cestnih novogradenj, se lahko modro vloži v sisteme trajnostne mobilnosti.

Z mobilnimi meritvami v Kranju jeseni 2019 smo določili koncentracije črnega ogljika na 100 m natančno. V stanovanjskih delih so bile povprečne koncentracije črnega ogljika okrog $2,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Najnižje izmerjene povprečne koncentracije so bile okrog $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Na najbolj obremenjenih območjih ob glavnih cestnih povezavah so povprečne koncentracije presegle $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, kar je 5–10-krat več od urbanega ozadja. Najbolj obremenjene so bile Ljubljanska cesta, Savska cesta, Cesta 1. maja, Cesta Staneta Žagarja, Kidričeva cesta, Oldhamska cesta, Stara cesta, cesta proti Naklem in vzhodna obvoznica (Primskovo–Kranj).

Z izjemo OŠ Simon Jenko se kranjski vrtci in osnovne šole nahajajo ob relativno obremenjenih cestah. Ob vrtcih Čenča ($2,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Čebelica ($3,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) in Mojca ($3,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) so bile koncentracije črnega ogljika le nekoliko nad povprečnimi vrednostmi v stanovanjskih delih ($2,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Ob vrtcih Kekec ($4,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) in Čira čara ($4,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) so znatno povišane, medtem ko so bile koncentracije na cesti ob OŠ Franceta Prešerna ($6,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) že skoraj kritične.

Predvsem izogibanje predelom največjega onesnaženja je nekaj, kar lahko vsak posameznik stori sam zase. Sem spada izogibanje bližini cest ob prometnih konicah, ko so koncentracije v povprečju za faktor 2 višje kot sredi dneva, v kratkih časovnih obdobjih pa so višje celo za faktor 100. Pešci naj izberejo pot po manjših ulicah namesto glavnih prometnic. Avtomobilska okna naj bodo zaprta, kadar se promet ne premika. V primeru šol in vrtcev je priporočljivo zadrževanje na strani zgradb stran od prometnih cest. Zadrževanje na prostem ni priporočljivo v času povišanih koncentracij (zlasti pozimi med temperaturno inverzijo). To velja predvsem za izvajanje športnih dejavnosti.

Na podlagi stacionarnih meritev na Lavrici in mobilnih meritev v Kranju lahko sklenemo, da so prve bolj primerne za ugotavljanje stanja v gosti mreži meritev na manjšem območju ali pa za neko splošno sliko kakovosti zraka na širšem območju, če meritve potekajo na reprezentativnem mestu. Mobilne meritve nam pokažejo trenutno stanje onesnaženosti na širšem območju in so primerne za identifikacijo obremenjenih območij, iskanje močnejših lokalnih virov ter ugotavljanje prometnega vpliva na onesnaževanje zraka vzdolž prometne infrastrukture. Predstavljajo pa tudi ustrežnejši pristop pri ugotavljanju osebne izpostavljenosti onesnaževalom, saj je ta povezana z njihovo prostorsko razporeditvijo. Seveda je v primeru celovitih raziskav kakovosti zraka nujno združiti obe metodi.

Pomembna informacija: Meritve koncentracij črnega ogljika so se izvedle v okviru projekta Energetska platforma za pametna mesta – Kakovost zraka (akronim projekta: SC-EP-air quality), ki se izvaja v okviru mednarodnega raziskovalno-razvojnega projekta EUREKA. Projekt sofinancirata Republika Slovenija in Evropska unija iz Evropskega sklada za regionalni razvoj.

Zahvala

Avtorji se zahvaljujemo Občini Škofljica, ki je priskrbela zaprt prostor za postavitve Aethalometra AE33 in pripadajoče opreme. Zahvaljujemo se tudi Ministrstvu za okolje in prostor, ki nam je posredovalo podatke iz Evidence malih kurilnih naprav za območje občine Škofljica in Mestne občine Kranj.

Literatura in viri

- Air quality in Europe, 2007. Vpliv na zdravje. URL: https://www.airqualitynow.eu/sl/pollution_health_effects.php (citirano 9. 9. 2020).
- 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., Zender, C. S., 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical research: Atmospheres*, 118, str. 5380–5552. DOI: 10.1002/jgrd.50171.
- Center for Climate and Energy Solutions, 2010. What is black carbon? URL: <https://www.c2es.org/document/what-is-black-carbon/> (citirano 5. 7. 2020).
- DOF 2019. 2019. Ljubljana: Geodetska uprava Republike Slovenije.
- Drinovec, L., Močnik, G., Zotter, P., Prévôt, A. S. H., Ruckstuhl, C., Coz, E., Rupakheti, M., Sciare, J., Müller, T., Wiedensohler, A., Hansen, A. D. A., 2015. The »dual-spot« Aethalometer: an improved measurement of aerosol black carbon with real-time loading compensation. *Atmospheric measurement techniques*, 8, str. 1965–1976. DOI: 10.5194/amt-8-1965-2015.
- European Commission, 2020. Road safety: Europe's roads are getting safer but progress remains too slow. URL: https://ec.europa.eu/transport/media/news/2020-06-11-road-safety-statistics-2019_sl (citirano 21. 9. 2020).
- European Environmental Agency, 2013. Status of black carbon monitoring in ambient air in Europe, Technical report. Luxembourg: Publications Office of the European Union. DOI: 10.2800/10150.
- Gjerek, M., Koleša, T., Logar, M., Matavž, L., Murovec, M., Rus, M., Žabkar, R., 2019. Kakovost zraka v Sloveniji v letu 2018. Letno poročilo. Ljubljana: Agencija Republike Slovenije za okolje. URL: http://www.arso.gov.si/zrak/kakovost%20zraka/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/Letno_Porocilo_2018.pdf (citirano 21. 9. 2020).
- Glojek, K., Gregorič, A., Ogrin, M., 2019. Onesnaženost zraka s črnim ogljikom—študija primera iz Loškega Potoka. *Dela*, 50, str. 5–23. DOI: 10.4312/dela.50.5-43.
- Grahame, T. J., Klemm, R., Schlesinger, R. B., 2014. Public health and components of particulate matter: The changing assessment of black carbon. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 64, 6, str. 620–660. DOI: 10.1080/10962247.2014.912692.

- Health effects of black carbon. 2012. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.
- Invernizzi, G., Ruprecht, A., Mazza, R., De Marco, C., Močnik, G., Sioutas, C., Westerdahl, D., 2011. Measurements of black carbon concentrations as an indicator of air quality benefits of traffic restriction policies within the ecopass zone in Milan, Italy. *Atmospheric Environment*, 45, str. 3522–3527. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.04.008.
- IPCC, 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. Cambridge, New York: Cambridge University Press. URL: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf (citirano 7. 8. 2019).
- Janssen, N., Gerlofs-Nijland, M., Lanki, T., Salonen, R., Cassee, F., Hoek, G., Fischer, P., Brunekreef, B., Krzyzanowski, M., 2012. Health effects of black carbon. Geneva: World Health Organisation. URL: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0004/16_2535/e96541.pdf (citirano 20. 9. 2020).
- Jarjour, S., Jerrett, M., Westerdahl, D., Nazelle, A., Hanning, C., Daly, L., Lipsitt, J., Balme, J., 2013. Cyclist route choice, traffic-related air pollution, and lung function: a scripted exposure study. *Environmental Health*, 12, 14, 12 str. DOI: 10.1186/1476-069X-12-14.
- Jereb, B., Batkovič, T., Herman, L., Šipek, G., Kovše, Š., Gregorič, A., Močnik, G., 2018. Exposure to black carbon during bicycle commuting—alternative route selection. *Atmosphere*, 9, 21, 12 str. DOI: 10.3390/atmos9010021.
- Ježek, I., 2015. Contribution of traffic and biomass burning to air pollution discriminated with Aethalometer measurements of black carbon. Doctoral thesis. Ljubljana: University of Ljubljana, Faculty of Mathematics and Physics, Department of Physics.
- Ježek, I., Blond, N., Skupinski, G., Močnik, G., 2018. The traffic emission-dispersion model for a Central-European city agrees with measured black carbon apportioned to traffic. *Atmospheric Environment*, 184, str. 177–190. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.04.028.
- Kumar, S., 2002. How is NOx Formed, 2020. URL: <http://cleanboiler.org/workshop/how-is-nox-formed/> (citirano 8. 11. 2020).
- Zavod za gozdove Slovenije, 2020. Lastništvo gozdov. URL: http://www.zgs.si/gozdovi-slovenije/o_gozdovih_slovenije/lastnistvo_gozdov/index.html (citirano 6. 7. 2020).
- Messier, K. P., Chambliss, S. E., Gani, S., Alvarez, R., Brauer, M., Choi, J. J., Hamburg, S. P., Kerckhoffs, J., LaFranchi, B., Lunden, M. M., Marshall, J. D., Portier C. J., Roy, A., Szpiro, A. A., Vermeulen, R. C. H., Apte, J. S., 2018. Mapping air pollution with Google Street View cars: Efficient approaches with mobile monitoring and land use regression. *Environmental Science & Technology*, 52, str. 12563–12572. DOI: 10.1021/acs.est.8b03395.
- 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, str. 1217–1225. DOI: 10.5194/acp-11-1217-2011.
- Mortality and burden of disease from ambient air pollution. 2020. Global Health Observatory (GHO) data. World Health Organisation. URL: https://www.who.int/gho/phe/outdoor_air_pollution/burden/en/ (citirano 9. 9. 2020).
- Ogrin, M., 2007. Air pollution due to road traffic in Ljubljana. *Dela*, 27, str. 199–214. DOI: 10.4312/dela.27.11.199-214.
- Ogrin, M., 2008. Prometno onesnaževanje ozračja z dušikovim dioksidom v Ljubljani. Ljubljana: Znanstvena založba Filozofske fakultete, Oddelek za geografijo.
- Ogrin, M, Vintar Mally, K., Planinšek, A., Močnik, G., Drinovec, L., Gregorič, A., Iskra, I., 2014. Onesnaženost zraka v Ljubljani. Ljubljana: Znanstvena založba Filozofske fakultete Univerze v Ljubljani.
- Ogrin, M., Vintar Mally, K., Planinšek, A., Gregorič, A., Drinovec, L., Močnik, G., 2016. Nitrogen dioxide and black carbon concentrations in Ljubljana. Ljubljana: Znanstvena založba Filozofske fakultete Univerze v Ljubljani.
- Palmes, E. D., Gunnison, A. F., Di Mattio, J., Tomaczyk, C., 1976. Personal sampler for nitrogen dioxide. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 37, 10, str. 570–577.
- Petzold, A., Ogren, A., Fiebig, M., Laj, P., Li, S. M., Baltensperger, U., Holzer-Popp, T., Kinne, S., Pappalardo, G., Sugimoto, N., Wehrli, C., Wiedensohler, A., Zhang, X. Y., 2013. Recommendations for reporting »black carbon« measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, str. 8365–8379. DOI: 10.5194/acp-13-8365-2013.
- Ramanathan, V., Carmichael, G., 2008. Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature Geoscience*, 1, str. 221–227.
- Schnaiter, M., Horvath, H., Möhler, O., Naumann, K.-H., Saathoff, H., Schöck, O. W., 2003. UV-VIS-NIR spectral optical properties of soot and soot-containing aerosols. *Journal of Aerosol Science*, 34, str. 1421–1444. DOI: 10.1016/S0021-8502(03)00361-6.
- Zavod za gozdove Slovenije, 2019. Slovenski gozd v številkah. Poročilo ZGS o gozdovih Slovenije za leto 2018. URL: http://www.zgs.si/gozdovi_slovenije/o_gozdovih_slovenije/slovenski_gozd_v_stevilkah_2019/index.html (citirano 9. 9. 2020).
- Tiwari, S., Srivastava, A. K., Bisht, D. S., Parmita, P., Srivastava, M. K., Attri, S. D., 2013. Diurnal and seasonal variations of black carbon and PM_{2,5} over New Delhi, India: Influence of meteorology. *Atmospheric Research*, 125–126, str. 50–62. DOI: 10.1016/j.atmosres.2013.01.011.
- Understanding air pollution in Oakland. 2020. Environmental Defense Fund. URL: <https://www.edf.org/airqualitymaps/oakland> (citirano 6. 7. 2020).
- Urban population. 2020. The World Bank data. URL: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS> (citirano 9. 9. 2020).
- Vintar Mally, K., Ogrin, M., 2015. Spatial variations in nitrogen dioxide concentrations in urban Ljubljana, Slovenia. *Moravian Geographical Reports*, 23, 3, str. 27–35. DOI: 10.1515/mgr-2015-0015.

- WHO air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. 2006. World Health Organisation. URL: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69477/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf (citirano 9. 9. 2020).
- Zotter, P., Herich, H., Gysel, M., El-Haddad, I., Zhang, Y., Močnik, G., Hüglin, C., Baltensperger, U., Szidat, S., Prévôt, A. S. H., 2017. Evaluation of the absorption Ångström exponents for traffic and woodburning in the Aethalometer-based source apportionment using radiocarbon measurements of ambient aerosol. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, str. 4229–4249. URL: [10.5194/acp-17-4229-2017](https://doi.org/10.5194/acp-17-4229-2017) (citirano 10. 5. 2018).