

Naslov članka/Article:

MERJENJE KONCENTRACIJ ČRNEGA OGLJIKA IN DOLOČANJE NJEGOVH VIROV V OKOLICI TREH OSNOVNIH ŠOL – UVOD V PROJEKTNO UČENJE

Black Carbon Measurements and Its Source Apportionment in the Vicinity of Three Primary Schools – an Introduction to Project-Based Learning

Avtor/Author:

dr. Martin Rigler, Matija Martinec, Tanja Vičič

CC licenca



Priznanje avtorstva-Nekomercialno-Brez predelav



Fizika v šoli št. 2/2021, letnik 26

ISSN 1318-6388

Izdal in založil: Zavod Republike Slovenije za šolstvo

Kraj in leto izdaje: Ljubljana, 2021

Spletna stran revije:

<https://www.zrss.si/strokovne-revije/fizika-v-soli/>

Merjenje koncentracij črnega ogljika in določanje njegovih virov v okolici treh osnovnih šol – uvod v projektno učenje

dr. Martin Rigler,¹ Matija Martinec,² Tanja Vičič²

¹ Aerosol d. o. o., Ljubljana

² Osnovna šola Brinje Grosuplje

Izvleček

V prispevku predstavljamo enostavno terensko kampanjo merjenja koncentracij črnega ogljika v okolici osnovnih šol, ki služi kot uvod v projektno učenje za otroke 5. razreda. S kombinacijo delavnice o onesnaženosti zraka, 14-dnevne merilne kampanje ter končne skupne predstavitve in analize rezultatov smo učence aktivno vključili v učni proces, krepili zavedanje o pomembnosti sodelovalnega učenja ter razvijali njihovo lastno zavzetost za učenje ob raziskovanju problemov resničnega sveta.

Ključne besede: terenska kampanja, črni ogljik, onesnaženje zraka, projektno učenje

Black Carbon Measurements and Its Source Apportionment in the Vicinity of Three Primary Schools – an Introduction to Project-Based Learning

Abstract

The paper presents a simplified field campaign for black carbon concentration measurements in the vicinity of primary schools, which serves as an introduction to project-based learning for Year 5 primary school pupils. Through a combination of an air pollution workshop, a 14-day measurement campaign, and a final presentation and analysis of results, we actively involved students in the learning process, raised awareness of the importance of collaborative learning, and developed their commitment to real-world research.

Keywords: field campaign, black carbon, air pollution, project-based learning

Uvod

Onesnaženje zraka s trdnimi delci

Trdni delci (ang. *particulate matter* – PM) v zraku negativno vplivajo na zdravje ljudi, hkrati pa s sipanjem in absorpcijo sončne svetlobe neposredno učinkujejo na Zemljino sevalno ravnovesje [1], [2] ter s svojo prisotnostjo posredno tudi na tvorbo oblakov in s tem na razporeditev padavin [3]. Slabo kakovost zunanjega zraka, povezano z visokimi koncentracijami trdnih delcev v zraku, je Svetovna zdravstvena organizacija (ang. *World Health Organization* – WHO) poleg visokega krvnega tlaka, kajenja, sladkorne bolezni in čezmerne teže prepoznala kot enega od petih največjih tveganj za zdravje ljudi [4]. V primerjavi s preostalimi štirimi tveganji je kakovost zunanjega zraka dejavnik, na katerega posameznik nima neposrednega vpliva in ga je mogoče omiliti le s skupnimi prizadevanji celotne družbe.

Po podatkih WHO je močno onesnažen zrak leta 2012 zahteval več kot 480 000 prezgodnjih smrti v Evropi in več kot sedem milijonov smrti po svetu [5]. Novejše študije [6] nakazujejo,

da bi število prezgodnjih smrti na letni ravni, povezanih s čezmerno onesnaženim zrakom, lahko bilo še bistveno višje. Zaradi onesnaženega zraka je pričakovana življenjska doba ljudi v Evropi krajša za 2,2 leta, smrtnost pa se giblje okrog 133 na 100.000 prebivalcev. Po podatkih Nacionalnega inštituta za javno zdravje Republike Slovenije je čezmerno onesnažen zrak kriv za 1500 prezgodnjih smrti v Sloveniji, z izboljšanjem kakovosti zunanega zraka pa bi lahko dosegli podaljšanje pričakovane življenjske dobe od polovice do enega leta. Ustvarjanje čistega okolja brez onesnaženega zraka je tudi ena izmed glavnih smernic novega evropskega zelenega dogovora [7].

Črni ogljik

Ogljični aerosoli v urbanih okoljih predstavljajo največji delež v kategoriji delcev $PM_{2,5}$ (trdni delci s premerom, manjšim od $2,5 \mu m$) in so večinoma antropogenega izvora. Razdelimo jih na elementarni ali črni ogljik (ang. *elemental carbon* – EC, *black carbon* – BC) in organski ogljik (ang. *organic carbon* – OC), njun seštevek (BC + OC) pa je celokupni ogljik (ang. *total carbon* – TC) [8]. Črni ogljik je po kemični strukturi podoben grafitu, je inerten in vedno nastane kot posledica nepopolnega izgorovanja fosilnih goriv ali biomase. Po drugi strani pa organski ogljik sestavlja mešanica kompleksnih kemičnih spojin, v katerih se ogljik veže z drugimi elementi, glede na nastanek pa ga ločimo na primarni OC kot posledico neposredne emisije ter na sekundarni OC, ki nastane s kemičnimi reakcijami na podlagi naravnih ali antropogenih emitiranih plinskih prekurzorjev.

Črni ogljik zaradi svoje majhnosti (večinoma delci PM_1) in velike specifične površine močno vpliva na zdravje ljudi in je boljši indikator učinka na javno zdravje kot PM_{10} in $PM_{2,5}$ [9]. Epidemiološke študije dajejo zadostne dokaze o povezavi kardiovaskularnih in respiratornih obolenj in umrljivosti z izpostavljenostjo črnemu ogljiku. Poleg tega toksikološke študije kažejo, da je črni ogljik univerzalni prenašalec najrazličnejših kemikalij z različnim toksičnim učinkom na pljuča, obrambne celice in sistemski krvni obtok [5].

Črni ogljik močno in enakomerno absorbira svetlobo v celotnem vidnem delu spektra, v bližnjem ultravijoličnem območju pa tudi v bližnjem infrardečem območju, zato pomembno vpliva na globalno segrevanje ozračja. Njegov prispevek k sevalni bilanci Zemlje je na globalni ravni ocenjen na $+1,1 \text{ Wm}^{-2}$ in je takoj za CO_2 prepoznan kot drugi najpomembnejši človeški vir, ki povzroča globalno segrevanje [1]. Črni ogljik ima v zraku sorazmerno kratko življenjsko dobo (od nekaj dni do nekaj tednov), zato se rezultati ukrepov za zmanjšanje izpustov črnega ogljika poznajo hitreje kot pri toplogrednih plinih z življenjsko dobo nekaj let oz. desetletij.

Učenje, ki temelji na raziskovanju

Pri poučevanju naravoslovnih predmetov je učenje z raziskovanjem običajno povezano z učno metodo eksperimentalnega dela [10]. Namen poučevanja s pristopi, s katerimi spodbujamo razvoj raziskovalnih veščin, ni zgolj razvoj prihodnjih znanstvenikov/raziskovalcev, ampak ponotranjenje nekaterih miselnih veščin in navad, ki se v vsakodnevem življenju posameznika kažejo kot:

- nenehno spremljanje, raziskovanje lastnega delovanja, odzivanje in refleksija;
- preudarno zbiranje informacij in dokazov, ki so podlaga za sprejemanje odločitev;
- izražanje z argumenti podprtih mnenj;
- vrednotenje in proučevanje raznolikih možnosti in perspektiv;
- postavljanje kritičnih vprašanj;
- prizadevanje za izboljšave [10].

Pristopi, ki temeljijo na učenju z raziskovanjem, pogosto zajemajo projektno učenje (ang. *project-based learning*), problemsko učenje (ang. *problem-based learning*) in učenje z načrtovanjem (ang. *learning through design*) [11]. Skupno vsem pa je, da učencem prinašajo velike koristi, če so dobro načrtovani, vsebinsko skrbno premišljeni in povezujejo učitelje med seboj [11].

Delavnice o zraku, onesnaženem s trdnimi delci, in projektno učenje

Delavnice o zraku, onesnaženem s trdnimi delci, so bile zasnovane kot uvod v projektno učenje. Glavni namen pri načrtovanju delavnic je bil vzpostaviti spodbudno učno okolje, kjer

Slabo kakovost zunanega zraka, povezano z visokimi koncentracijami trdnih delcev v zraku, je Svetovna zdravstvena organizacija poleg visokega krvnega tlaka, kajenja, sladkorne bolezni in čezmerne teže prepoznala kot enega od petih največjih tveganj za zdravje ljudi.

Ustvarjanje čistega okolja brez onesnaženega zraka je tudi ena izmed glavnih smernic novega evropskega zelenega dogovora.

bi se lahko učenci aktivno vključili v učni proces, krepili zavedanje o pomembnosti sodelovalnega učenja, prepletili formalna in neformalna znanja, prepoznali pomen lastne motivacije za delo ter razvijali svojo zavzetost za učenje ob raziskovanju problemov iz resničnega sveta.

Osrednji cilj delavnic in projektnega dela ni bil povezan zgolj z doseganjem nekaterih operativnih ciljev učnega načrta (naravoslovje in tehnika), ampak je bil omogočiti »učencem boljši transfer učenja v nove situacije in probleme ter bolj izvedensko uporabo znanja« [11].

Pri projektnem delu so sodelovale tri osnovne šole: OŠ Brinje Grosuplje, OŠ Škofljica in OŠ Prule. Delo je potekalo po pouku in je bilo namenjeno otrokom 5. razreda osnovne šole. Udeležba na delavnicah je bila prostovoljna. Sodelovalo je približno 80 otrok. Delavnic se je udeležilo tudi nekaj otrok 4. in 6. razreda osnovne šole.

Projektno učenje je bilo razdeljeno na tri ključne dele:

1. predavanje strokovnjaka s področja onesnaženja zraka in delavnice v manjših skupinah,
2. načrtovanje in izvedba 14-dnevne merilne kampanje,
3. predstavitev in analiza rezultatov ter preverjanje znanja s pomočjo aplikacije.

Uvodno srečanje, ki je obsegalo predavanje in delavnice v manjših skupinah, je bilo zasnovano tako, da so učenci z načrtovanimi aktivnostmi sooblikovali potek predavanja in ga vsebinsko dopolnjevali. Predavanje raziskovalca in strokovnjaka s področja onesnaženosti zraka je obsegalo tri sklope; (1) Uvod v raziskovalno delo in opis dela raziskovalca, (2) Onesnaženost ozračja, vpliv na zdravje ljudi in klimatske spremembe ter (3) Onesnaženost ozračja s črnim ogljikom in načrtovanje merilne kampanje. Podrobnosti o merilni kampanji, uporabljenih pripomočkih in analizi podatkov so predstavljene v poglavju »Merilna kampanja«.

Aktivnosti na delavnicah so spodbujale razvoj različnih vrst znanj. Namen dela v manjših skupinah je bil, da bi skupni cilji spodbudili individualno odgovornost posameznika in pripomogli k sodelovalnemu učenju [12]. Vloga predavatelja (zunanega strokovnjaka) in učitelja na delavnicah se je tako spreminjala – od usmerjevalca skupinskih dejanj, opazovalca skupinskega dela, sporočevalca povratnih informacij do posredovalca (nove) snovi [11], [12].

Cilji in vsebina predavanja in delavnic o onesnaženem zraku

Pri pripravi vsebin in dejavnosti delavnic so bili v ospredju operativni cilji učnega načrta pri predmetu Naravoslovje in tehnika (področje/tema: Snovi; snovi v naravi, zrak) (Tabela 1). Dejavnosti raziskovalnega dela pa so zajemale tudi nekatere naravoslovne in tehnične postopke ter spretnosti, ki jih v standardih znanj opredeljuje učni načrt [13].

Zagotovo pa je bil namen vzpostavitve tovrstnega učnega okolja tudi sledenje nekaterim bolj oddaljenim (globalnim) ciljem, ki v danem času izvajanja niso bili dosegljivi in si je za njihovo uresničitev treba prizadevati daljši čas [14]. Če se navežemo na splošne cilje učnega načrta, bi izpostavili naslednjega: »Oblikujejo pozitiven odnos do narave in tehnike ter kritičen odnos do posegov v naravo« ([13], str. 6).

Vloga predavatelja (zunanega strokovnjaka) in učitelja na delavnicah se je tako spreminjala – od usmerjevalca skupinskih dejanj, opazovalca skupinskega dela, sporočevalca povratnih informacij do posredovalca (nove) snovi.

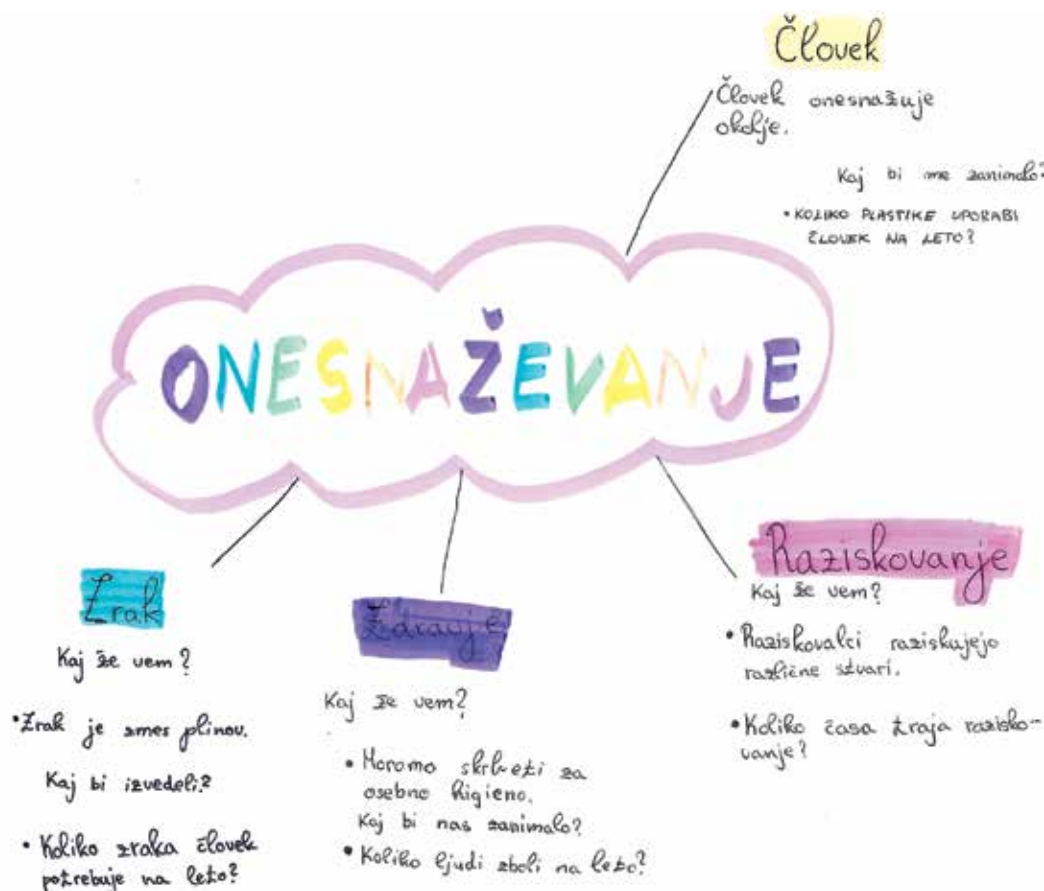
Tabela 1: Operativni cilj učnega načrta in nameni učenja

Operativni cilji učnega načrta	Nameni učenja v povezavi s projektnim učenjem
Področje/tema Snovi; snovi v naravi, zrak Učenci znajo: – pojasniti, da Zemljo obdaja plast zraka (ozračje oz. atmosfera), – ugotoviti, da je zrak zmes različnih plinov, in jih poimenovati (kisik, dušik, ogljikov dioksid), – prepoznati in opisati glavne povzročitelje onesnaženosti zraka in lokalna onesnaževala zraka, – ugotoviti onesnaženje zraka s trdnimi delci, – predlagati mogoče rešitve za čistejši zrak (zračni filtri), – vrednotiti ravnanje oziroma odnos ljudi do onesnaževanja zraka in ob tem razložiti, kaj je odgovoren odnos do okolja.	Učim se: – razložiti, kaj je ozračje oz. atmosfera, – poimenovati pline, ki sestavljajo zrak, – naštetih onesnaževala zraka, – prepoznati onesnaževala zraka v lokalnem okolju, – dokazati, da je zrak onesnažen s trdnimi delci, – oblikovati predloge za zmanjšanje onesnaženosti ozračja, – presojati ravnanja ljudi v povezavi z onesnaževanjem zraka, – sklepati o pomenu odgovornega odnosa do okolja.

Na delavnicah so se učenci razdelili v štiri skupine. Vsaka skupina je s pomočjo učnega lista izvedla različne naloge v povezavi s ključnimi pojmi predavanja. Med predavanjem so se učenci v skupinah vključevali in predstavljali znanja, ki so jih usvojili v aktivnem delu delavnic. Metode dela v manjših skupinah so spodbujale sodelovalno učenje in krepile razvoj tako vsebinskih kot tudi procesnih znanj.

Učni listi z načrtovanimi aktivnostmi za učence

1. SKUPINA: ZNANJE	<i>Procesni cilj:</i> – Iščejo in uporabljajo različne informacije ter jih (kritično) presojujejo
Potrebščine: Knjige, računalnik/telefon, listi, pisala	
Naloga: Preberi ključne besede: ZRAK, ZDRAVJE, ČLOVEK, TRDNI DELCI, RAZISKOVANJE O ključnih besedah razmišljaj v povezavi z ONESNAŽEVANJEM (Slika 1). – Kaj o njih že veš? – Kaj zanimivega bi lahko o njih izvedel? – Kje bi lahko poiskal podatke? – Kako bi jih lahko predstavil drugim? – Kaj novega si izvedel? – Svoje odgovore zapiši. Izziv 1: Oglejte si fotografije, ki prikazujejo glavne vire onesnaževal zraka. Vsako dogajanje na fotografiji prikažite s pomočjo skupinske pantomime.	



Slika 1: Osnutek zapisa učencev na podlagi izhodiščnega pojma in ključnih besed.

2. SKUPINA: TEHNOLOGIJA	<i>Procesni cilji:</i> – Varno uporabljajo orodja in pripomočke
Potrebščine: Črpalka, filtri s kremenovimi vlakni, fotoaparati, listi, pisala	
Naloga: Sestavite sistem za vzorčenje črnega ogljika. Pravilno vstavite filtre. Preizkusite, ali črpalka ustrezno tesni ali ne. Narišite shemo delovanja črpalke in ponazorite pretok zraka skozi črpalko. Postopek lahko tudi fotografirate. S pomočjo predavatelja izmerite zračni pretok črpalke v sistemu in ga zapišite (Slika 2).	
Izziv 1: Čim hitreje pravilno sestavite črpalko in vstavite filter. Primerjajte delovanje črpalke z dihanjem. Izziv 2: Čim hitreje odpravite napako in pravilno sestavite črpalko. Pred izzivom se obrnite na učitelja.	



Slika 2: Sestavljanje sistema za vzorčenje črnega ogljika.

3. SKUPINA: TRDNI DELCI	<i>Procesni cilji:</i> – Natančno in sistematično opazujejo in zaznavajo s čim več čutili – Razvijajo veščine eksperimentalnega dela – Varno uporabljajo pripomočke za izvedbo poskusov – Skrbijo za urejen delovni prostor
Potrebščine: Pripomočki za poskus, kriteriji za raziskovanje	
Naloga: Preberite si načrt raziskovanja (<i>Kako raziskujem?</i>). Pogovorite se, kaj pomenijo posamezni elementi. Rešite učni list in s pomočjo podpornih vprašanj opredelite potek učenja z raziskovanjem. S pomočjo učitelja izvedite poskus gorenja različnih snovi (Poskus: Saje pri gorenju sveče, stropora in alkohola (Slika 3)).	
Izziv: Pripravite demonstracijo poskusa za preostale udeležence. Vključite korake odprte raziskave.	
Opis poskusov: – Prižgali smo plinski gorilnik na butan in pri spreminjanju dotoka kisika (z ustrezno nastavitvijo šobe) opazovali plamen. Ugotovili smo, da manjši dotok kisika povzroči večjo sajavost plamena. – Kurili smo vzorce alkohola, parafina (sveča) in stropora: zaradi različne sestave goriva je bila količina saj v plamenu drugačna. Prikazali smo možnost kvalitativne meritve sajavosti plamena: nad plamenom smo držali belo porcelanasto izparilnico. Pri meritvi je pomembno, da je razdalja nad plamenom pri vseh vzorcih enaka in prav tako čas meritve. Preostane še ocena: vizualna (obseg črnega madeža). – Prikazali smo način gašenja z odvzemom dostopa kisika (goreči vzorec smo pokrili s pokrovom, preden je gorivo pošlo) in opozorili, da vseh požarov ne moremo gasiti z vodo.	



Slika 3: Izvajanje eksperimentalnega dela na delavnicah.

4. SKUPINA: RAZISKOVANJE	<i>Procesni cilj:</i> – Načrtujejo in sodelujejo pri izvedbi raziskave
Potrebščine: Raziskovalni dnevnik, listi, pisala	
Naloga: Preberite si načrt raziskovanja (<i>Kako raziskujem?</i>). Pogovorite se, kaj pomenijo posamezni elementi. Preglejte primer raziskovalnega dnevnika (Slika 4). Na kaj vse moramo biti pri vpisovanju podatkov pozorni? Opredelite namen naše raziskave in napovejte rezultate, ki jih pričakujete. Izziv: Sestavite kratko anketo, ki jo boste med raziskovanjem izvedli. Naslov ankete: Odnos ljudi do onesnaževanja zraka	



Slika 4: Raziskovalni dnevnik.

Med spremljanjem onesnaženosti zraka v okolici šol so učenci v manjših skupinah samostojno skrbeli za nemoten potek raziskave in izvajali ter spremljali meritve s preprostim merilnim sistemom, opisanim v poglavju »Merilna kampanja«.

V sklepni fazi projektnega učenja, ki je predstavljena v poglavju »Sklepni del projektnega učenja«, je sledila predstavitev rezultatov raziskave pri pouku naravoslovja in tehnike. To je potekalo tako, da so učenci z uporabo aplikacije Nearpod spoznali rezultate raziskave in jih uporabili pri reševanju novih nalog ter preverili svoje znanje v povezavi s cilji učnega načrta.

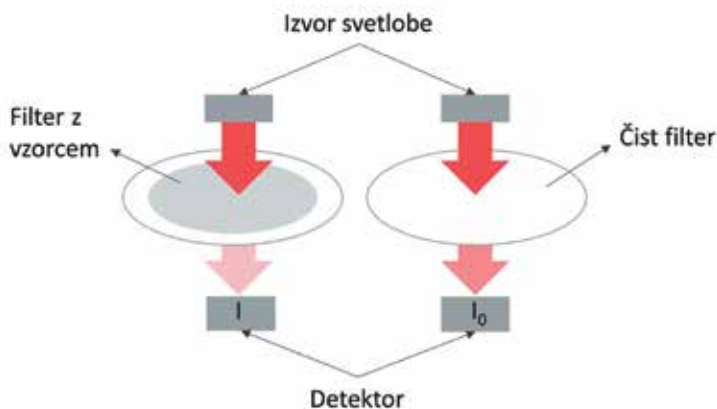
Merilna kampanja – koncentracije črnega ogljika v okolici osnovnih šol

Metoda

Optična metoda za merjenje koncentracije črnega ogljika temelji na merjenju zmanjšanja (atenuacije, ATN) intenzitete svetlobe, ki prehaja skozi filter, na katerem je nabran vzorec:

$$ATN = -100 \cdot \ln\left(\frac{I}{I_0}\right), \quad (1)$$

kjer je z I_0 označena intenziteta svetlobe, ki prehaja skozi čist ali referenčni filter, z I pa intenziteta svetlobe, ki prehaja skozi filter z nabranim vzorcem (Slika 5).



Slika 5: Optična metoda za merjenje koncentracije črnega ogljika temelji na merjenju zmanjšanja intenzitete svetlobe (atenuacije, ATN).

Čeprav Beer-Lambertov zakon predvideva linearno odvisnost med atenuacijo svetlobe in koncentracijo črnega ogljika na filtru, se to ne zgodi. Več študij je pokazalo, da lahko vrsta filterske matrike, količina in tudi vir aerosolov na vzorcu povzročijo, da odvisnost ni linearna [15]–[17]. Površinsko koncentracijo črnega ogljika B tako izrazimo kot (povzeto po [15]):

$$B = \frac{1}{\sigma} ATN \cdot (1 + k \cdot ATN), \quad (2)$$

kjer je σ specifični masni presek atenuacije (m^2g^{-1}) in parameter k opisuje učinek senčenja zaradi nalaganja delcev. Učinek senčenja bomo za potrebe študije, opisane v tem članku, zanemarili ($k = 0$) in predpostavili linearno odvisnost, saj nam taka natančnost zadostuje [18]. Enačbo 2 tako zapišemo v obliki za masno koncentracijo črnega ogljika BC ($\mu\text{g m}^{-3}$):

$$BC = \frac{S_f}{\sigma V_z} ATN = \frac{b_{ATN}}{\sigma}, \quad (3)$$

kjer je izpostavljena površina filtra označena s S_f , V_z je volumen zraka, prečrpanega skozi aktivno površino filtra, b_{ATN} pa atenuacijski koeficient. Absorpcijski koeficient analiziranih aerosolov v zraku izrazimo z b_{ATN} :

$$b_{ABS} = \frac{b_{ATN}}{C}, \quad (4)$$

z $\sigma = C \cdot \text{MAC}$, kjer je MAC specifični masni presek absorpcije ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$) in C konstantni parameter, s katerim kompenziramo sipanje svetlobe v filterski matriki. Koncentracijo črnega ogljika izračunamo iz absorpcije svetlobe pri valovni dolžini 880 nm, vendar lahko z meritvijo pri več valovnih dolžinah dobimo dodatne lastnosti vzorčenih aerosolov. Enačbi 3 in 4 posplošimo v $BC(\lambda) = b_{ATN}(\lambda)\sigma^{-1}(\lambda)$ in $b_{ABS}(\lambda) = b_{ATN}(\lambda)C^{-1}$. Ångströmov eksponent (α) opisuje, kako se absorpcijski koeficient delcev spreminja z valovno dolžino svetlobe. Za popolnoma črne sferične delce Mieva izračun kaže, da je absorpcijski koeficient obratno sorazmeren z valovno dolžino. Enačbo lahko posplošimo v:

$$b_{ABS} \propto \frac{1}{\lambda^\alpha}. \quad (5)$$

Ångströmov eksponent α za popolnoma črne delce je tako 1. Za delce, ki močneje absorbirajo pri nizkih valovnih dolžinah, pa pričakujemo, da imajo višji Ångströmov eksponent. Izpust iz dizelskih motorjev vsebuje velik delež črnega ogljika in ima, dokler je svež, Ångströmov eksponent blizu $\alpha_{\text{promet}} = 1$ [19]. Dim, ki nastaja pri izogrevanju lesa, vsebuje organske snovi, ki močno absorbirajo v modrem in ultravijoličnem (UV) delu svetlobnega spektra, v infrardečem (IR) delu spektra pa ne. Visoko absorpcijo teh delcev pri nizkih valovnih dolžinah pri preučevanju odvisnosti absorpcijskega koeficienta od valovne dolžine opazimo kot zvišan Ångströmov eksponent. Za dim, ki nastane pri sežiganju biomase, pričakujemo višji Ångströmov eksponent, $\alpha_{\text{les}} \approx 2$ [20]–[22]. Ångströmov eksponent je tako parameter, na podlagi katerega lahko razlikujemo med lesnim dimom in izpuhi dizelskih motorjev. Če uporabimo meritve pri valovnih dolžinah 880 in 370 nm, lahko koncentraciji črnega ogljika BC_{les} in BC_{promet} ki prihajata od kurjenja lesa in izpustov iz prometa, izračunamo kot (povzeto po [20], [21]):

$$BC_{\text{les}} = r \cdot BC(880 \text{ nm}), \quad (6)$$

$$BC_{\text{promet}} = (1 - r) \cdot BC(880 \text{ nm}), \quad (7)$$

kjer parameter r označuje delež črnega ogljika od kurjenja lesa.

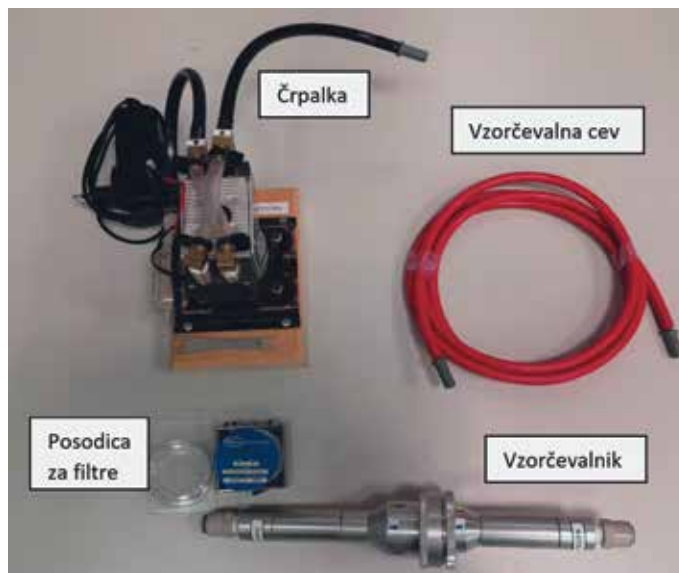
$$r = \frac{1}{1 - \frac{1 - \left(\frac{BC(880 \text{ nm}) \cdot MAC(880 \text{ nm})}{BC(370 \text{ nm}) \cdot MAC(370 \text{ nm})} \right) \left(\frac{880 \text{ nm}}{370 \text{ nm}} \right)^{\alpha_{\text{les}}}}{1 - \left(\frac{BC(880 \text{ nm}) \cdot MAC(880 \text{ nm})}{BC(370 \text{ nm}) \cdot MAC(370 \text{ nm})} \right) \left(\frac{880 \text{ nm}}{370 \text{ nm}} \right)^{\alpha_{\text{promet}}}} \quad (8)$$

Merilna kampanja

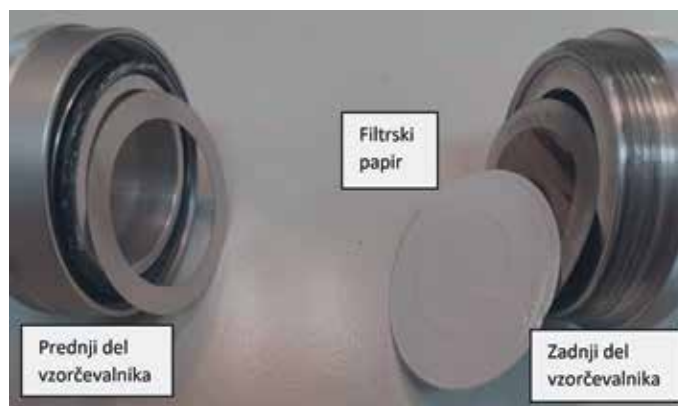
Za meritve koncentracij črnega ogljika v bližini osnovnih šol smo uporabili poenostavljen vzorčevalni sistem, sestavljen iz komore (vzorčevalnika) za filter iz kremenovih vlaken in črpalke, ki sesa zrak skozi filter s pretokom okrog pet litrov na minuto (Slika 6). Vzorčevalnik je sestavljen iz dveh delov ohišja, med katera postavimo filtrski papir iz kremenovih vlaken. Področje na robu filtrskega papirja je ustrezno tesnjeno z gumijastimi in kovinskimi tesnili (Slika 7). Poenostavljen vzorčevalni sistem je bil za ta namen razvit v podjetju Aerosol, d. o. o. Vzorčevalni sistem so učenci vsak dan približno ob isti uri izklopili in zamenjali filter, na katerem se je nabral vzorec aerosolov, z novim svežim filtrom. Tako je bila časovna resolucija meritev približno 24 ur, za filtre, vzorčene konec tedna, pa 48 ur. Take vzorce smo analizirali z instrumentom Sootscan Model OT21 podjetja Aerosol, ki izmeri atenuaciji svetlobe na filtru z vzorcem aerosolov pri valovnih dolžinah 880 in 370 nm ter ju primerja z atenuacijo svetlobe na čistem filtru. V bližini OŠ Prule je istočasno v okviru projekta »Smart City – energijska platforma« potekala merilna kampanja s profesionalnim merilcem črnega ogljika, etalometrom (model AE33, [16]), prav tako razvitim in izdelanim v podjetju Aerosol. Etalometer je najpogostejše uporabljeni instrument za merjenje aerosolov črnega ogljika v zraku v realnem času. Zrak vzorči s pretokom pet litrov na minuto skozi filtrski trak. Nad filtrom je izvor svetlobe z več diskretnimi valovnimi dolžinami (370 nm, 470 nm, 520 nm, 590 nm, 660 nm, 880 nm in 950 nm), pod njim pa so detektorji, ki merijo prepustnost traku za svetlobo. S patentirano tehnologijo »DualSpot«

Vzorčevalni sistem so učenci vsak dan približno ob isti uri izklopili in zamenjali filter, na katerem se je nabral vzorec aerosolov, z novim svežim filtrom.

Slika 6: Preprosta oprema za vzorčenje aerosolov na filtrski papir, ki jo sestavlja vzorčevalna cev, s katero na enem koncu vzorčimo zunanji zrak, drugi konec pa priključimo na vzorčevalnik. V vzorčevalnik vstavimo bel filtrski papir (kremenova vlakna) s premerom 47 mm. Drugi konec vzorčevalnika priklopimo na črpalko tako, da se zunanji zrak črpa čez filtrski papir v vzorčevalniku. Ob menjavi stari filter vstavimo v posodico za filtre ter zapišemo datum in uro menjave.



sproti obdeluje podatke in kompenzira učinek senčenja, opisan v enačbi 2. Časovna resolucija tako izmerjenega črnega ogljika je sekunda ali minuta [16], [23].



Slika 7: Vzorčevalnik je sestavljen iz dveh delov ohišja, med katera postavimo filtrski papir iz kremenovih vlaken. Področje na robu filtrskega papirja je ustrezno tesnjeno z gumijastimi in kovinskimi tesnili.

Lokacije

Meritve so učenci izvajali na treh lokacijah: OŠ Brinje Grosuplje (Grosuplje; regionalno ozadje), OŠ Škofljica (Škofljica; regionalno ozadje z mogočim vplivom 100 m oddaljene regionalne ceste Kočevje–Ljubljana) in OŠ Prule (Ljubljana; mestno ozadje). Hkrati je v okviru projekta »SMART CITY – energetska platforma« potekala tudi meritev z etalometrom AE33 v bližini OŠ Prule, ki je prav tako meril na lokaciji mestnega ozadja (Slika 8). Meritve na OŠ Brinje Grosuplje so potekale med 29. 1. 2020 in 14. 2. 2020, na OŠ Škofljica med 3. 2. 2020 in 14. 2. 2020 in na OŠ Prule med 5. 2. 2020 in 18. 2. 2020.



Slika 8: Meritve so se izvajale na treh lokacijah: OŠ Brinje Grosuplje (Grosuplje; 45° 57' 43" N, 14° 39' 28" E, 333 m n. v.; regionalno ozadje, rdeča pika), OŠ Škofljica (Škofljica; 45° 58' 47" N, 14° 34' 37" E, 292 m n. v.; regionalno ozadje z mogočim vplivom 100 m oddaljene regionalne ceste Kočevje–Ljubljana; modra pika) in OŠ Prule (Ljubljana; 46° 02' 31" N, 14° 30' 34" E, 293 m n. v.; mestno ozadje, rumena pika). Hkrati je v okviru projekta »SMART CITY – energetska platforma« potekala tudi meritve z etalometrom AE33 v bližini OŠ Prule (Ljubljana; 46° 02' 39" N, 14° 30' 14" E, 293 m n. v.; mestno ozadje, zelena pika). Vir slike: <http://www.earth.google.com> [3. junij 2020].

Rezultati

Rezultati so predstavljeni v Tabeli 2 in na Sliki 10. Pri izračunu koncentracije črnega ogljika smo zanemarili učinek senčenja (enačba 2), črni ogljik in absorpcijo pri 880 nm in 370 nm smo izračunali z enačbama 3 in 4. Izpostavljeno površino filtra S_f smo izračunali iz izmerjenega premera $2d = 35,5 \text{ mm}$, prečrpan volumen zraka je izračunan iz zapisanih časov menjave filtra in pretoka črpalk $p_p = 5,6 \text{ l min}^{-1}$. Specifična masna preseka atenuacije pri 880 nm in 370 nm povzamemo po [24], in sicer $\sigma(880 \text{ nm}) = 16,6 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ in $\sigma(370 \text{ nm}) = 39,5 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$. Parameter, ki kompenzira sipanje svetlobe v filterski matriki, je neodvisen od valovne dolžine in je za filter s kremenovimi vlakni enak $C = 2,14$. Specifični masni presek absorpcije MAC smo izračunali z enačbo $\sigma(\lambda) = C \cdot \text{MAC}(\lambda)$. Za izračun deleža črnega ogljika od kurjenja lesa (enačba 8) smo uporabili par Ångströmovih eksponentov $\alpha_{\text{promet}} = 1$ in $\alpha_{\text{les}} = 2$.

V izračunu koncentracije BC je uporabljeno precej predpostavk, prav tako so se za nekatere dneve zgodile napake pri vzorčenju aerosolov (Slika 9), ki pa jih zaradi premajhnega vzorca nismo izključili. Izračunane vrednosti BC ocenjujemo na 25-odstotno natančne, medtem ko je napaka zaradi učinka senčenja in izbire splošnih vrednosti Ångströmovih eksponentov $\alpha_{\text{promet}} = 1$ in $\alpha_{\text{les}} = 2$ pri izračunu deleža r (enačba 8) večja, okoli 40 %. Razpon deleža r smo zato razdelili v štiri območja: $r_1 = 0 \text{ \%}$ (0–24 %), $r_2 = 25 \text{ \%}$ (25–49 %), $r_3 = 50 \text{ \%}$ (50–74 %) in $r_4 = 75 \text{ \%}$ (75–100 %).

Tabela 2: Rezultati merjenja atenuacije na vzorčenih filterih. Pretok je bil izmerjen pri prvi nastavitvi vzorčevalnika, izpostavljen premer filtra je 35,5 mm. Koncentracije črnega ogljika smo izračunali po enačbah 3 in 4, delež črnega ogljika iz naslova kurjenja lesa pa po enačbi 8 ter ga razdelili v štiri območja: $r_1 = 0 \text{ \%}$ (0–24 %), $r_2 = 25 \text{ \%}$ (25–49 %), $r_3 = 50 \text{ \%}$ (50–74 %) in $r_4 = 75 \text{ \%}$ (75–100 %). Opombe so razložene na Sliki 9.

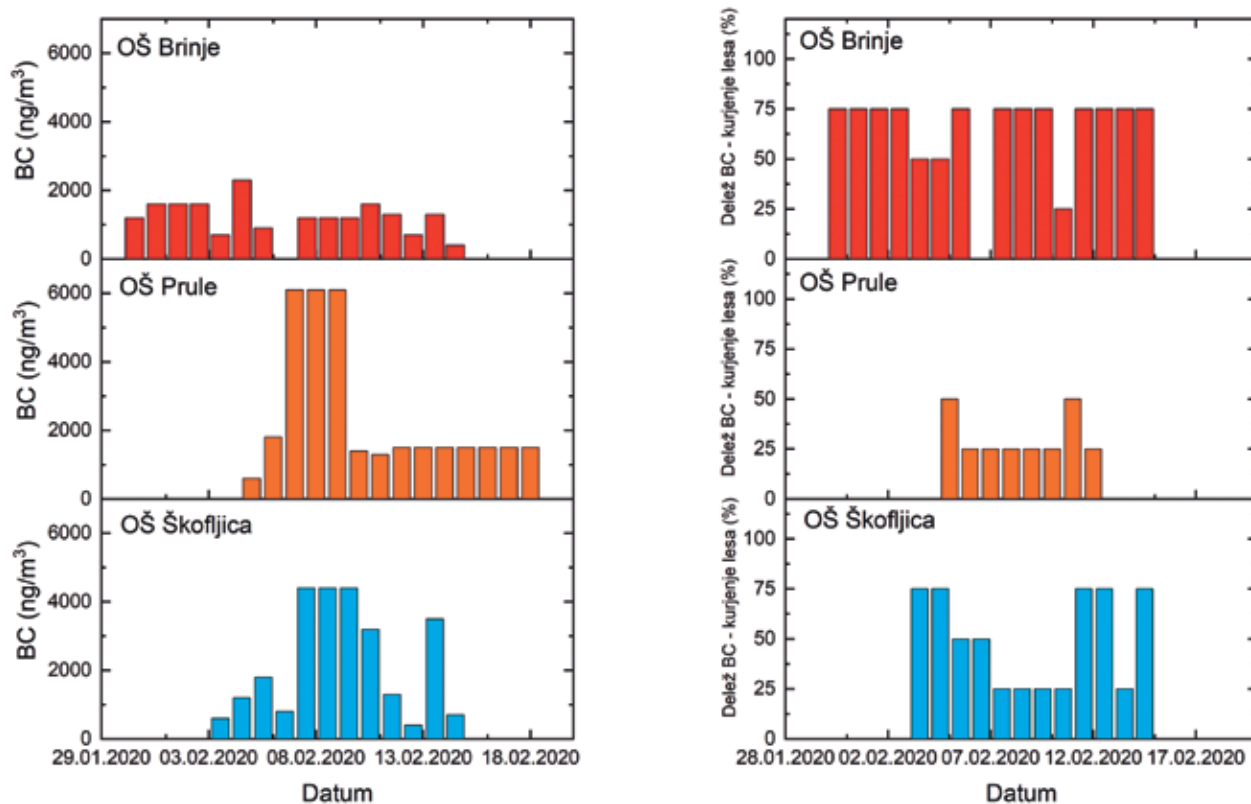
OŠ Brinje Grosuplje							
Datum in ura menjave	Opombe	Čas vzorčenja (min.)	Volumen zraka (pretok 5,6 LPM)	UV (ATN)	IR (ATN)	BC (ng/m ³)	Delež kurjenja lesa r (%)
/	kontrolni vzorec			-8	-9	0	/
29/01/2020 15:20		1440	8064	-7	-9	0	/
30/01/2020 13:00		1300	7280	101	15	1200	75
31/01/2020 13:30		1470	8232	125	22	1600	75
03/02/2020 13:00		4290	24024	114	27	700	50
04/02/2020 13:00		1440	8064	140	31	2300	50
05/02/2020 13:00		1440	8064	74	12	900	75
06/02/2020 13:00	lateralno puščanje	1440	8064	18	0	0	/
07/02/2020 14:00	lateralno puščanje	1500	8400	88	17	1200	75
10/02/2020 13:00		4260	23856	213	63	1600	25
11/02/2020 13:00		1440	8064	91	18	1300	75
12/02/2020 13:00		1440	8064	68	10	700	75
13/02/2020 13:00		1440	8064	97	17	1300	75
14/02/2020 12:00		1380	7728	34	5	400	75

OŠ Prule							
Datum in ura menjave	Opombe	Čas vzorčenja (min.)	Volumen zraka (pretok 5,6 LPM)	UV (ATN)	IR (ATN)	BC (ng/m ³)	Delež kurjenja lesa (%)
/	kontrolni vzorec			-1	-1		
05/02/2020 14:00		1440	8064	51	8	600	50
06/02/2020 14:00		1440	8064	82	24	1800	25
07/02/2020 14:30	lateralno puščanje	1470	8232	314	84	6100	25
10/02/2020 14:00	lateralno puščanje	4290	24024	214	57	1400	25
11/02/2020 14:00	lateralno puščanje	1440	8064	73	18	1300	50
12/02/2020 14:00	lateralno puščanje	1440	8064	78	20	1500	25
18/02/2020 14:00	lateralno puščanje	8640	48384	335	124	1500	0

OŠ Škofljica							
Datum in ura menjave	Opombe	Čas vzorčenja (min.)	Volumen zraka (pretok 5,6 LPM)	UV (ATN)	IR (ATN)	BC (ng/m ³)	Delež kurjenja lesa (%)
/	kontrolni vzorec			-3	-4		
03/02/2020 13:00		1440	8064	128	8	600	75
04/02/2020 13:00	lateralno puščanje	1440	8064	87	16	1200	75
05/02/2020 13:00		1440	8064	115	24	1800	50
06/02/2020 13:00		1440	8064	51	11	800	50
07/02/2020 13:00		1440	8064	239	60	4400	50
10/02/2020 13:00	strgan filter	4320	24192	428	131	3200	25
11/02/2020 13:00		1440	8064	94	17	1300	75
12/02/2020 13:00		1440	8064	52	5	400	75
13/02/2020 13:00		1440	8064	189	47	3500	50
14/02/2020 12:00		1380	7728	59	9	700	75



Slika 9: Primeri različnih filtrov: (a) Filter je strgan zaradi predolgega časa vzorčenja. (b) Vzorčevalnik ni bil dovolj zatesnjen, zato je prišlo do puščanja v lateralni smeri. (c) Primeren filter.



Slika 10: Primerjava (a) koncentracij BC in (b) deleža BC od kurjenja lesa za vsa tri merilna mesta: OŠ Brinje Grosuplje (rdeča barva), OŠ Prule (oranžna barva) in OŠ Škofljica (modra barva). Pri filterih, ki so bili vzorčeni več kot en dan, so za lažjo primerjavo koncentracije BC in delež BC normalizirani na 24 ur.

Poenostavljeno merjenje in analiza koncentracij črnega ogljika je pokazala, da so najvišje izmerjene povprečne koncentracije črnega ogljika v okolici OŠ Prule (2500 ng/m^3), malo nižje v okolici OŠ Škofljica (2200 ng/m^3), najnižje pa v okolici OŠ Grosuplje (1300 ng/m^3). Z analizo

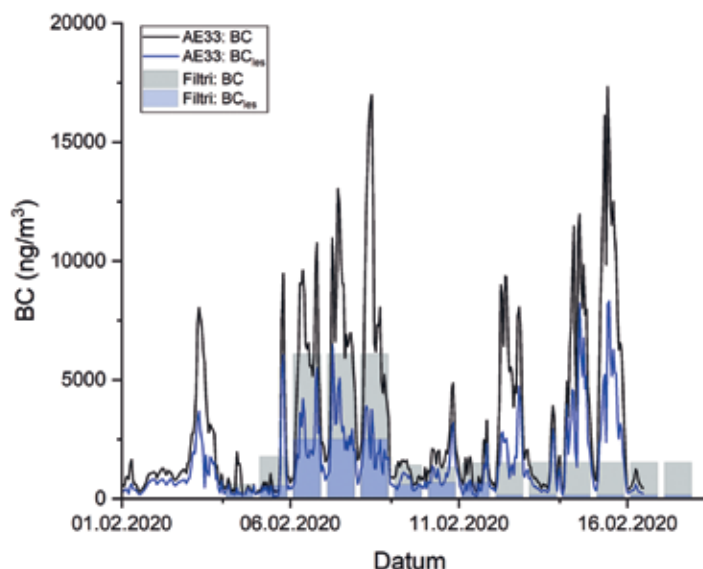
filtru pri dveh valovnih dolžinah je bilo ugotovljeno, da delež črnega ogljika, ki prihaja iz kurjenja lesa, pri OŠ Brinje Grosuplje znaša več kot 75 % pri OŠ Škofljica med 50 in 75 %, medtem ko pri OŠ Prule med 25 in 50 %. Prispevek kurjenja biomase je pozimi prevladujoč vir črnega ogljika v vaseh in mestih, kjer se za ogrevanje uporabljajo individualna kurišča lesa, kar pokažejo meritve deleža τ . V primerjavi s črnim ogljikom od prometa je lesni dim tudi bolj homogeno porazdeljen.

Koncentracije BC so poleg od intenzivnosti virov zelo odvisne od vpliva meteorologije. V jasnih dneh, ko se čez dan debelina planetarne mejne plasti ozračja poveča, lahko pričakujemo zmanjšanje koncentracij BC zaradi učinka redčenja. Zaradi istega razloga se koncentracije v vetrovnih dneh zmanjšajo. Med temperaturnimi inverzijami, značilnimi za kotline, ki niso dobro prevetrene (npr. Ljubljanska kotlina), pa se planetarna mejna plast stabilizira, mešanje zračnih mas se zmanjša, posledično se koncentracije črnega ogljika ob aktivnosti virov povišajo [25]. Februar 2020 je bil v Sloveniji izredno topel, povprečna mesečna temperatura v državnem merilu je bila druga najvišja. K visoki povprečni temperaturi so prispevali atlantska zračna masa, razmeroma vetrovno vreme in pomanjkanje snežne odeje po nižinah [26]. Povprečne dnevne ravni delcev PM_{10} , $PM_{2,5}$ in BC so bile februarja 2020 zaradi ugodnih vremenskih razmer bistveno nižje od povprečnih za ta čas. Zaradi nadpovprečno visokih temperatur v februarju izraziti temperaturni obrati niso bili pogosti, če pa je do njih že prišlo, se je ob sončnem vremenu ozračje čez dan premešalo in razredčilo. Šibki inverziji, ki je delno stabilizirala mejno plast zračne mase v Ljubljanski kotlini (merilni mesti Prule in Škofljica) med 7. in 10. februarjem 2020, pa je pripisati občuten dvig koncentracij BC (Slika 10 (a)). Temperaturna inverzija v omenjenem času se ujema z opažanji vremena, ki so jih učenci vpisovali v laboratorijski dnevnik.

Z etalometrom AE33 z enominutno časovno resolucijo lahko izmerimo tudi dnevna nihanja koncentracij črnega ogljika. Jutranji in popoldanski dvig koncentracij pripišemo povečanim aktivnostim virov (jutranja in popoldanska prometna konica, popoldansko in večerno kurjenje lesa za ogrevanje) pa tudi meteorološkim razmeram. V jasnih dneh se podnevi debelina mejne plasti ozračja poveča, kar povzroči učinkovitejše mešanje zraka ter posledično zmanjšanje koncentracij. Ponoči se mejna plast stabilizira, kar skupaj z zmanjšano aktivnostjo prometa zniža koncentracije BC od prometa, medtem ko se vir črnega ogljika od kurjenja lesa poveča, stabilne razmere pa še okrepijo vpliv na njegovo koncentracijo [25].

Primerjava meritev v okolici OŠ Prule z meritvami koncentracij BC z etalometrom v okviru projekta Smart-City v Trnovem pokaže, da ob pravilnem vzorčenju in vsakodnevem menjavanju filtrov preprosta metoda zbiranja vzorca ter analiziranja transmisije, uporabljena pri tem šolskem projektu, poda smiselne rezultate, ki se skladajo z meteorološkimi razmerami (Slika 11). V drugem delu merilne kampanje učenci filtra niso zamenjali dovolj pogosto, dvigi koncentracij tako zaradi dolgega povprečenja ne morejo biti vidni.

Primerjava meritev v okolici OŠ Prule z meritvami koncentracij BC z etalometrom v okviru projekta Smart-City v Trnovem pokaže, da ob pravilnem vzorčenju in vsakodnevem menjavanju filtrov preprosta metoda zbiranja vzorca ter analiziranja transmisije, uporabljena pri tem šolskem projektu, poda smiselne rezultate, ki se skladajo z meteorološkimi razmerami.



Slika 11: Časovni potek koncentracije skupnega črnega ogljika in črnega ogljika, katerega vir je kurjenje lesa, izmerjene z etalometrom AE33 na lokaciji Trnovo, ter primerjava s poenostavljeno meritvijo z vzorčevalnikom v okviru kampanje OŠ Prule.

Sklepni del projektnega učenja

Projektno učenje v povezavi z delavnicami o zraku, onesnaženem s trdnimi delci, se je sklenilo v obliki dogodka pri pouku naravoslovja in tehnike. Učenci, ki so sodelovali na delavnicah in pri izvedbi raziskave, so svoje znanje in ugotovitve prenesli v pouk. Po krajši predstavitvi poteka projektnega dela je sledilo individualno delo vseh učencev v razredu s spletno aplikacijo Nearpod. Naloge so se navezovala tako na znanja, ki so jih med šolskim letom pri pouku obravnavali vsi učenci, kot tudi na znanja, ki so bila neposredno povezana s projektnim učenjem. Učenci so ugotovitve raziskave uporabljali pri reševanju (novih) nalog v povezavi z operativni cilji učnega načrta (Področje/tema: Snovi; snovi v naravi, zrak) in jih tako povezovali s problemi iz resničnega sveta. Z reševanjem različnih nalog (prepoznavanje parov različnih virov onesnaževal zraka, kviz z naravoslovnimi pojmi, branje grafičnih prikazov, sklepanje na podlagi fotografij dobljenih vzorcev in grafičnega prikaza podatkov, zapisovanje manjkajočih delov besedila, zapisi lastnih predlogov za zmanjševanje onesnaženosti ozračja (Slika 12)) so preverjali svoje znanje in spoznali rezultate raziskave ter jih deloma tudi interpretirali.



Slika 12: Delo učencev v sklepni fazi projektnega učenja (sklepanje na podlagi obravnave rezultatov in oblikovanje lastnih predlogov).

Zaključek

Vzpostavljamo spodbudnih učnih okolij, v katerih upoštevamo in spoštujemo individualne potrebe posameznega učenca, spodbujamo razvoj močnih področij ter kakovostnega znanja in kompetenc za uspešno življenje, je pomemben element današnje šole [27].

V prispevku smo predstavili, kako lahko sodelovanje z zunanjimi strokovnjaki s specifičnega področja ter vertikalno povezovanje učiteljev v osnovni šoli učencem nudita dodatno oporo pri usvajanju znanja iz učnega načrta ter jim hkrati dajeta priložnost, da neposredno spoznajo učenje, ki temelji na raziskovanju. Učenci so ob različnih didaktičnih dejavnostih uporabljali in razvijali različne veščine (komunikacija, sodelovanje, ustvarjalnost, globoko mišljenje), ki jih spodbujajo na raziskovanju temelječi pristopi [11].

Preprosto zastavljena kampanja za merjenje onesnaženja zraka s črnim ogljikom v okolici osnovnih šol se je izkazala za primerno tako z vidika zahtevnosti predstavljenih vsebin, smiselnosti izmerjenih rezultatov kot tudi z vidika motivacije učencev za reševanje problemov iz resničnega sveta.

Delavnice so vsebinsko zasnovane na način, ki omogoča poljubno prilagajanje zahtevnosti razvojni stopnji učencev, saj v osnovi izhajajo iz vsebin učnega načrta. Temu sledita tudi kom-

Preprosto zastavljena kampanja za merjenje onesnaženja zraka s črnim ogljikom v okolici osnovnih šol se je izkazala za primerno tako z vidika zahtevnosti predstavljenih vsebin, smiselnosti izmerjenih rezultatov kot tudi z vidika motivacije učencev za reševanje problemov iz resničnega sveta.

pleksnost merilne kampanje in zahtevnost analize dobljenih rezultatov, ki nadgrajujeta vsebino delavnic. Ta način omogoča tudi nadaljnje aktivnosti v povezavi s projektnim učenjem, ki jih je mogoče projicirati na različnih stopnjah izobraževanja. Na primer:

- samostojna izdelava vzorčevalnega sistema in enostavnega merilnika sivine;
- poglobljena analiza rezultatov in predlogi ukrepov za izboljšanje kakovosti zraka v okolici šol (sprememba prometne infrastrukture v okolici šol, spodbujanje trajnostne mobilnosti itd.);
- eksperimenti za določanje odvisnosti onesnaženosti zraka s trdnimi delci od učinkovitosti izgorevanja (vrsta goriva, pogoji gorenja).

V prihodnosti bi bilo zagotovo smiselno opisani primer vključiti v obvezni del pouka (npr. dan dejavnosti) tako na razredni kot tudi na predmetni stopnji. K projektnemu sodelovanju bi lahko povabili tudi druge vzgojno-izobraževalne ustanove (osnovne in srednje šole, fakultete) ter strokovnjake z različnih področij in tako spodbudili institucionalno ter interdisciplinarno povezovanje znotraj izobraževalnega sistema v Republiki Sloveniji. Merilne naprave in vsebinski del s spletno aplikacijo za preverjanje znanja so ob predhodnem dogovoru z avtorji prispevka na voljo za uporabo v prihodnjih projektih.

Zahvala

Zahvala za pripravljenost na sodelovanje v projektu treh šol gre vodstvom OŠ Brinje Grosuplje (ga. Natalija Kotar), OŠ Škofljica (g. Roman Brunšek) in OŠ Prule (ga. Katja Kmetec), ki so se odzvali vabilu, ter učiteljema Lauri Belak in Andreju Kosednarju, ki sta poleg avtorjev sodelovala pri izvedbi delavnic in merilni kampanji.

Viri

- [1] T. C. Bond idr., »Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment,« *J. Geophys. Res.-Atmos.*, zvezek 118, št. 11, str. 5380–5552, jun. 2013, doi: 10.1002/jgrd.50171.
- [2] M. O. Andreae in A. Gelencser, »Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols,« *Atmos. Chem. Phys.*, zvezek 6, str. 3131–3148, jul. 2006, doi: 10.5194/acp-6-3131-2006.
- [3] W.-K. Tao, J.-P. Chen, Z. Li, C. Wang in C. Zhang, »Impact of Aerosols on Convective Clouds and Precipitation,« *Rev. Geophys.*, zvezek 50, str. RG2001, apr. 2012, doi: 10.1029/2011RG000369.
- [4] K. R. Daellenbach idr., »Sources of particulate-matter air pollution and its oxidative potential in Europe,« *Nature*, zvezek 587, št. 7834, str. 414–+, nov. 2020, doi: 10.1038/s41586-020-2902-8.
- [5] N. A. Janssen idr., »Health Effects of Black Carbon,« *WHO*, str. 96, 2012.
- [6] J. Lelieveld idr., »Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio functions,« *Eur. Heart J.*, zvezek 40, št. 20, str. 1590–1596, May 2019, doi: 10.1093/eurheartj/ehz135.
- [7] »The European Green Deal: Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions.« European Commission, 2019. [Splet]. Dostopno na: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>
- [8] M. Rigler idr., »The new instrument using a TC–BC (total carbon–black carbon) method for the online measurement of carbonaceous aerosols,« *Atmospheric Measurement Techniques*, zvezek 13, št. 8, str. 4333–4351, avg. 2020, doi: 10.5194/amt-13-4333-2020.
- [9] N. A. H. Janssen idr., »Black Carbon as an Additional Indicator of the Adverse Health Effects of Airborne Particles Compared with PM₁₀ and PM_{2,5},« *Environmental Health Perspectives*, zvezek 119, št. 12, str. 1691–1699, 2011.
- [10] M. Skvarč, A. Bačnik, S. Kumer Slavič, S. Kregar, J. Žorž in N. Kušar, »Spodbujanje razvoja veščin znanstvenega raziskovanja s formativnim spremljanjem; 'Mednarodni projekt Assessment of Transversal Skills –ATS2020.'« Zavod RS za šolstvo, 2018. [Splet]. Dostopno na: <https://www.zrss.si/pdf/VescineZnanstvene-gaRaziskovanja.pdf>.

- [11] B. Barron and L. Darling-Hamond, »Obeti in izzivi za pristope k učenju, temelječe na raziskovanju.« Zavod RS za šolstvo, 2018. [Splet]. Dostopno na: <https://www.zrss.si/pdf/VescineZnanstvenegaRaziskovanja.pdf>.
- [12] B. Maretič - Požarnik, *Psihologija učenja in pouka: Od poučevanja k učenju*. Ljubljana: DZS, Založništvo in trgovina, d. d., 2018.
- [13] »Učni načrt. Program osnovna šola. Naravoslovje in tehnika.« Zavod RS za šolstvo, 2011. [Splet]. Dostopno na: https://www.gov.si/assets/ministrstva/MIZS/Dokumenti/Osnovna-sola/Ucni-nacrti/obvezni/UN_naravoslovje_in_tehnika.pdf.
- [14] L. W. Anderson, D. R. Krathwohl, str. W. Airasian, K. A. Cruikshank, R. E. Mayer, in str. E. Pintrich, *Taksonomija za učenje, poučevanje in vrednotenje znanja: revidirana Bloomova taksonomija izobraževalnih ciljev*. Ljubljana: Zavod RS za šolstvo, 2016.
- [15] A. Virkkula idr., »A Simple Procedure for Correcting Loading Effects of Aethalometer Data,« *Journal of the Air & Waste Management Association*, zvezek 57, št. 10, str. 1214–1222, okt. 2007, doi: 10.3155/1047-3289.57.10.1214.
- [16] L. Drinovec idr., »The 'dual-spot' Aethalometer: an improved measurement of aerosol black carbon with real-time loading compensation,« *Atmos. Meas. Tech.*, zvezek 8, št. 5, str. 1965–1979, 2015, doi: 10.5194/amt-8-1965-2015.
- [17] P. M. Davy, »Estimating particulate black carbon concentrations using two offline light absorption methods applied to four types of filter media,« *Atmospheric Environment*, str. 10, 2017.
- [18] M. Greilinger, L. Drinovec, G. Močnik in A. Kasper-Giebl, »Evaluation of measurements of light transmission for the determination of black carbon on filters from different station types,« *Atmospheric Environment*, zvezek 198, str. 1–11, feb. 2019, doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.10.017.
- [19] M. Schnaiter, »Absorption amplification of black carbon internally mixed with secondary organic aerosol,« *J. Geophys. Res.*, zvezek 110, št. D19, str. D19204, 2005, doi: 10.1029/2005JD006046.
- [20] J. Sandradewi idr., »Using Aerosol Light Absorption Measurements for the Quantitative Determination of Wood Burning and Traffic Emission Contributions to Particulate Matter,« *Environ. Sci. Technol.*, zvezek 42, št. 9, str. 3316–3323, May 2008, doi: 10.1021/es702253m.
- [21] P. Zotter *et al.*, »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*, zvezek 17, št. 6, str. 4229–4249, mar. 2017, doi: 10.5194/acp-17-4229-2017.
- [22] O. Favez idr., »Inter-comparison of source apportionment models for the estimation of wood burning aerosols during wintertime in an Alpine city (Grenoble, France),« *Atmospheric Chemistry and Physics*, zvezek 10, št. 12, str. 5295–5314, jun. 2010, doi: 10.5194/acp-10-5295-2010.
- [23] A. D. A. Hansen, H. Rosen in T. Novakov, »Real-time measurement of the absorption coefficient of aerosol particles,« *Applied Optics*, zvezek 21, str. 3060, 1982.
- [24] A. D. A. Hansen, *The Aethalometer*, 1. izdaja. Berkeley, California, USA: Magee Scientific Company, 2005.
- [25] M. Ogrin, K. Vintar Mally, A. Planinšek, A. Gregorič, L. Drinovec in G. Močnik, *Nitrogen Dioxide and Black Carbon Concentrations in Ljubljana*, 1. izdaja. Ljubljana: Znanstvena založba Filozofske fakultete Univerze v Ljubljani, 2016.
- [26] T. Cegnar, I. Slatinšek, T. Jesenko, M. Kobold in J. Turšič, »Naše okolje – mesečni bilten Agencije RS za okolje,« Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana, Slovenija, feb. 2020.
- [27] J. Grah idr., *Vključujoča šola: priročnik za učitelje in druge strokovne delavce*, zvezek 1. Ljubljana: Zavod RS za šolstvo, 2017.