

Osnovna šola Gustava Šiliha Laporje



Prezračevanje učilnic

Fizika

Raziskovalna naloga

Avtor: Timi Sterkuš, 8. a

Mentor: Jure Cvahte, prof.

Laporje, 2025

ZAHVALA

Pri raziskovalni nalogi bi se zahvalil učitelju Juretu Cvahtetu za mentorstvo in spodbude pri pisanju tega raziskovalnega dela. Zahvalil bi se tudi učiteljici Barbari Čretnik za razlago dihanja pri človeku ter učiteljici Sanji Šikovec za lektoriranje raziskovalne naloge.

KAZALO VSEBINE

POVZETEK.....	5
ABSTRACT.....	6
1 UVOD.....	7
2 TEORETIČNI DEL	8
2.1 Zrak	8
2.1.1 Kaj je zrak?.....	8
2.1.2 Kakovost zraka.....	8
2.1.3 Zaznavanje in merjenje kakovosti zraka.....	9
2.1.3 Vpliv kakovosti zraka na učenje.....	9
2.2 Ogljikov dioksid	9
2.2.1 Ogljikov dioksid v ozračju.....	9
2.2.2 Ogljikov dioksid v prostorih	11
2.2.3 Vpliv ogljikovega dioksida na počutje	12
2.3 Dihanje	13
2.3.1 Dihanje pri človeku.....	13
2.3.2 Frekvenca dihanja in dihalna prostornina.....	13
2.4 Spreminjanje koncentracije CO ₂ s časom v zaprtem prostoru	14
2.5 Zračenje	15
2.5.1 Načini prezračevanja	15
2.5.1.1 Naravno prezračevanje.....	15
2.5.1.2 Zračenje z odpiranjem oken	16
2.5.1.3 Kanalsko prezračevanje.....	17
2.5.1.4 Prisilno prezračevanje.....	17
3 METODE IN PRIPOMOČKI	18
3.1 Osnovni podatki	18
3.2 Določanje prostornine učilnic in površine oken v učilnicah	19
3.2.1 Prostornina učilnic.....	19
3.2.2 Površine oken v učilnicah	19
3.3 Merjenje koncentracije CO ₂ in O ₂ v razredu	20
3.4 Čas, po katerem je potrebno prezračiti učilnico	22
3.4.1 Izračun povprečnega volumskega pretoka CO ₂ na osebo A pri pouku	22
3.4.2 Določanje volumskega pretoka izdihanega CO ₂ pri posamezniku	23
3.4.2.1 Merjenje koncentracije CO ₂ v izdihanem zraku posameznika.....	23
3.4.2.2 Merjenje volumskega pretoka izdihanega zraka pri posamezniku	25
3.4.2.3 Določanje volumskega pretoka izdihanega CO ₂ pri posamezniku	26
3.4.3 Izračun časa, po katerem je potrebno prezračiti učilnico	26
3.5 Čas zračenja učilnice	27
3.5.1 Izračun volumskega pretoka CO ₂ na m ² odprtega okna B.....	27
3.5.2 Izračun časa zračenja učilnice	28
4 REZULTATI IN RAZPRAVA.....	29
4.1 Čas, po katerem je potrebno prezračiti učilnico	29
4.1.1 Izračun povprečnega volumskega pretoka CO ₂ na osebo A.....	29
4.1.2 Izračun časa, po katerem je potrebno prezračiti učilnico	30
4.2 Čas zračenja učilnice	31
4.2.1 Izračun volumskega pretoka CO ₂ na m ² odprtega okna B.....	31
4.2.2 Izračun časa zračenja učilnice	32
4.3 Excelova predloga za izračun časov zračenja učilnic	32
5 ZAKLJUČEK	34
6 VIRI IN LITERATURA.....	35

KAZALO SLIK

Slika 1: Graf CO ₂ in temperature skozi 400000 letno Zemljino zgodovino (Ritter, 2009) ..	10
Slika 2: Koncentracija CO ₂ v ozračju (Neubauer, 2024)	10
Slika 3: Prikaz koncentracije CO ₂ pri svetovnih krizah (Neubauer, 2024)	11
Slika 4: Vrednost koncentracije CO ₂ v okolju ter posledice za človeka (Šelekar, 2020)....	12
Slika 5: Proces dihanja (Godec, 2016)	13
Slika 6: Vernier-jev spirometer (Romiks, b. d.)	14
Slika 7: Diagram tlaka zraka na steno (Japelj, 1985)	16
Slika 8: Kombinirano okno (Japelj, 1985)	17
Slika 9: Tloris učilnice tehnike in tehnologije	18
Slika 10: Tloris računalniške učilnice	18
Slika 11: Tloris geografske učilnice	19
Slika 12: CO ₂ in O ₂ senzorja na stojalu	20
Slika 13: Graf koncentracije O ₂ v odvisnosti od časa	21
Slika 14: Graf koncentracije CO ₂ v odvisnosti od časa	21
Slika 15: Posoda za merjenje koncentracije O ₂ in CO ₂ v izdihanem zraku	24
Slika 16: Koncentracija CO ₂ v izdihanem zraku	24
Slika 17: Koncentracija O ₂ v izdihanem zraku	25
Slika 18: Merjenje prostornine izdihanega zraka	25

KAZALO TABEL

Tabela 1: Dopustne koncentracije notranjih onesnaževalcev zraka (Uradni list RS, št. 42/2002)	8
Tabela 2: Prikaz vpliva koncentracije CO ₂ na počutje (Lenassi, 2017)	12
Tabela 3: Mere in prostornine učilnic	19
Tabela 4: Mere oken za prezračevanje in njihova skupna površina	20
Tabela 5: Računanje povprečnega volumskega pretoka A na osebo	23
Tabela 6: Skupna prostornina izdihanega zraka pri posameznikih v 30 s	26
Tabela 7: Volumski pretok izdihanega CO ₂ na osebo	26
Tabela 8: Določanje volumskega pretoka CO ₂ na m ² odprtega okna B	27
Tabela 9: Računanje povprečnega volumskega pretoka A na osebo	29
Tabela 10: Volumski pretok izdihanega CO ₂ na osebo A	30
Tabela 11: Določanje volumskega pretoka CO ₂ na m ² odprtega okna B	31

POVZETEK

Prezračevanje učilnic je eden od pomembnih dejavnikov za dobro počutje sodelujočih v vzgojno-izobraževalnem procesu in za kakovostno poučevanje ter učenje, saj ima lahko premajhna koncentracija kisika (O_2) ali prevelika koncentracija ogljikovega dioksida (CO_2) negativne posledice. Koncentracijo CO_2 in O_2 lahko uravnavamo s pravilnim in rednim zračenjem. Prvi cilj te raziskovalne naloge je ugotoviti, po kolikšnem času moramo zračiti določeno učilnico pri določenem številu oseb v njej. Drugi cilj je ugotoviti približno časovno dolžino zračenja učilnice, da se koncentraciji CO_2 in O_2 vrneta na normalno raven. Raziskavo smo delali z učenci 8. a razreda na OŠ Gustava Šiliha Laporje v treh različnih učilnicah. Pri raziskavi smo izvajali meritve s senzorji za merjenje koncentracije O_2 in CO_2 ter spirometrom proizvajalca Vernier. Dobljene podatke smo obdelali z računalniškima programoma Excel in Graphical Analysis. Med raziskovanjem smo oblikovali enačbo, s pomočjo katere lahko izračunamo, po kolikšnem času je potrebno zračiti učilnico glede na velikost učilnice in število oseb v njej. Oblikovali smo tudi poenostavljeno enačbo, s katero lahko izračunamo čas zračenja učilnice pri določeni prostornini učilnice in površini odprtih oken. Na podlagi teh dveh enačb in na podlagi z meritvami določenimi vrednostmi volumskega pretoka CO_2 na osebo $A = 0,00415 \text{ l/s}$ in volumskega pretoka CO_2 skozi m^2 odprtega okna $B = -0,164 \text{ l/sm}^2$, lahko določimo omenjene čase za poljubno velik prostor (učilnico), s poljubno veliko površino odprtih oken in s poljubnim številom oseb. Izračunali smo, da bi učilnico s prostornino 250 m^3 in z 20 osebami (učiteljem in učenci 3. triade) med poukom, kjer so učenci manj fizično aktivni, morali prezračiti približno po 50 minutah. V tem času bi koncentracija CO_2 narasla približno za 1000 ppm (delcev na milijon). Po odprtju 8 m^2 oken ob koncu ure bi morali učilnico zračiti približno 3 minute in pol, da bi se koncentracija CO_2 zmanjšala na začetno vrednost.

Ključne besede: prezračevanje, ogljikov dioksid, koncentracija ogljikovega dioksida, čas zračenja

ABSTRACT

Classroom ventilation is an important factor when it comes to the well-being of pupils, students, and teachers, as too low a concentration of oxygen (O_2) or too high a concentration of carbon dioxide (CO_2) can have negative consequences on the quality of the teaching and learning process. The concentration of CO_2 and O_2 can be regulated with proper and regular ventilation. The first goal of this research paper is to establish when a selected classroom should with a particular number of people in the room be ventilated. The second goal is to establish how long the ventilation should last so that the concentration levels of CO_2 and O_2 return to normal values. The research paper was conducted with the assistance of 8th grade students at the Gustava Šiliha Laporje primary school in three different classrooms. I used CO_2 and O_2 sensors and a spirometer manufactured by Vernier. The results were processed with two computer programmes: Excel and Graphical Analysis. For the purposes of this research, we used an adapted equation to calculate when a certain classroom needs ventilation, considering the size of the classroom and the amount of people in it (students and a teacher). We also used a simplified equation to calculate the ventilation period for a particular classroom, considering the volume of the classroom and the surface of the opened windows. Based on these two equations and based on the selected measurements of CO_2 volume flow that a single person produces ($A = 0,00415$ l/s) and the CO_2 volume flow per cubic meter of an opened window ($B = -0,164$ l/sm²), we can determine the relevant periods for any space (classroom), considering the surface of opened windows and the amount of people in the room. We calculated that a classroom with the volume of 250 m³ and 20 people in it (teacher and students), participating in a lesson during which the students are less active, would need to be ventilated every 50 minutes. During this time, the concentration of CO_2 would have increased by roughly 1000ppm (parts per million). After the opening of windows with a surface of 8 m², the classroom would need to be ventilated for approximately 3 minutes and a half so that the concentration of CO_2 would decrease to the starting value.

Key words: ventilation, carbon dioxide, carbon dioxide concentrations, ventilation period

1 UVOD

Kakovost zraka v učilnicah je pomembna za učinkovito učenje, saj prenizka koncentracija kisika in povišana koncentracija ogljikovega dioksida v zraku negativno vplivata na zbranost in pripravljenost za učenje, kar je v šoli osnovni pogoj za kvalitetno pridobivanje znanja. Zadostno količino kisika v zraku vzdržujemo z rednim prezračevanjem prostorov. Pravilno prezračevanje ne vpliva samo na učinkovito učenje, ampak v zimskih mesecih zmanjša porabo energije za ogrevanje prostorov. Cilj raziskovalne naloge je ugotoviti, ali lahko z osnovnošolskim znanjem najdemo način, s katerim lahko določimo, po kolikšnem času pouka je potrebno prezračiti poljubno veliko učilnico s poljubnim številom oseb in koliko časa jo moramo zračiti, da se ravni kisika in ogljikovega dioksida vrnete na normalno vrednost. Pri raziskavi bomo izvajali meritve s senzorji za določanje koncentracije kisika in ogljikovega dioksida v zraku. Meritve bomo opravili večkrat in pri tem pazili, da bodo stranski pogoji (aktivnost oseb, minimalni dotok zunanjega zraka, zunanje vetrovne razmere, minimalni preprih pri zračenju, odprtost oken na isti strani, prazna učilnica med zračenjem in podobno) enaki.

Prvi cilj raziskave je zapisati enačbo, ki nam pove, po kolikšnem času je potrebno zračiti učilnico glede na njeno prostornino in število učencev v njej. Drugi cilj raziskave pa je zapisati enačbo, s katero lahko izračunamo čas zračenja učilnice glede na njeno prostornino in površino odprtih oken.

Na podlagi tega smo si zastavili dve raziskovalni vprašanji:

- Po kolikšnem času je potrebno zračiti učilnico glede na prostornino učilnice in število oseb v njej? Po kolikšnem času koncentracija CO_2 v učilnici s prostornino 250 m^3 in 20 osebami naraste za 1000 ppm?
- Koliko časa je treba zračiti učilnico glede na njeno prostornino in površino odprtih oken? Koliko časa moramo zračiti učilnico s prostornino 250 m^3 in s površino odprtih oken 8 m^2 , da se koncentracija CO_2 zniža za 1000 ppm?

Na podlagi vprašanj smo zapisali dve hipotezi:

- V učilnici s prostornino 250 m^3 in 20 osebami koncentracija CO_2 naraste za 1000 ppm po 45 minutah.
- Koncentracija CO_2 v prostoru se zniža za 1000 ppm, če učilnico s prostornino 250 m^3 po odprtju oken s skupno površino 8 m^2 zračimo 2 minuti.

Raziskovalna naloga je razdeljena na štiri poglavja, in sicer na teoretični del, metodologijo, rezultate in razpravo ter zaključek.

V teoretičnem delu je opisano, kaj je ogljikov dioksid, koliko ga je v zraku in kako njegove povečane koncentracije vplivajo na počutje in zdravje ljudi. Navedeno je, kako se meri koncentracija ogljikovega dioksida v zraku in kako ta narašča s časom v zaprtem prostoru, če je v njem izvor le-tega. Razloženo je tudi, kaj je zračenje, katere vrste zračenja poznamo in kateri so dejavniki, ki vplivajo nanj. V poglavju metode in pripomočki so navedene metode dela, ki so bile uporabljene pri raziskavi. V tem delu je opisano, kako smo izvajali meritve, s katerimi pripomočki in kako smo izmerjene vrednosti uporabili pri računanju posameznih iskanih količin. Glavne meritve smo izvajali z Vernierjevimi senzorji za merjenje koncentracije CO_2 in O_2 ter s spirometrom. Dobljene podatke smo obdelali z računalniškima programoma Excel in Graphical Analysis. V poglavju Rezultati in razprava so navedeni ključni izračuni, rezultati ter ugotovitve s komentarji, med drugim tudi potrditev hipotez. V zaključku so navedeni samo bistveni sklepi in ugotovitve. Zapisano je tudi, kaj bi lahko pri raziskovalni nalogi izboljšali ter kaj bi bilo smiselno na temo prezračevanja učilnic še dodatno raziskati.

2 TEORETIČNI DEL

2.1 Zrak

2.1.1 Kaj je zrak?

Zrak je zmes plinov. V Zemljinem ozračju prevladujeta dušik (78,08 %) in kisik (20,94 %). Preostanek so predvsem žlahtni plini (na primer argon, 0,94 %) in ostali plini 0,01 %. Podatki se nanašajo na zemeljsko ozračje, ampak ne vključujejo vodne pare in vodnih hlapov, ki lahko predstavljajo od 0 % do 7 % plinov v zraku (Smrdu, 2011).

Trenutna koncentracija ogljikovega dioksida je približno 426 ppm, kar predstavlja delež 0,0426 % vseh plinov v zraku. Pred industrijsko revolucijo je bil delež ogljikovega dioksida 0,027 %, od takrat do danes pa se je povečal za 150 ppm. Enota ppm (angl. ppm – particles per million) pomeni število delcev na milijon in je enaka deležu 0,0001 % (Neubauer, 2024).

2.1.2 Kakovost zraka

Ob naftni krizi v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja so ljudje spoznali, da moramo varčevati z energijo. Graditi so začeli čim bolj zrakotesne stavbe. Posledično se je poslabšala kakovost notranjega zraka, kar je imelo vpliv na zdravje ljudi, ki so prebivali v njih.

Pri določanju kakovosti notranjega zraka se upoštevajo vrste in količine onesnaževal, ki lahko povzročijo neugodje in pomenijo tveganje za zdravje človeka, živali in rastlin. Kakovost zraka se nanaša na eno ali več primesi v zraku. Občutek udobja v prostoru je odvisen od čistega zraka, toplote v prostoru, primerne osvetlitve, ravni hrupa in podobno. Najbolj dovzetni za zaznavanje kakovosti zraka so otroci in starejši ter osebe s kroničnimi boleznimi dihal. Večina ljudi je prepričanih, da je onesnažen samo zunanji zrak. V resnici pa je lahko zrak v notranjih prostorih bolj onesnažen kot zunanji zrak (Šelekar, 2020).

V pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Uradni list RS, št. 42/2002) so zapisane tehnične zahteve glede prezračevanja in klimatizacije. V členih od 7. do 10. je določeno, kakšen mora biti zrak v prostoru (brez vonjav, ne sme ogrožati zdravja ljudi). V prilogi 1 tega pravilnika je določena tudi največja dovoljena koncentracija ogljikovega dioksida. Ta znaša 3000 mg/m³, kar je 1667 ppm (Uradni list RS, št. 42/2002).

	Enota	Dopustna vrednost
Ogljikov dioksid* (CO ₂)	mg/m ³	3.000
Radon** (Rn)	Bq/m ³	400
Amoniak in amini*** (NH ₃)	μg/m ³	50
Formaldehid**** (H ₂ CO)	μg/m ³	100
Hlapne organske snovi***** (VOC)	μg/m ³	600
Ogljikov monoksid (CO)	μg/m ³	10
Ozon (O ₃)	μg/m ³	100
Masna koncentracija lebdečih trdnih delcev frakcije PM ₁₀ *****	μg/m ³	100

Tabela 1: Dopustne koncentracije notranjih onesnaževal zraka (Uradni list RS, št. 42/2002)

* Koncentracija CO₂ v prostoru z vključeno zunanjo koncentracijo CO₂ 700 μg/m³ in emisijami CO₂ ljudi.

2.1.3 Zaznavanje in merjenje kakovosti zraka

Za zaznavanje kakovosti zraka imamo ljudje dve vrsti čutil: čutila v nosni votlini, ki zaznavajo vonjave, in čutila za splošni, "kemični" občutek kakovosti zraka. Ta so v sluznici nosu in očeh. Obe vrsti čutil se odzivata na več kot 100.000 različnih kemijskih spojin v zraku. Občutek kakovosti zraka določajo skupni odzivi obeh vrst čutil. Zrak zaznavamo kot svež in prijeten, zatohel, iztrošen ali dražeč. Takšno ocenjevanje je seveda subjektivno. Ustrezne meje sprejemljivosti je zato težko določiti. Subjektivno ocenjevanje kakovosti zraka ne vključuje vseh onesnaževal, saj nekaterih ne zaznamo, tudi če so prisotne v visokih koncentracijah. Zaradi subjektivnosti pri zaznavanju kakovosti zraka se uporabljajo merilne naprave, ki natančno izmerijo koncentracijo določenega onesnaževala v zraku (Šelekar, 2020).

2.1.3 Vpliv kakovosti zraka na učenje

Na kakovost učenja v učilnici vpliva veliko dejavnikov: svetloba, hrup, toplota, temperatura, kakovost zraka ... Predvsem zadnji dejavnik je pomemben za kakovostno učenje, zdravje in dobro počutje. Kvaliteten zrak, v katerem se dobro počutimo, lahko dobro delamo in se učimo, je zrak, v katerem CO₂ ne presega mejnih vrednosti, ki so priporočene oziroma določene v standardih (Stanfield, 2010 in Persily, 2022).

2.2 Ogljikov dioksid

Ogljikov dioksid ali na kratko CO₂ je binarna spojina, sestavljena iz enega atoma ogljika in dveh atomov kisika. Te atome povezuje polarna kovalentna vez. Njegova molska masa je 44,010 g/mol, gostota pa 1,977 g/L (pri standardni temperaturi in tlaku, torej pri 1 atmosferi in 0° Celzija, v nadaljevanju: STP). Zavzema majhen delež Zemljinega ozračja, kjer deluje kot toplogredni plin. Nastaja med izgorevanjem organskih snovi (če je na voljo zadostna količina kisika) in pri celičnem dihanju, številni mikroorganizmi pa ga proizvajajo pri fermentaciji. Rastline ga porabljajo pri fotosintezi – procesu, v katerem se ogljik in kisik uporabljata za sintezo ogljikovih hidratov. Je brezbarven plin, ki ob vdihavanju v visokih koncentracijah povzroči v ustih kisel okus, v nosu in grlu pa pekoč občutek (povzroča ga ogljikova kislina, ki nastaja ob raztapljanju ogljikovega dioksida v sluznici). Ker ima CO₂ (1,977 g/L) večjo gostoto od kisika O₂ (1,429 g/L) in dušika N₂ (1,2506 g/L) se po navadi nahaja bližje tlu kot ostala dva elementa (Smrdu, 2011).

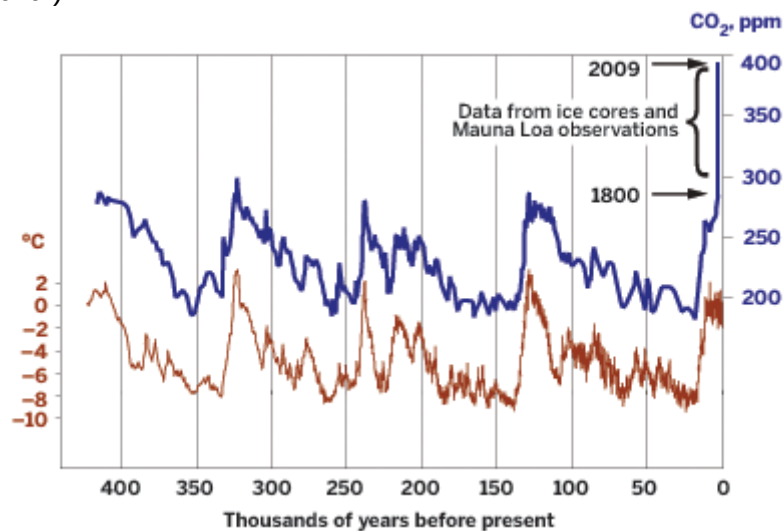
2.2.1 Ogljikov dioksid v ozračju

Ogljikov dioksid je toplogredni plin, ki v ozračju ostane tudi stoletja (za primerjavo: plin metan ostane v ozračju od 10 do 15 let). Skupaj z drugimi toplogrednimi plini v ozračju (vodno paro, metanom, dušikvim oksidom, ozonom in tako dalje) v zemeljskem sistemu zadržuje energijo, ki na naš planet prihaja s Sonca, in prepreči, da bi v celoti ušla nazaj v vesolje. Ta pojav se imenuje učinek tople grede (Slovenija znižuje CO₂, b. d.).

Starodavni mehurčki zraka, ujeti v ledenikih, nam omogočajo vpogled v stanje ozračja in podnebja pred davnimi časi. Tako lahko izvemo, da je bila koncentracija CO₂ v ozračju v času ledenih dob približno 200 ppm, v toplejših vmesnih obdobjih pa približno 280 ppm. Dolga tisočletja ni nikoli presegla 300 ppm. (Slovenija znižuje CO₂, b. d.).

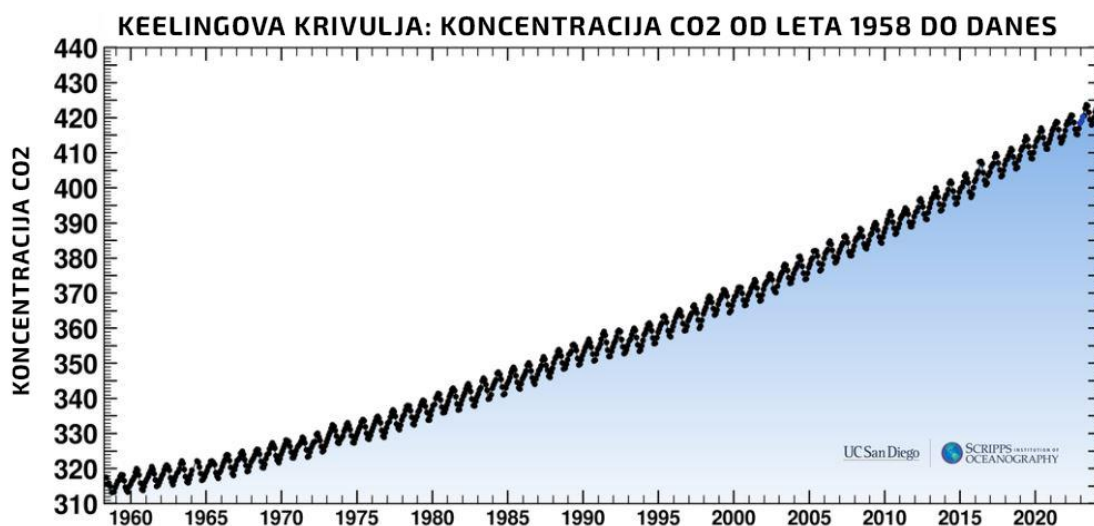
Za obdobje holocena, od konca zadnje ledene dobe pred približno 10.000 leti, je značilna stabilnost zemeljskega podnebne sistema. V tem obdobju stabilnosti, v katerem so se pojavljale, razvijale in uspevale človeške civilizacije, so bili naravni viri CO₂ (dihanje živali in rastlin) uravnoteženi z naravnimi ponori CO₂ (oceani in rastline, ki CO₂ porabijo v procesu fotosinteze). Rezultat tega naravnega ravnotežja so bile le majhne spremembe vsebnosti CO₂ v atmosferi v zadnjih 10.000 letih. To ravnotežje pa so porušile dodatne količine CO₂, ki jih v atmosfero sprošča človek s svojimi dejavnostmi. (Slovenija znižuje CO₂, b. d.).

Od začetka industrijske revolucije, še posebno pa od sredine 20. stoletja, se je raven CO_2 v ozračju povečala za približno 40 %. Ker so v tem obdobju človeške dejavnosti postale glavni vzrok globalnih okoljskih sprememb, je nova era dobila ime antropocen. (Slovenija znižuje CO_2 , b. d.).



Slika 1: Graf CO_2 in temperature skozi 400.000 let Zemljine zgodovine (Ritter, 2009)

K povečanju vsebnosti CO_2 je največ prispevalo kurjenje fosilnih goriv (nafta, premoga in zemeljskega plina), pa tudi od človeka povzročene spremembe pri industrijski revoluciji in uničevanje ekosistemov (predvsem uničevanje gozdov) in s tem zmanjšanje njihove zmožnosti, da iz ozračja izločijo CO_2 . Porast vsebnosti CO_2 v ozračju v zadnjem stoletju kaže tesno povezavo s količino porabljenih fosilnih goriv. Ob njihovem izgorevanju namreč približno 45 % nastalih izpustov CO_2 ostane v ozračju (Slovenija znižuje CO_2 , b. d.).

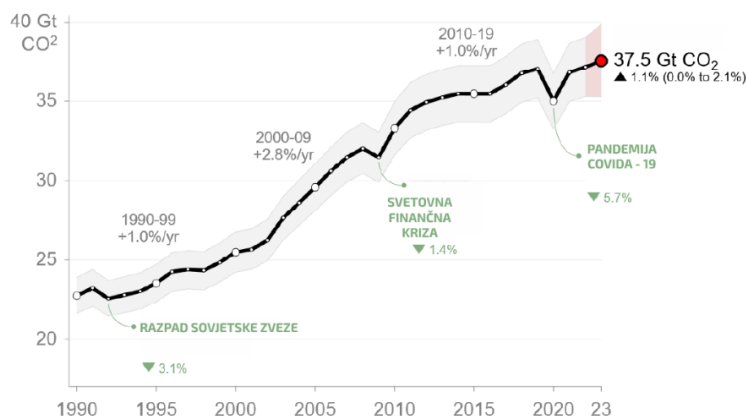


Slika 2: Koncentracija CO_2 v ozračju (Neubauer, 2024)

Krivulja prikazuje povečevanje CO_2 v ozračju od leta 1958 do danes. Imenuje se Keelingova krivulja, po Charlesu Keelingu. Krivulja je vijugasta zaradi menjave letnih časov. V času, ko je na severni polobli (ki ima veliko več kopnega kot južna polobla) pomlad in poletje, rastline ozelenijo in porabljajo CO_2 za fotosintezo, zato so koncentracije tega toplogrednega plina v ozračju manjše kot pozimi. Pri tem je treba navesti, da velik del dodatnega CO_2 , ki ga izpuščamo ljudje (predvsem s kurjenjem premoga, nafte in plina), posrkajo rastline in oceani. Le-ti zato postajajo vse bolj kisli. V ozračju tako ostaja le nekaj več kot polovica

presežnega CO₂, ki je posledica človekovih izpustov. Ta dodatni CO₂ se akumulira, torej ga je iz leta v leto več.

V naravi CO₂ ni statičen. Pri nekaterih naravnih procesih nastaja, pri drugih se absorbira. Atmosfera, tla z biosfero (to je ekološki sistem, ki vključuje vsa živa bitja na Zemlji) in oceani izmenjujejo ogljik – to kroženje imenujemo ogljikov cikel. Rastline vežejo CO₂, ta postaja sestavina organske snovi, ki jo porabljajo živali in mikroorganizmi. Slednji razkrajajo mrtve živali in rastline, ogljik pa se v obliki CO₂ vrača v vodo in atmosfero. Izmenjava CO₂ med oceani in ozračjem je izjemno pomembna. Kopenski in oceanski ogljik sta bila tisočletja v ravnovesju, vse do industrijske revolucije, ko je koncentracija CO₂ v zraku začela naraščati (Neubauer, 2024).



Slika 3: Prikaz koncentracije CO₂ pri svetovnih krizah (Neubauer, 2024)

Graf prikazuje in dokazuje, da je človekova dejavnost velik vzrok za povečanje CO₂ v ozračju. Ob vsaki večji krizi, kot so razpad Sovjetske zveze (1991), finančna kriza (2008) in COVID-19 (2020), gre krivulja navzdol, saj je človeštvo v tem času porabilo manj premoga, nafte in plinov (Neubauer 2024).

2.2.2 Ogljikov dioksid v prostorih

V pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Uradni list RS, št. 42/2002) so zapisane tehnične zahteve za prezračevanje in klimatizacijo. V členih od 7. do 10. je določeno, kakšen mora biti zrak v prostoru (brez vonjav, ne sme ogrožati zdravja ljudi). V prilogi 1. pravilnika je določena največja dovoljena koncentracija ogljikovega dioksida. Ta znaša 3000 mg/m³, kar je 1667 ppm (Uradni list RS, št. 42/2002).

Pretvornik za koncentracijo snovi iz mg/m³ v ppm je prikazan na enačbi spodaj:

$$C \left[\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right] = 0,0409 \cdot C[\text{ppm}] \cdot M$$

Pri tem velja:

$C \left[\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right]$ je koncentracija snovi (v tem primeru ogljikovega dioksida) v miligramih na kubični meter,

$C[\text{ppm}]$ je koncentracija snovi (v tem primeru ogljikovega dioksida) v ppm (delov na milijon), M je molska masa.

Po standardih ASHRAE naj bi bila mejna koncentracija CO₂ v notranjih delovnih prostorih 1500 ppm. Na Japonskem je mejna vrednost določena še nižje (1000 ppm). Tam vsako leto testirajo na tisoče stavb, ali ustrezajo tem zahtevam (Pirsily, 2022).

2.2.3 Vpliv ogljikovega dioksida na počutje

Raziskave kažejo, da se človek počuti udobno, če je koncentracija CO₂ manjša od 1000 ppm. Koncentracija CO₂ je dober kazalnik kakovosti zraka, če v prostoru ni drugih snovi, ki onesnažujejo zrak. V spodnji tabeli je prikazano, kako določene koncentracije CO₂ vplivajo na počutje in zdravje ljudi. (Lenassi, 2017)

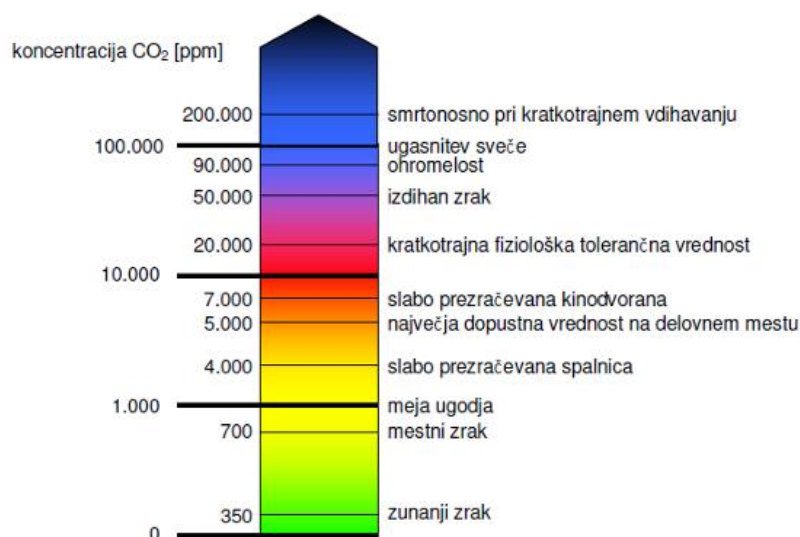
420 ppm	Normalni zunanji zrak na podežlju.
420–1000 ppm	Normalna koncentracija CO ₂ v zaprtih prostorih z dobrim prezračevanjem. Počutje je dobro.
1000–2000 ppm	Občutimo lažjo vrtoglavico, zato se težje koncentriramo, lahko postanemo utrujeni in zrak bi opisali kot nekoliko zatohel.
2000–5000 ppm	Hujše negativne posledice, na primer glavobol, utrujenost, zaspanost. Zrak bi opisali kot stoječ in zatohel.
> 5000 ppm	Možnost lažje zastrupitve z ogljikovim dioksidom*.
> 40.000 ppm	Takoj škodljivo zaradi povečane koncentracije ogljikovega dioksida in pomanjkanja kisika**.

Tabela 2: Prikaz vpliva koncentracije CO₂ na počutje (Lenassi, 2017)

* Prvi znaki zastrupitve z ogljikovim dioksidom so občutek dušenja, hitro in globoko dihanje, hiter srčni utrip, omotica, utrujenost, glavobol ter motnje vida, koordinacije in presoje.

** Pojavijo se lahko bruhanje, krči in izguba zavesti. Primer so zastrupitve z ogljikovim dioksidom v vinskih kletih, ki so na koncu lahko tudi usodne.

V tabeli 2 je prikazano, v katerih primerih nastane posamezna koncentracija ogljikovega dioksida v zunanjem in notranjem okolju ter kakšne so posledice za zdravje v takih okoljih. Diagram prikazuje vpliv koncentracije CO₂ na počutje ljudi. Koncentracija CO₂ zunaj, na neonesnaženem območju, je približno 400 ppm. V mestih lahko koncentracija CO₂ naraste do približno 700 oziroma 800 ppm. Koncentracija je v tem primeru večja zaradi intenzivnega prometa, ogrevalnih naprav ... ter zaradi manj zelenih površin (Šelekar, 2020).



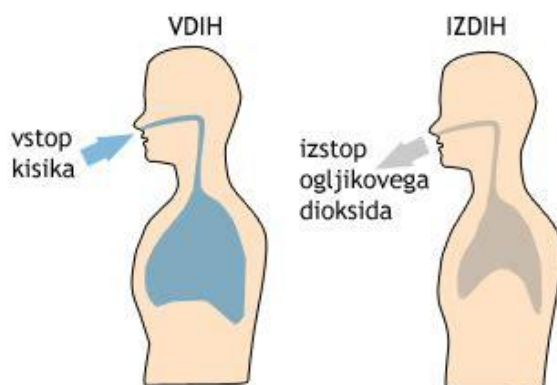
Slika 4: Vrednost koncentracije CO₂ v okolju in posledice za človeka (Šelekar, 2020)

2.3 Dihanje

2.3.1 Dihanje pri človeku

V dihalih se med okoljem in našim organizmom izmenjujeta kisik (O_2) in ogljikov dioksid (CO_2). Kisik preko dihal vstopi v telo, nato potuje po krvi do vseh celic. Po drugi strani pa celice izločajo ogljikov dioksid, ki po krvi potuje do dihal, kjer se z izdihom izloči (Bernard, 2023).

Zrak, ki ga vdihnemo, ima približno 21 % kisika, 0,04 % ogljikovega dioksida in 78 % dušika. Izdihan zrak vsebuje približno 16 % kisika, 4,5 % ogljikovega dioksida in isto količino dušika kot vdihan zrak, saj se dušik v telesu ne porablja. Izdihan zrak je nasičen z vodno paro, ki se na prostem shladi in utekočini. Pljuča torej poleg CO_2 izločajo tudi vodo (Bernard, 2023). Pljučno ali zunanje dihanje je gibanje zraka v pljučne mešičke (vdih) in iz njih (izdih) ter prehajanje dihalnih plinov iz pljučnih mešičkov v kri in obratno. Kisik iz notranjosti pljučnih mešičkov vstopi v kri. S krvjo po kapilarah potuje do različnih tkiv. V tkivih kisik izstopi iz krvi v medcelične prostore in naprej v celice. V celicah se porabi pri celičnem dihanju. Celice v medceličnino izločijo ogljikov dioksid, ki nastaja pri dihanju. Od tam preide v kri in po krvi potuje do pljuč, kjer vstopi v pljučne mehurčke in se z izdihom izloči iz telesa (Bernard, 2023).



Slika 5: Proces dihanja (Godec, 2016)

Količino (prostornino) izdihanega ogljikovega dioksida na časovno enoto imenujemo tudi volumski pretok CO_2 . Odvisen je od starosti, teže in višine osebe, spola in predvsem od aktivnosti osebe. Približno do 15. leta starosti se količina izdihanega ogljikovega dioksida ne razlikuje glede na spol. Nad to starostjo pa se začne razlikovati. Moški so višji, v povprečju težji in zato ustvarjajo več ogljikovega dioksida na časovno enoto kot ženske in otroci. Dejavnik, ki najbolj vpliva na prostornino izdihanega CO_2 pa je aktivnost osebe, saj v splošnem velja, da pri večji fizični aktivnosti osebe, le-ta ustvarja več CO_2 (Godec, 2016).

2.3.2 Frekvenca dihanja in dihalna prostornina

Frekvenca dihanja zdravega odraslega človeka je 16- do 20-krat v minuti. Otroci dihamo nekoliko hitreje, starejši ljudje počasneje. Hitrost dihanja je odvisna od različnih dejavnikov. Nanjo vplivajo telesna aktivnost, vznemirjenje, povišana telesna temperatura ... Ob večji telesni aktivnosti celice našega telesa porabljajo več kisika, zato se frekvenca dihanja poveča, da se s tem poveča dotok kisika v telo. Med mirovanjem se v pljučih nikoli ne izmenja zrak v celoti, ampak le del zraka. Količino zraka, ki se izmenja, imenujemo dihalna prostornina (respiracijski volumen). Dihalno prostornino lahko merimo s pomočjo instrumenta, ki se imenuje spirometer (Bernard, 2023).

Vitalna kapaciteta pljuč je količina zraka, ki ga lahko sprejmejo pljuča pri najglobljem vdihu. Meri se s spirometrom. Preiskovanec vdihne kar se da globoko, nato pa na vso moč izdihne zrak in izdihuje, kolikor dolgo lahko. Naprava pokaže količino izdihanega zraka pri največjem možnem vdihu. Vitalna kapaciteta je običajno približno 3,5 litrov zraka, lahko pa znaša tudi do 6 litrov zraka (Bernard, 2023).



Slika 6: Vernierjev spirometer (Romiks, b. d.)

2.4 Spreminjanje koncentracije CO₂ s časom v zaprtem prostoru

Koncentracija CO₂ v prostoru je odvisna od volumna zraka v prostoru, izvora CO₂ v prostoru (v našem primeru CO₂ nastaja zaradi dihanja oseb v prostoru), volumskega pretoka svežega zraka in od koncentracije CO₂ v zunanjem zraku (Prek, 2013).

Spreminjanje koncentracije CO₂ s časom v prostoru ponazarja spodnja enačba:

$$V \cdot \frac{dc}{dt} = G + \dot{V} \cdot (c_e - c)$$

V – efektivni volumen zraka v prostoru

dc – sprememba koncentracije CO₂

dt – sprememba časa

G – izvor CO₂ v prostoru

$\dot{V}$ – volumski pretok svežega zraka

c_e – koncentracija CO₂ v zunanjem zraku

c – koncentracija CO₂ v prostoru

Ker je volumski pretok svežega zraka zaradi zaprtega prostora, v katerem so zaprta okna in vrata, v našem primeru zanemarljiv, ostane od enačbe:

$$V \cdot \frac{dc}{dt} = G$$

V našem primeru G predstavlja prostornino CO₂, ki jo v eni sekundi proizvedejo vse osebe v prostoru. Zaradi lažjega razumevanja in računanja konstanto G zapišemo:

$$G = A \cdot n$$

Konstanta A predstavlja povprečen volumski pretok CO₂ na osebo in pomeni, koliko litrov CO₂ v povprečju proizvede ena oseba na sekundo. Spremenljivka n predstavlja število oseb v prostoru. Volumski pretok izdihanega CO₂ A [l/s] določimo na osnovi aktivnosti oziroma metabolizma M [W/m²] in površine kože človeka S_{Du} [m²]:

$$A = 4 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot S_{Du}$$

Povprečna sedeča odrasla oseba pri lahkem delu ($M = 70 \text{ W/m}^2$ in $S_{Du} = 1,8 \text{ m}^2$) izdiha približno $0,005 \text{ l/s}$ (18 l/h) CO_2 (Prek, 2013).

Nekoliko poenostavljena enačba za spremembo koncentracije CO_2 v zaprtem prostoru s stalnim številom oseb je:

$$\Delta C = \frac{A \cdot n \cdot t}{V}$$

A – povprečen volumski pretok CO_2 na osebo

ΔC – sprememba koncentracije CO_2

V – prostornina učilnice

n – število oseb

t – čas

2.5 Zračenje

Z zračenjem v prostore dovajamo svež zrak. Zrak se "kviri":

- s trdimi delci (prah),
- s povečanjem vlage (potenje),
- s plinastimi snovmi (vonjave, dim),
- zaradi padanja koncentracije kisika,
- zaradi povečevanja koncentracije ogljikovega dioksida.

Glede na to kako močno se kviri zrak, je treba v prostor dovajati novega in ga – enako količino – tudi odvajati iz prostora. Prezračevanje je lahko občasno ali stalno. Vedno pa mora sveži zrak izpodriniti ves pokvarjeni zrak iz prostora.

Izračuni so pokazali, da je treba dovesti v prostor približno $20 \text{ m}^3/\text{h}$ zraka na osebo, če v prostoru ni drugih izvorov onesnaževal zraka.

Količina svežega zraka mora biti tolikšna, da koncentracija škodljivih snovi v zraku ne preseže človeku nevarne meje. Zračenje naj bo takšno, da ne bo prepiha, saj v tem primeru hitro premikajoči se zrak preveč ohlaja ljudi v prostoru. Z občasnim prezračevanjem (odpiranjem oken) se težko izognemo prepihu, zato je bolj priporočljivo stalno prezračevanje (Japelj, 1985).

2.5.1 Načini prezračevanja

V osnovi ločimo štiri načine prezračevanja:

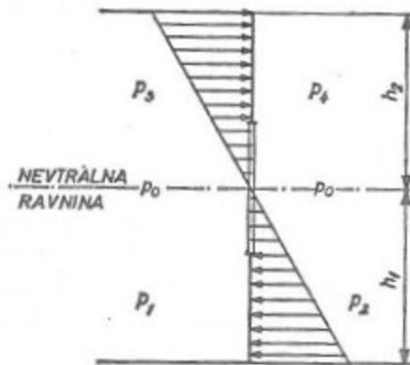
- naravno prezračevanje,
- zračenje z odpiranjem oken,
- kanalsko prezračevanje,
- prisilno prezračevanje (Japelj, 1985).

2.5.1.1 Naravno prezračevanje

Zrak vdira v prostor skozi reže pri oknih, pri vratih, pa tudi skozi steno. To vdiranje je močnejše, če je zunaj mraz, v prostoru pa vroče ali če je zunaj stavbe veter. Količine zraka, ki pride na ta način v prostor, ne moremo natančno izračunati. V modernih stavbah, kjer so okna in vrata dobro zatesnjena, je količina naravnega prezračevanja zelo majhna (Japelj, 1985).

2.5.1.2 Zračenje z odpiranjem oken

To je občasno prezračevanje, ki nastane pri odpiranju oken. Okna morajo biti odprta dovolj dolgo, da se zrak v prostoru izmenja in da obkroži vse ploskve.



Slika 7: Diagram tlaka zraka na steno (Japelj, 1985)

Slika 7 prikazuje gibanje zraka zaradi razlike tlakov med hladnejšim zunanjim (desno) in toplejšim notranjim (levo) zrakom. Sredini višine prostora pravimo nevtralna ravnina, saj je na tej višini tlak p_0 zunaj in znotraj prostora enak. Okno je na sredi stene, zato je tlak na sredi okna zunaj in znotraj enak. Pod nevtralno ravnino se tlak veča.

V prostoru je tlak pri tleh:

$$p_1 = p_0 + \rho_t \cdot g \cdot h_1$$

Zunaj na isti višini pa:

$$p_2 = p_0 + \rho_h \cdot g \cdot h_1$$

Ker ima hladen zrak zunaj večjo gostoto od toplega v prostoru, je zunanji tlak p_2 večji od notranjega tlaka p_1 . Posledica tega je, da zrak pod nevtralno ravnino priteka iz zunanosti v prostor. Nad nevtralno ravnino se tlak manjša.

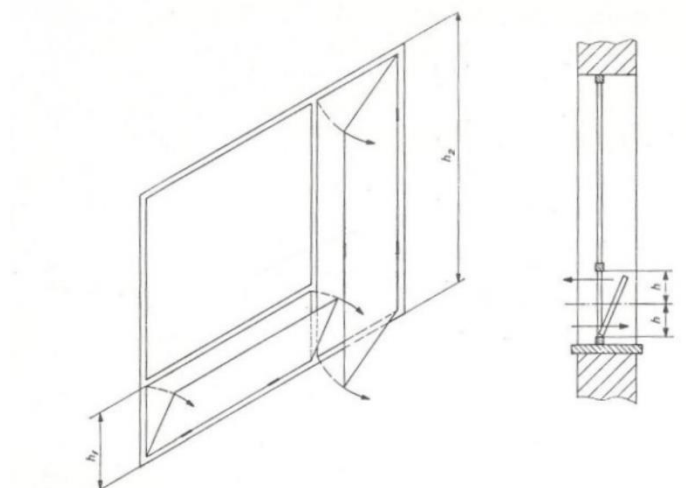
V prostoru je tlak pod stropom:

$$p_3 = p_0 - \rho_t \cdot g \cdot h_2$$

Zunaj na isti višini pa:

$$p_4 = p_0 - \rho_h \cdot g \cdot h_2$$

Ker ima hladen zrak zunaj večjo gostoto od toplega v prostoru, je notranji tlak p_3 večji od zunanjega tlaka p_4 . Posledica tega je, da zrak nad nevtralno ravnino odteka iz prostora v zunanost.



Slika 8: Kombinirano okno (Japelj, 1985)

Višje je okno, večja je razlika med zunanjim in notranjim tlakom na zgornjem ter spodnjem robu okna in posledično je izmenjava zraka hitrejša, zato je za intenzivno prezračevanje potrebno odpreti visoka okna. Če želimo manj intenzivno prezračevanje, je smiselno odpreti nižja okna. Težave pri tej vrsti prezračevanja se pojavijo, ko sta notranja in zunanja temperatura približno enaki. V tem primeru je razlika tlakov zelo majhna, s tem pa tudi pretok zraka (Japelj, 1985).

2.5.1.3 Kanalsko prezračevanje

Kanalsko prezračevanje je prezračevanje s pomočjo prezračevalnih kanalov, ki se najpogosteje uporablja v večstanovanjskih stavbah. Takšno prezračevanje poteka dobro pri višji temperaturni razliki med notranjim in zunanjim zrakom, težave pa nastopijo, ko sta zunanja in notranja temperatura zraka enaki (Japelj, 1985).

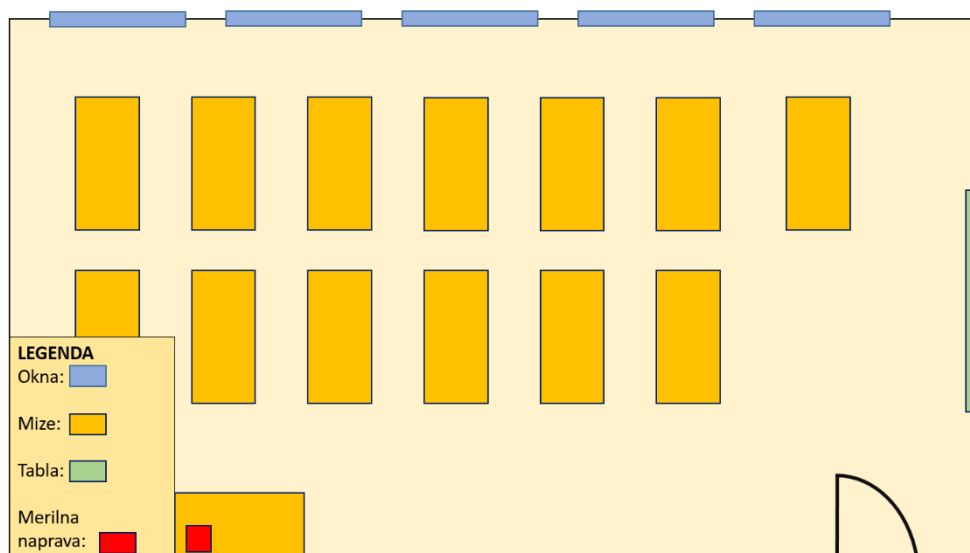
2.5.1.4 Prisilno prezračevanje

S tem načinom prezračevanja zagotovimo v vseh letnih časih enakomerno izmenjavo zraka. Enakomerni pretok zagotavljajo ventilatorji, ki poskrbijo za konstanten volumski pretok zraka. Prezračevanje je lahko centralno ali lokalno. Pri centralnem prezračevanju glavni ventilator v centralni napravi potiska zrak po ceveh v več prostorov hkrati. V centralni napravi je po navadi tudi drugi ventilator, ki skrbi, da se po odvodnih ceveh iz prostorov odvaja onesnažen zrak. Pri lokalnem prezračevanju ima vsaka soba svoj ventilator, ki vanjo dovaja zunanji zrak. Zrak iz prostora lahko odteka sam ali pa ga odsesava drugi ventilator (Japelj, 1985).

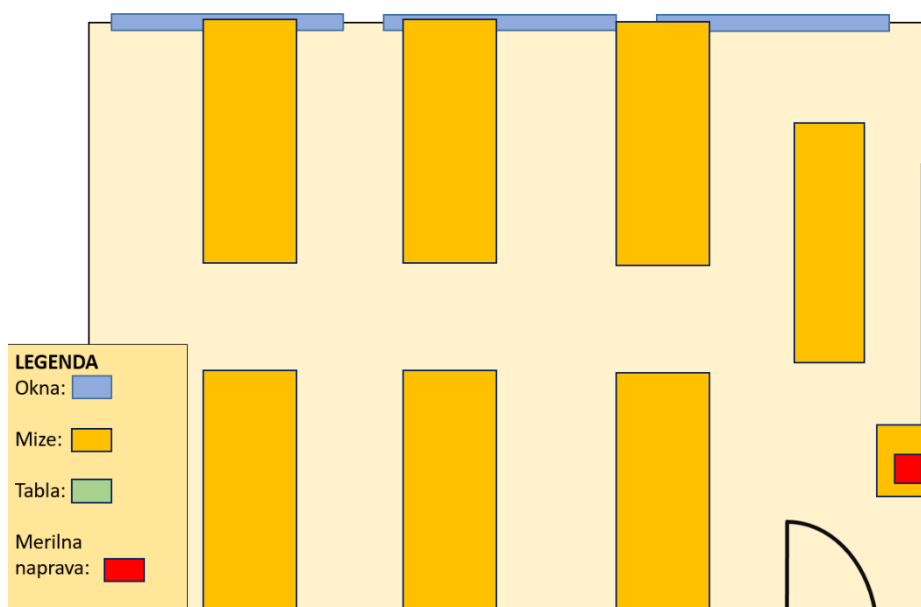
3 METODE IN PRIPOMOČKI

3.1 Osnovni podatki

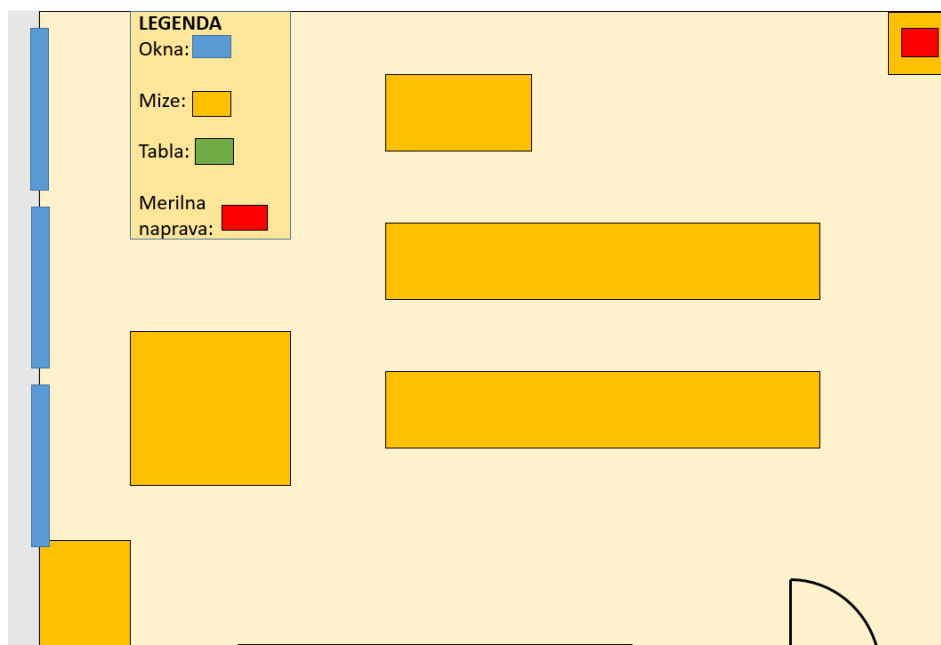
Meritve koncentracije CO₂ in O₂ smo izvajali v 8. a razredu OŠ Gustava Šiliha Laporje, kjer je 18 učencev. Število oseb pri meritvah se je spreminjalo odvisno od tega, koliko učencev je manjkalo in koliko učiteljev je bilo v razredu. Izvedli smo štiri meritve med dvojnimi (blok) urami, kar pomeni, da so trajale 90 minut brez odmora. V geografski učilnici pri pouku geografije smo meritev izvedli 16. 1. 2024, v računalniški učilnici pri pouku geografije 19. 1. 2024, v tehniški učilnici pri pouku fizike pa 13. 11. 2024 in 17.11. 2024. Na slikah 9, 10 in 11 so prikazane skice tlorisov omenjenih učilnic, v tabeli 3 pa mere učilnic.



Slika 9: Tloris tehniške učilnice



Slika 10: Tloris računalniške učilnice



Slika 11: Tloris geografske učilnice

3.2 Določanje prostornine učilnic in površine oken v učilnicah

3.2.1 Prostornina učilnic

Vse učilnice, v katerih smo izvajali meritve, imajo obliko kvadra. Za izračun njihove prostornine smo uporabili obrazec za izračun prostornine kvadra:

$$V = a \cdot b \cdot c$$

V – prostornina

a – dolžina

b – širina

c – višina

V spodnji tabeli so navedene mere učilnic, ki smo jih izmerili z merilnim trakom, v spodnji vrstici pa so izračunane prostornine učilnic s pomočjo zgornje enačbe.

Učilnica	Dolžina [m]	Širina [m]	Višina [m]	Prostornina [m ³]
TIT	10,22	6,74	3,70	251,9
RAČ	7,88	6,66	3,81	200,0
GEO	8,30	7,30	4,20	254,5

Tabela 3: Mere in prostornine učilnic

3.2.2 Površine oken v učilnicah

Učilnice smo zračili tako, da smo odprli tri okna na isti strani učilnice. Vsa okna so pravokotne oblike in enako visoka, vendar ne povsod enako široka. Za izračun njihove površine smo uporabili obrazec za izračun ploščine pravokotnika:

$$S = a \cdot b$$

S – skupna površina oken
 a – skupna širina oken
 b – višina oken

V spodnji tabeli so navedene mere oken v učilnicah, ki smo jih izmerili z merilnim trakom. V zadnjem stolpcu so izračunane površine oken učilnic s pomočjo zgornjega obrazca.

Učilnica	Skupna širina [m]	Višina [m]	Skupna površina [m ²]
TIT	3,90	1,57	6,12
RAČ	3,90	1,57	6,12
GEO	3,06	2,18	6,67

Tabela 4: Mere oken za prezračevanje in njihova skupna površina

3.3 Merjenje koncentracije CO₂ in O₂ v razredu

Za merjenje koncentracije CO₂ in O₂ v zraku smo uporabljali Vernierjeva senzorja za merjenje in računalniški program Graphical Analysis. Senzorja smo namestili na stojalo, ki smo ga za to priložnost izdelali iz lesa in ga postavili na stran učilnice, kjer ni bilo oken.



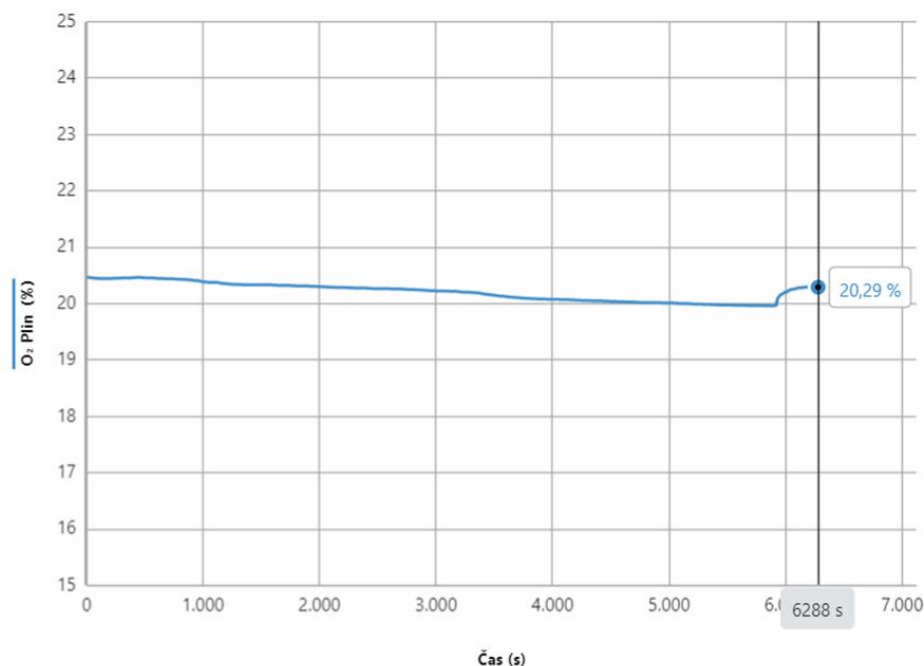
Slika 12: CO₂ in O₂ senzorja na stojalu

Pred merjenjem koncentracije CO₂ v prostorih smo po navodilih proizvajalca Vernier kalibrirali (umerili) CO₂ senzor v šolskem parku. Predpostavili smo, da je zaradi podeželske lokacije šole zrak čist in kot kalibracijsko vrednost uporabili koncentracijo 420 ppm.

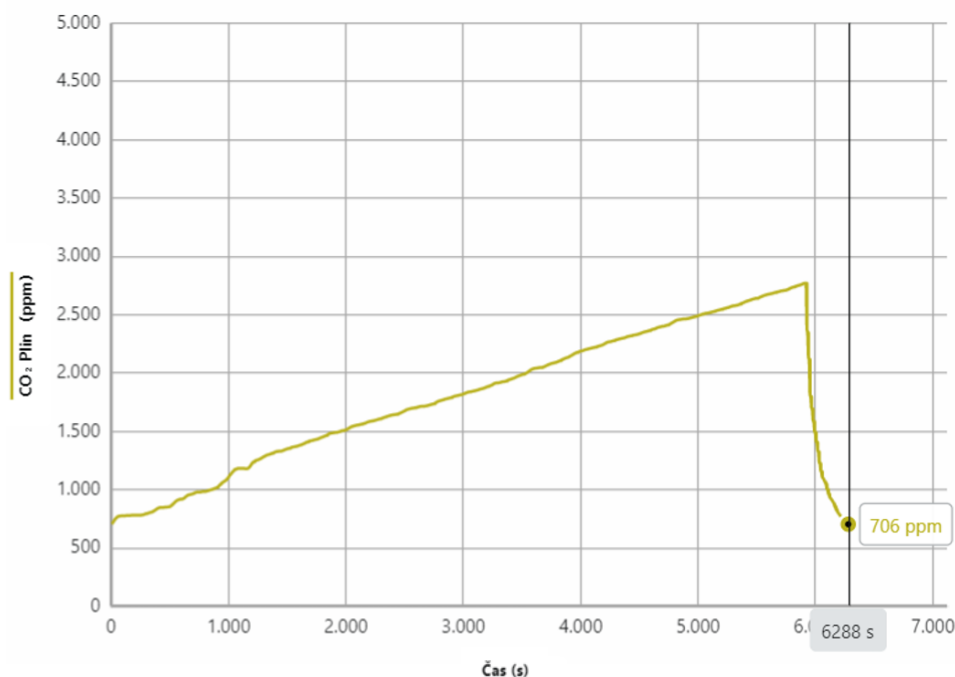
Z meritvijo smo začeli tik preden so učenci in učitelji stopili v razred, končali pa po koncu zračenja učilnice. Sodelujoče pri meritvi smo prosili, da med poukom ne zapuščajo učilnice. Prav tako med poukom nismo odpirali oken in vrat učilnice.

Na slikah 13 in 14 je prikazano, kako sta se koncentraciji O₂ in CO₂ spreminjali s časom. Meritev je bila izvedena v tehniški učilnici, dne 17. 11. 2024 pri blok uri pouka fizike. V učilnici je bilo med meritvijo prisotnih 18 učencev in 2 učitelja. Za namen te raziskovalne

naloge smo se osredotočili samo na spremembo koncentracije CO₂, sprememba koncentracije O₂ pa je prikazana le kot zanimivost.



Slika 13: Graf koncentracije O₂ v odvisnosti od časa



Slika 14: Graf koncentracije CO₂ v odvisnosti od časa

Pred vstopom učencev in učiteljev je bila učilnica zračena nekaj minut. Ob začetku merjenja je bila koncentracija CO₂ 690 ppm. Iz grafa je razvidno, da je koncentracija CO₂ v zraku naraščala približno enakomerno (linearno). Po dveh šolskih urah (90 minut) pouka fizike je koncentracija CO₂ narasla na 2700 ppm. Ko so učenci in učitelja po končani blok uri zapustili razred, smo zaprli vrata in odprli tri velika okna na isti steni učilnice. Koncentracija CO₂ je zaradi zračenja v tem primeru padla na začetno koncentracijo v 374 sekundah, kar

je nekaj več kot šest minut. Pri zračenju učilnice koncentracija CO₂ s časom ni padala linearno, ampak po krivulji, ki se vedno počasneje približuje koncentraciji CO₂ v zunanjem zraku – 420 ppm.

3.4 Čas, po katerem je potrebno prezračiti učilnico

Pri določanju časa, po katerem je potrebno prezračiti poljubno veliko učilnico s poljubnim številom oseb, smo si pomagali s preoblikovanjem spodnje enačbe. V poglavju 2.5 je podrobneje opisano, kako dobimo nekoliko poenostavljeno enačbo za spremembo koncentracije CO₂ v zaprtem prostoru brez prezračevanja:

$$\Delta C = \frac{A \cdot n \cdot t}{V}$$

A – povprečen volumski pretok CO₂ na osebo

ΔC – sprememba koncentracije CO₂

V – prostornina učilnice

n – število oseb

t – čas

Sprememba koncentracije CO₂ v zaprtem prostoru brez zračenja je odvisna od prostornine prostora V , števila oseb n , od povprečnega volumskega pretoka CO₂ na osebo A ter od časa, ki preteče od začetka merjenja t . Volumski pretok CO₂ na osebo A je odvisen od večih dejavnikov, glavna pa sta starost in aktivnost osebe. V našem primeru so to v večini učenci, stari med 12 in 13 let, ki večino časa sedijo in sodelujejo pri pouku, kar pomeni, da je njihova fizična aktivnost nizka.

Če želimo določiti čas, po katerem je potrebno prezračiti učilnico, moramo najprej določiti vrednost povprečnega volumskega pretoka A , ki nam pove, kolikšna je prostornina CO₂, ki jo povprečen učenec, star med 12 in 13 let, izdiha na sekundo pri nizki fizični aktivnosti.

Povprečen volumski pretok CO₂ na osebo A smo določili na dva načina. Prvi je s pomočjo računanja volumskega pretoka CO₂ na osebo pri pouku v poglavju 3.4.1, drugi pa s pomočjo računanja volumskega pretoka CO₂ na osebo pri posamezniku v poglavju 3.4.2.

3.4.1 Izračun povprečnega volumskega pretoka CO₂ na osebo A pri pouku

Enačbo za izračun povprečnega volumskega pretoka na osebo A smo dobili s pomočjo preoblikovanja enačbe za izračun spremembe koncentracije CO₂ v zaprtem prostoru (poglavje 3.4) brez prezračevanja. Preoblikovana enačba je:

$$A = \frac{\Delta C \cdot V}{n \cdot t}$$

Spremembo koncentracije ogljikovega dioksida v prostoru ΔC in čas t smo pridobili iz meritve koncentracije CO₂ s pomočjo Vernierjevega merilnika CO₂ in programa Graphical Analysis, opisanega v poglavju 3.3. Prostornino učilnice V smo izračunali z enačbo za izračun prostornine kvadra, zapisano v poglavju 3.2.1. Število oseb n smo določili s štetjem oseb v razredu.

V spodnji tabeli so podatki, potrebni za izračun povprečnega volumskega pretoka CO₂ na osebo A, pridobljeni na podlagi posameznih meritev za določeno učilnico:

Učilnica	n [os]	V [m ³]	t [s]	C_z [ppm]	C_k [ppm]	ΔC [ppm]	$A \left[\frac{\text{ppm} \cdot \text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{os}} \right]$	$A \left[\frac{\text{l}}{\text{s} \cdot \text{os}} \right]$
GEO	18	245,5	4229	661	1761	1100	3,55	0,0035
RAČ	16	200,0	3672	520	1620	1100	3,74	0,0037
TIT 1	16	251,9	3756	636	1736	1100	4,61	0,0046
TIT 2	20	251,9	2913	696	1796	1100	4,76	0,0048

Tabela 5: Računanje povprečnega volumskega pretoka na osebo A

V prvem stolpcu je učilnica, v kateri je bila meritev izvedena. V drugem stolpcu je število oseb n , prisotnih pri meritvi (to vključuje tudi učitelja). V tretjem stolpcu je čas t , v katerem se je začetna koncentracija CO₂ povečala za 1100 ppm. To spremembo koncentracije smo izbrali, saj je povprečna začetna koncentracija CO₂ C_z (četrty stolpec) na začetku učne ure bila okoli 600 ppm, končna koncentracija CO₂ C_k (peti stolpec) pa naj ne bi presegla vrednosti 1700 ppm. Ta vrednost je v zakonodaji Republike Slovenije maksimalna, še dopustna vrednost koncentracije CO₂ v zaprtih prostorih. Sprememba koncentracije CO₂ ΔC (šesti stolpec) je tako v vseh primerih enaka 1100 ppm.

Volumski pretok CO₂ na osebo A (sedmi stolpec) smo izračunali s pomočjo zgornje enačbe, tako da smo produkt spremembe koncentracije CO₂ in prostornino učilnice delili s produktom števil oseb v prostoru in časom, v katerem se je začetna koncentracija CO₂ povečala za 1100 ppm. Enota v tem primeru je $\frac{\text{ppm} \cdot \text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{os}}$. Ker ppm pomeni $\frac{1}{1.000.000}$, 1 m³ pa je enak 1000 litrom, smo dobili volumski pretok CO₂ na osebo (osmi stolpec) v $\frac{\text{l}}{\text{s} \cdot \text{os}}$ tako, da smo vrednost iz sedmega stolpca delili s 1000.

Na podlagi dobljenih konstant smo izračunali povprečno vrednost volumskega pretoka CO₂ na osebo A po obrazcu:

$$\bar{A} = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4}{4} = 0,00415 \frac{\text{l}}{\text{s} \cdot \text{os}}$$

3.4.2 Določanje volumskega pretoka izdihanega CO₂ pri posamezniku

Za določitev prostorninskega pretoka izdihanega CO₂ pri posamezniku potrebujemo podatek o koncentraciji CO₂ v izdihanem zraku pri posamezniku in volumski pretok izdihanega zraka pri posamezniku.

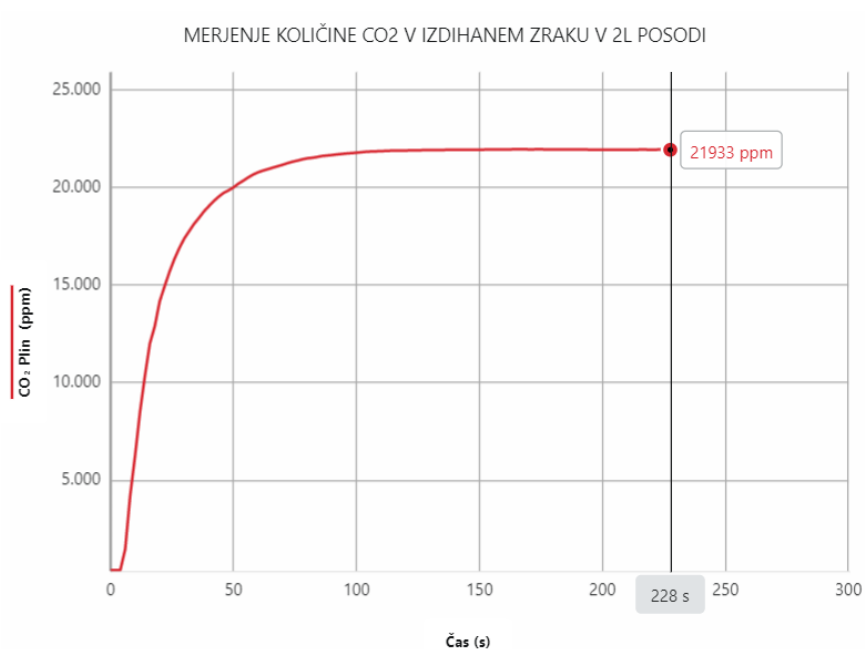
3.4.2.1 Merjenje koncentracije CO₂ v izdihanem zraku posameznika

Za merjenje koncentracije CO₂ in O₂ v izdihanem zraku smo uporabili dvolitrsko plastično posodo z dvema odprtinama, primernima za CO₂ in O₂ senzorje. V eno odprtino smo namestili senzor za merjenje CO₂, v drugo odprtino pa smo izdihnili zrak in nato z gumijastim zamaškom odprtino zaprli.

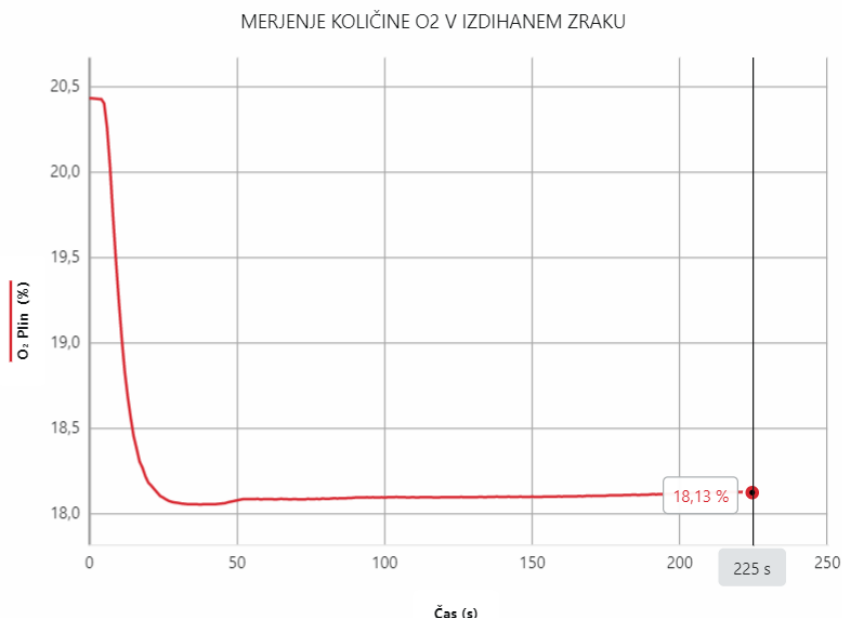


Slika 15: Posoda za merjenje koncentracije O_2 in CO_2 v izdihanem zraku

V programu Graphical Analysis sta se izrisala spodnja grafa, ki prikazujeta, kako se po izdihu spreminjata koncentraciji CO_2 in O_2 v dvolitrski posodi.



Slika 16: Koncentracija CO_2 v izdihanem zraku

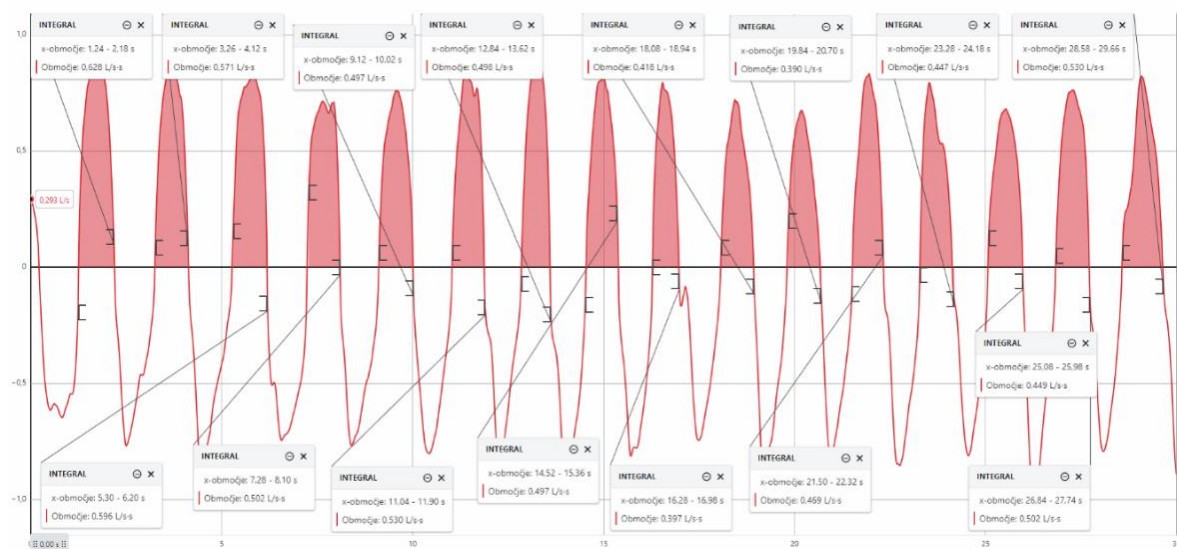


Slika 17: Koncentracija O₂ v izdihanem zraku

Iz grafa na sliki 17 je razvidno, da je končna koncentracija CO₂ 21.933 ppm, kar pomeni približno 2,2 % delež CO₂ v izdihanem zraku.

3.4.2.2 Merjenje volumskega pretoka izdihanega zraka pri posamezniku

S spirometrom smo 30 sekund merili prostornino izdihanega zraka dveh učencev, dveh učenk in učitelja. Slika 19 prikazuje, kako se pri dihanju posameznika spreminja prostorninski pretok zraka skozi spirometer. Krivulje nad abcisno osjo predstavljajo volumski pretok zraka pri izdihih, krivulje pod osjo pa pri vdihih.



Slika 18: Merjenje prostornine izdihanega zraka

S pomočjo funkcije "dodaj integral" smo v programu Graphical Analysis dobili podatek, kolikšno prostornino zraka je oseba pri posameznem izdihu izdihnila. Te podatke smo vnesli v Excelovo tabelo in jih s funkcijo SUM sešeli. S tem smo dobili prostornino izdihanega zraka pri posamezniku v 30 sekundah. Podatke prikazuje tabela 6.

Prostornina izdihanega zraka (l)					
Št. izdiha	Učenka 1	Učenka 2	Učenec 1	Učenec 2	Učitelj
1	0,367	0,694	0,573	0,567	0,697
2	0,892	0,202	0,43	0,592	0,953
3	0,666	0,54	0,413	0,498	1,016
4	0,577	0,386	0,491	0,483	0,953
5	0,787	0,293	0,416	0,379	0,538
6	0,629	0,308	0,518	0,467	0,898
7	0,509	0,357	0,637	0,528	0,579
8	0,681	0,448	0,485	0,5	0,551
9	0,623	0,308	0,444	0,445	
10	0,773	0,363	0,551	0,438	
11	0,747		0,492	0,392	
12	0,513		0,476	0,41	
13				0,498	
14				0,53	
15				0,495	
16				0,615	
Vsota	7,764	3,899	5,926	7,837	6,185

Tabela 6: Skupna prostornina izdihanega zraka pri posameznikih v 30 s

3.4.2.3 Določanje volumskega pretoka izdihanega CO₂ pri posamezniku

Povprečni volumski pretok izdihanega zraka v litrih na sekundo pri posamezniku dobimo tako, da prostornino izdihanega zraka delimo s časom, v katerem je bil zrak izdihan. V našem primeru je bil čas 30 sekund. Pretoki izdihanega zraka pri posameznikih so prikazani v tabeli 7.

	Učenka 1	Učenka 2	Učenec 1	Učenec 2	Učitelj
Skupna prostornina izdihanega zraka [l]	7,764	3,899	5,926	7,837	6,185
Volumski pretok izdihanega zraka [l/s]	0,258	0,129	0,197	0,261	0,206
Volumski pretok izdihanega CO ₂ [l/s]	0,00569	0,00285	0,00435	0,00574	0,00453

Tabela 7: Volumski pretok izdihanega CO₂ na osebo

Volumski pretok izdihanega zraka smo pomnožili s koncentracijo izdihanega CO₂ – 2,2 % = 0,022 (poglavje 3.4.2.1) in dobili volumski pretok izdihanega CO₂ za posamezno osebo. Na koncu smo izračunali še povprečje volumskega pretoka CO₂ s pomočjo enačbe:

$$\bar{A} = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5}{5} = 0,00463 \frac{l}{s \cdot os}$$

Dobljeno povprečje je 0,00463 litra izdihanega CO₂ na sekundo na osebo.

3.4.3 Izračun časa, po katerem je potrebno prezračiti učilnico

Iz enačbe za izračun spremembe koncentracije CO₂ ΔC smo izrazili čas:

$$t = \frac{\Delta C \cdot V}{n \cdot A}$$

S pomočjo te enačbe lahko izračunamo, po kolikšnem času t se koncentracija CO_2 ΔC spremeni za določeno vrednost pri določeno velikem prostoru V , določenem številu oseb n in pri danem povprečnem volumskem pretoku CO_2 na osebo A .

3.5 Čas zračenja učilnice

Čas zračenja učilnice je odvisen od mnogih dejavnikov, zato je natančno računanje zelo zapleteno. V našem primeru smo zaradi tega poenostavili računanje časa zračenja prostora. Predpostavili smo, da je sprememba koncentracije CO_2 v prostoru premo sorazmerna s časom t , površino odprtih oken S in z volumskim pretokom CO_2 na m^2 odprtega okna B . Obratno sorazmerna pa s prostornino zraka v učilnici V . Na podlagi tega smo zapisali enačbo za spremembo koncentracije CO_2 v prostoru, iz katere smo na koncu izrazili čas:

$$\Delta C = \frac{B \cdot S \cdot t}{V}$$

3.5.1 Izračun volumskega pretoka CO_2 na m^2 odprtega okna B

Če želimo določiti čas zračenja učilnice, moramo določiti vrednost B , ki pove, kolikšna prostornina CO_2 se na m^2 površine odprtega okna pretoči iz učilnice v eni sekundi.

Enačbo za izračun B dobimo s preoblikovanjem zgornje enačbe za izračun spremembe koncentracije CO_2 ΔC :

$$B = \frac{V \cdot \Delta C}{t \cdot S}$$

B – prostorninski pretok CO_2 na m^2 odprtega okna

ΔC – sprememba koncentracije CO_2

V – prostornina učilnice

S – skupna površina odprtih oken

t – čas

Spremembo koncentracije ogljikovega dioksida v prostoru ΔC in čas t smo pridobili s pomočjo Vernijevega merilnika CO_2 in programa Graphical Analysis. Prostornino učilnice V smo izračunali z obrazcem za izračun prostornine kvadra (poglavje 3.2.1). Skupno površino odprtih oken S smo določili s pomočjo obrazca za izračun ploščine pravokotnika (poglavje 3.2.2).

V spodnji tabeli so podatki, potrebni za izračun volumskega pretoka CO_2 na m^2 odprtega okna B , za določeno učilnico:

Učilnica	$V [\text{m}^3]$	$S [\text{m}^2]$	$t [\text{s}]$	$C_z [\text{ppm}]$	$C_k [\text{ppm}]$	$\Delta C [\text{ppm}]$	$B \left[\frac{\text{m}^3 \cdot \text{ppm}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \right]$	$B \left[\frac{1}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \right]$
GEO	245,5	6,67	216	1781	781	-1000	-170	-0,170
RAČ	200	6,12	161	1708	708	-1000	-246	-0,246
TIT 1	251,9	6,12	318	1708	708	-1000	-129	-0,129
TIT 2	251,9	6,12	374	1706	706	-1000	-110	-0,110

Tabela 8: Določanje volumskega pretoka CO_2 na m^2 odprtega okna B

Volumski pretok CO_2 na m^2 odprtega okna B smo izračunali tako, da smo produkt spremembe koncentracije CO_2 ΔC in prostornino učilnice V delili s produktom skupne

površine oken S in časa t , v katerem je koncentracija CO_2 padla s približno mejne vrednosti 1700 ppm za 1000 ppm. Najnižje izmerjene vrednosti koncentracije se razlikujejo, saj so v določenih primerih imeli v učilnici pouk drugi učenci in je bilo potrebno meritev zaključiti, preden bi koncentracija CO_2 padla na približno 700 ppm.

Na podlagi dobljenih vrednosti B v različnih učilnicah smo izračunali povprečno vrednost:

$$\bar{B} = \frac{B_1 + B_2 + B_3 + B_4}{4} = -0,164 \frac{l}{s \cdot m^2}$$

3.5.2 Izračun časa zračenja učilnice

Če iz obrazca za izračun spremembe koncentracije CO_2 izrazimo čas, dobimo enačbo:

$$t = \frac{V \cdot \Delta C}{B \cdot S}$$

S pomočjo te enačbe smo izračunali, koliko časa t moramo zračiti učilnico, da se koncentracija CO_2 ΔC pri določeni prostornini učilnice V , pri določeni površini odprtih oken S in konstanti B spremeni za določeno vrednost. Za ta izračun smo uporabili povprečno vrednost B , ki smo jo določili v poglavju 3.5.1.

Druga hipoteza se glasi: Koncentracija CO_2 v prostoru se zniža za 1000 ppm, če učilnico s prostornino 250 m^3 po odprtju oken s skupno površino 8 m^2 zračimo 2 minuti.

Ker je sprememba CO_2 v ppm, jo moramo upoštevati kot ulomek (v tem primeru tisoč milijonin, kot omenjeno v poglavju 4.1). Na podlagi danih podatkov za ta primer lahko izračunamo čas, kako dolgo moramo zračiti učilnico. Nato dobimo enačbo, ki izgleda tako:

$$t = \frac{250.000l \cdot (-0,001)}{-0,164 \frac{l}{s \cdot m^2} \cdot 8 \text{ m}^2} = 204 \text{ s}$$

Čas, ki ga dobimo, je 204 sekund, kar je 3 minute in 24 sekund. To je minuto in 24 sekund več, kot smo predvidevali v drugi hipotezi.

4 REZULTATI IN RAZPRAVA

4.1 Čas, po katerem je potrebno prezračiti učilnico

Če želimo določiti čas, po katerem je potrebno prezračiti učilnico, moramo določiti vrednost povprečnega volumskega pretoka CO₂ na osebo A, ki nam pove, kolikšna je povprečna prostornina CO₂, ki ga oseba v povprečju izdiha na sekundo.

4.1.1 Izračun povprečnega volumskega pretoka CO₂ na osebo A

Povprečen volumski pretok A smo določili na dva načina, opisana v poglavjih 3.4.1 in 3.4.2.

Prvi način, ki je podrobneje opisan v poglavju 3.4.1, je temeljil na štirih meritvah koncentracije CO₂ med poukom v razredu in na enačbi:

$$A = \frac{\Delta C \cdot V}{n \cdot t}$$

A – povprečen volumski pretok CO₂ na osebo

ΔC – sprememba koncentracije CO₂

V – prostornina učilnice

n – število oseb

t – čas

V spodnji tabeli so podatki, potrebni za izračun povprečnega volumskega pretoka CO₂ na osebo A, pridobljeni na podlagi posameznih meritev za določeno učilnico:

Učilnica	n [os]	V [m ³]	t [s]	C _z [ppm]	C _k [ppm]	ΔC [ppm]	A $\left[\frac{\text{ppm} \cdot \text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{os}}\right]$	A $\left[\frac{\text{l}}{\text{s} \cdot \text{os}}\right]$
GEO	18	245,5	4229	661	1761	1100	3,55	0,0035
RAČ	16	200,0	3672	520	1620	1100	3,74	0,0037
TIT 1	16	251,9	3756	636	1736	1100	4,61	0,0046
TIT 2	20	251,9	2913	696	1796	1100	4,76	0,0048

Tabela 9: Računanje povprečnega volumskega pretoka na osebo A

Iz izračunanih vrednosti konstante A je razvidno, da sta konstanti pri meritvah v tehniški učilnici vidno večji od izračunanih konstant iz meritev v računalniški in geografski učilnici. Možen vzrok za to je, da je bila aktivnost učencev pri pouku fizike v tehniški učilnici višja kot pri pouku geografije v geografski in računalniški učilnici pri zadnjih treh meritvah, saj aktivnost učenca pomembno vpliva na volumski pretok CO₂. Možen vzrok za razliko v dobljenih konstantah bi lahko bil tudi v večjem pretoku zraka skozi reže pod vrati v učilnicah.

Na podlagi dobljenih konstant smo izračunali povprečno vrednost konstante A, ki smo jo kasneje uporabili pri računanju časa, po katerem je potrebno prezračiti učilnico.

$$\bar{A} = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4}{4} = 0,00415 \frac{\text{l}}{\text{s} \cdot \text{os}}$$

Dobljena vrednost pomeni, da je v času meritev vsaka oseba v učilnici v povprečju izdihnila 0,00415 litra CO₂ na sekundo.

Konstanto A smo določili še na drug način, podrobneje opisan v poglavju 3.4.2. Izračunali smo jo tako, da smo povprečno vrednost volumskega pretoka izdihanega zraka, ki smo ga izmerili s pomočjo spirometra pri petih različnih osebah (3.4.2.2), pomnožili s koncentracijo izdihanega CO₂ – 2,2 % = 0,022, ki smo jo izmerili s pomočjo merilne posode in merilnika koncentracije CO₂.

	Učenka 1	Učenka 2	Učenec 1	Učenec 2	Učitelj
Skupna prostornina izdihanega zraka [l]	7,764	3,899	5,926	7,837	6,185
Volumski pretok izdihanega zraka [l/s]	0,258	0,129	0,197	0,261	0,206
Volumski pretok izdihanega CO ₂ [l/s]	0,00569	0,00285	0,00435	0,00574	0,00453

Tabela 10: Volumski pretok izdihanega CO₂ na osebo A

Na koncu smo izračunali še povprečje volumskega pretoka CO₂ s pomočjo enačbe:

$$\bar{A} = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5}{5} = 0,00463 \frac{l}{s \cdot os}$$

Dobljeno povprečje je 0,00463 litra izdihanega CO₂ na sekundo na osebo.

Vrednosti obeh dobljenih vrednosti A se razlikujeta približno za 10 %, kar na koncu ni veliko odstopanje. Zanimivo pa je, da je bila koncentracija izdihanega CO₂ pri izdihu posameznika le 2,2 % in ne 4,5 %, kot pravi teorija. Zato bi bilo smiselno koncentracijo izdihanega CO₂ izmeriti pri večih različnih osebah in to najbolje pri tistih, ki so opravili meritve volumskega pretoka zraka s spirometrom. Tako bi dobili bolj zanesljive podatke. Če obe dobljeni vrednosti A primerjamo s teoretično vrednostjo 0,005, ki velja za manj aktivno povprečno odraslo osebo, vidimo, da sta izračunani vrednosti 0,00415 in 0,00463 realni, saj predstavljata volumski pretok CO₂ v izdihanem zraku povprečnega, manj aktivnega 13-letnika. Za izračun časa, po katerem je potrebno prezračiti učilnico, smo se odločili vzeti vrednost A = 0,00415 l/s iz prvega načina meritev, pridobljenih pri pouku, saj število meritev pri drugem načinu določitve vrednosti A ni bilo zadostno in je zaradi tega verjetnost napake večja.

4.1.2 Izračun časa, po katerem je potrebno prezračiti učilnico

Če iz obrazca za izračun spremembe koncentracije CO₂ izrazimo čas, dobimo enačbo:

$$t = \frac{\Delta C \cdot V}{n \cdot A}$$

Ta enačba pove, po kolikšnem času se koncentracija CO₂ spremeni za določeno vrednost pri določeno velikem prostoru in določenem številu oseb, če imamo podan volumski pretok CO₂ na osebo A. Za ta izračun bomo uporabili povprečno vrednost, ki smo jo določili pri poglavju 4.1.1 z meritvami v učilnici A = 0,00415 l/s.

S pomočjo zgornje enačbe lahko določimo čas, po katerem je potrebno zračiti prostor s poljubno prostornino in s poljubnim številom oseb, ki so manj aktivne in v večini stare med 11 in 15 let. Uporabili jo bomo tudi za izračun časa, po katerem je potrebno prezračiti učilnico iz prve hipoteze.

Prva hipoteza se glasi: V učilnici s prostornino 250 m³ in 20 osebami koncentracija CO₂ naraste za 1000 ppm po 45 minutah.

Na podlagi danih podatkov za ta primer lahko izračunamo čas, po katerem je potrebno prezračiti učilnico.

Ker je sprememba CO₂ v ppm, jo moramo upoštevati kot ulomek (v tem primeru tisoč milijonin):

$$\frac{1000}{1.000.000} = 0,001$$

Čas, po katerem je potrebno prezračiti učilnico za učilnico z dvajsetimi osebami in prostornino 250 m³ (250.000 l), je:

$$t = \frac{0,001 \cdot 250.000 \text{ l}}{20 \text{ os} \cdot 0,00415 \frac{\text{l}}{\text{s} \cdot \text{os}}} = 3012 \text{ s}$$

Čas, ki ga dobimo, je 3012 sekund, kar je približno 52 minut. Dobljeni čas je za 7 minut daljši kot čas, ki smo ga predvideli pri prvi zastavljeni hipotezi. Odstopanje od predpostavljene vrednosti je majhno (približno 15 %) in zaradi tega lahko hipotezo potrdimo.

4.2 Čas zračenja učilnice

Če želimo določiti čas zračenja učilnice, moramo najprej določiti vrednost volumskega pretoka CO₂ na m² odprtega okna, ki nam pove, kolikšna prostornina CO₂ se pretoči skozi m² odprtega okna v eni sekundi.

4.2.1 Izračun volumskega pretoka CO₂ na m² odprtega okna B

Enačbo za izračun *B* dobimo s preoblikovanjem enačbe za izračun spremembe koncentracije CO₂ Δ*C*, ki je podrobneje opisana v poglavju 3.5. Enačba je:

$$B = \frac{V \cdot \Delta C}{t \cdot S}$$

B – prostorninski pretok CO₂ na m² odprtega okna
 Δ*C* – sprememba koncentracije CO₂
V – prostornina učilnice
S – skupna površina odprtih oken
t – čas

V spodnji tabeli so podatki, potrebni za izračun volumskega pretoka CO₂ na m² odprtega okna B, pridobljeni na podlagi posameznih meritev za določeno učilnico. Podrobnejši opis, kako pridemo do podatkov, se nahaja v poglavju 3.5.1

Učilnica	<i>V</i> [m ³]	<i>S</i> [m ²]	<i>t</i> [s]	<i>C_z</i> [ppm]	<i>C_k</i> [ppm]	Δ <i>C</i> [ppm]	<i>B</i> $\left[\frac{\text{m}^3 \cdot \text{ppm}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}\right]$	<i>B</i> $\left[\frac{1}{\text{s} \cdot \text{m}^2}\right]$
GEO	245,5	6,67	216	1781	781	-1000	-170	-0,170
RAČ	200	6,12	161	1708	708	-1000	-246	-0,246
TIT 1	251,9	6,12	318	1708	708	-1000	-129	-0,129
TIT 2	251,9	6,12	374	1706	706	-1000	-110	-0,110

Tabela 11: Določanje volumskega pretoka CO₂ na m² odprtega okna *B*

Iz tabele 11 je razvidno, da je bil volumski pretok CO₂ na m² odprtega okna *B* pri meritvah v računalniški učilnici vidno večji od ostalih konstant. Možni vzroki za to so, da je bilo pri meritvah v računalniški učilnici zunaj bolj vetrovno kot pri meritvah v ostalih učilnicah.

Možno je tudi, da je bila večja temperaturna razlika med notranjim in zunanjim zrakom, kar pomeni večji pretok zraka zaradi višje tlačne razlike (poglavje 2.5.1.2).

Na podlagi dobljenih vrednosti B v različnih učilnicah smo izračunali povprečno vrednost:

$$\overline{B} = \frac{B_1 + B_2 + B_3 + B_4}{4} = -0,164 \frac{l}{s \cdot m^2}$$

Ta vrednost pove, da se je v povprečju vsako sekundo iz učilnice skozi m^2 odprtega okna pretočilo 0,164 l ogljikovega dioksida.

4.2.2 Izračun časa zračenja učilnice

Če iz obrazca za izračun spremembe koncentracije CO_2 izrazimo čas, dobimo enačbo:

$$t = \frac{V \cdot \Delta C}{B \cdot S}$$

S pomočjo te enačbe smo izračunali, koliko časa t moramo zračiti učilnico, da se koncentracija CO_2 ΔC pri določeni prostornini učilnice V , določeni površini odprtih oken S in konstanti B spremeni za določeno vrednost. Za ta izračun smo uporabili povprečno vrednost B , ki smo jo določili pri poglavju 3.5.1.

S pomočjo zgornje enačbe lahko določimo čas zračenja prostora s poljubno prostornino in s poljubno površino odprtih oken. Uporabili jo bomo tudi za izračun časa zračenja učilnice iz druge hipoteze.

Druga hipoteza se glasi: Koncentracija CO_2 v prostoru se zniža za 1000 ppm, če učilnico s prostornino $250 m^3$ po odprtju oken s skupno površino $8 m^2$ zračimo 2 minuti.

Ker je sprememba CO_2 v ppm, jo moramo upoštevati kot ulomek (v tem primeru tisoč milijonin). Čas zračenja učilnice s prostornino $250 m^3$ ($250.000 l$) in $8 m^2$ odprtih oken je:

$$t = \frac{250.000l \cdot (-0,001)}{-0,164 \frac{l}{s \cdot m^2} \cdot 8 m^2} = 204 s$$

Čas, ki ga dobimo, je 204 sekunde, kar je 3 minute in 24 sekund. To je minuto in 24 sekund več kot smo predvidevali pri drugi zastavljene hipotezi. Odstopanje od predpostavljene vrednosti je veliko (približno 70 %) in zaradi tega hipotezo ovržemo.

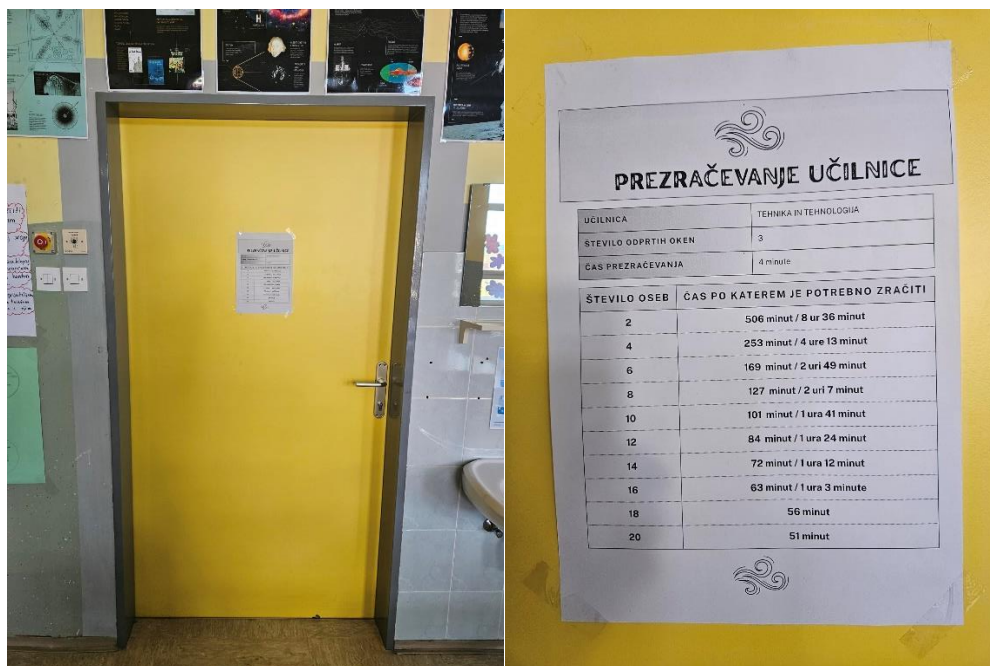
4.3 Excelova predloga za izračun časov zračenja učilnic

Na podlagi enačb iz poglavij 4.1 in 4.2 smo v Excelu oblikovali predlogo, ki nam za poljubno učilnico izračuna po kolikšnem času je potrebno prezračiti učilnico glede na število oseb v njej in najmanj koliko časa jo je priporočljivo zračiti pri določenem številu odprtih oken.

Učilnica:	TIT
Prostornina [l]:	252000
Površina odprtih oken [m ²]:	6,12
Sprememba koncentracije CO ₂ [ppm]:	1000
Čas zračenja [min]:	4
Število oseb	Čas, po katerem je potrebno zračiti [min]
2	506
4	253
6	169
8	127
10	101
12	84
14	72
16	63
18	56
20	51
22	46

Tabela 12: Izpolnjena predloga za izračun časov zračenja tehniške učilnice

V Excelovo predlogo, ki jo prikazuje tabela 12, smo vstavili podatke za prostornino učilnice, površino odprtih oken ter spremembo koncentracije CO₂. Predloga nam je avtomatično izračunala, po največ kolikšnem času je potrebno prezračiti učilnico in najmanj koliko časa jo je potrebno zračiti. S pomočjo izpolnjene tabele smo izdelali plakate za vse učilnice, v katerih imajo pouk učenci tretje triade.



Slika 19: Plakat s časi prezračevanja za tehniško učilnico

5 ZAKLJUČEK

Med raziskovanjem smo oblikovali enačbo, s pomočjo katere lahko izračunamo, po kolikšnem času je potrebno zračiti učilnico glede na velikost učilnice in število oseb v njej. Oblikovali smo tudi poenostavljeno enačbo, s katero lahko izračunamo čas zračenja učilnice pri določeni prostornini učilnice in površini odprtih oken. Na podlagi teh dveh enačb in na podlagi z meritvami določenimi vrednostmi volumnskega pretoka CO₂ na osebo $A = 0,00415$ l/s in volumnskega pretoka CO₂ skozi m² odprtega okna $B = -0,164$ l/sm², smo izračunali oba iskana časa pri hipotezah.

Prva hipoteza je bila: V učilnici s prostornino 250 m³ in 20 osebami koncentracija CO₂ naraste za 1000 ppm po 45 minutah.

To hipotezo smo potrdili, saj je bil izračunan čas 3012 sekund, kar je približno 52 minut. Dobljeni čas je za 7 minut daljši kot čas, ki smo ga predvideli pri prvi zastavljeni hipotezi. Odstopanje od predpostavljene vrednosti je majhno (približno 15 %) in zaradi tega lahko hipotezo potrdimo.

Druga hipoteza je bila: Koncentracija CO₂ v prostoru se zniža za 1000 ppm, če učilnico s prostornino 250 m³ po odprtju oken s skupno površino 8 m² zračimo 2 minuti.

To hipotezo smo ovrgli, saj je bil izračunan čas 204 sekunde, kar je 3 minute in 24 sekund. To je minuto in 24 sekund več, kot smo predvidevali pri drugi zastavljeni hipotezi. Odstopanje od predpostavljene vrednosti je veliko (približno 70 %) in zaradi tega hipotezo ovzremo.

Na podlagi enačb iz poglavij 4.1 in 4.2 smo v Excelu oblikovali predlogo, ki nam za poljubno učilnico izračuna, po največ kolikšnem času je potrebno prezračiti učilnico glede na število oseb v njej in najmanj koliko časa jo je priporočljivo zračiti. Na podlagi predloge smo izdelali majhne plakate za vse učilnice, v katerih imajo pouk učenci 3. triade. Tabele smo nalepili na notranjo stran vrat v učilnicah.

V raziskovalni nalogi je še nekaj možnosti za izboljšave. Prva je povečanje števila meritev koncentracije CO₂ v razredu, ki bi vplivala na natančnost izračuna vrednosti povprečnega volumnskega pretoka izdihanega CO₂ na osebo A. Druga izboljšava je, da bi pri določanju koncentracije CO₂ pri izdihanem zraku posameznikov naredili več meritev, saj je v tem primeru bila izvedena le ena meritev. Smiselno bi bilo tudi, da bi ta poskus izvedli pri istih osebah, ki so se udeležile poskusa s spirometrom.

Na področju prezračevanja učilnic bi bilo smiselno raziskati tudi, kako vplivata vreme in temperaturna razlika med notranjim in zunanjim zrakom na čas prezračevanja. Raziskali bi lahko tudi, kako aktivnost učencev (npr. pisanje testa, izvajanje eksperimentov, skupinsko delo, telovadba) vpliva na pretok izdihanega CO₂ na osebo. Po drugi strani pa bi lahko raziskali, kako na pretok izdihanega CO₂ na osebo vplivata starost in spol učencev.

6 VIRI IN LITERATURA

1. Bernard, R. (2023). Naše telo – zgradba in delovanje. Ljubljana: Ministrstvo za vzgojo in izobraževanje.
2. CO₂ Standards for Classrooms (b. d.). Pridobljeno 11. januarja 2024 s <https://www.CO2meter.com/blogs/news/ashrae-CO2-standards-classrooms>.
3. Crutzen, P. in Stoermer P.J. (2020). The “Anthropocene” [fotografija s spleta]. Pridobljeno 11. februarja 2024 s <http://www.slovenija-CO2.si/index.php/o-CO2>.
4. Fifak, A. (2018). The Impacts of Interior Space on Children in Schools and Kindergartens. november 2018.
5. Godec, G., Grubelnik, L., Glažar, S. Celično dihanje in dihanje se razlikujeta. Pridobljeno 4. januar 2025 s <http://eucbeniki.sio.si/nar6/1542/index2.html>.
6. Global monitoring (b. d.). Pridobljeno 7. marca 2025 s <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/mlo.html>.
7. Japelj, T. (1985). Ogrevanje, hlajenje in prezračevanje. Ljubljana: Tehniška založba Slovenije
8. Lenassi, P. (2017). Kakovost zraka v prostoru. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo
9. Neubauer, S. (maj 2024). Resnice in laži: koliko CO₂ je v ozračju in zakaj ima tako velik vpliv. Pridobljeno 20. februarja 2024 s <https://n1info.si/novice/slovenija/resnice-in-lazi-koliko-CO2-je-v-ozracju-in-zakaj-ima-tako-velik-vpliv/>.
10. NIJZ. (oktober 2023). Pomen prezračevanja za naše zdravje. Pridobljeno 11. februarja 2024 s <https://nijz.si/moje-okolje/zrak/pomen-prezracevanja-za-nase-zdravje/>.
11. Persily, A. (2022). ASHRAE Position Document on Indoor Carbon Dioxide. Georgia: ASHRAE
12. Prek, M. (2013). Kakovost zraka. Pridobljeno 7. marca 2025 s <https://web.fs.uni-lj.si/losk/wp-content/uploads/notranje-okolje/kakovost-zraka-objava.pdf>.
13. Ritter, S. (december 2009). Which comes first, CO₂ or the heat? Pridobljeno 21. februarja 2025 s <https://cen.acs.org/articles/87/i51/Comes-First-CO2-Heat.html>.
14. Romiks (b. d.). Pridobljeno 10. marca 2025 s <https://www.ucila.eu/>.
15. Slovenija znižuje CO₂. (b. d.). Pridobljeno 11. februarja 2024 s <http://www.slovenija-CO2.si/index.php/o-CO2>.
16. Smrdu, A. (2011) Od atoma do molekule (2. izdaja). Ljubljana: Jutro.
17. Stanfield, C. (2010). Fundamentals of HVAC/R. New Jersey: Pearson Education inc.
18. Szabados M. (2021). Indoor air quality and the associated health risk in primary school buildings in Central Europe. Februar 2021.
19. Šelekar, N. (2020). Vpliv stopnje prezračevanja na kakovost notranjega zraka v izobraževalnih ustanovah in pisarnah. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
20. Terrie, K. (2006). Understanding Units of Mesurement. Environmental Science and Technology Briefs for Citizens. Center for Hazardous Substance Research, oktober 2006 (Issue 2), 2.
21. Zhang, H. (2020). A Systematic Review of Air Quality Sensors, Guidelines, and Mesurement Studies for Indoor Air Quality Managment, oktober 2020.
22. Zrak. (b. d.). Pridobljeno 11. februarja 2024 s <https://sl.wikipedia.org/wiki/Zrak>.