

Univerza
v Ljubljani

*Fakulteta za
gradbeništvo
in geodezijo*



IVAN KENDA

EMISIJE ŠKODLJIVIH SNOVI V CESTNIH PREDORIH

MAGISTRSKA NALOGA

Ljubljana, 11. september 2008

Univerza
v Ljubljani

*Fakulteta za
gradbeništvo
in geodezijo*



*INTERDISCIPLINARNI
PODIPLOMSKI ŠTUDIJ
VARSTVA OKOLJA*

Kandidat:

IVAN KENDA, univ. dipl. inž. teh. prom., inž. str.

Emisije škodljivih snovi v cestnih predorih

Magistrsko delo št.: 203

Emissions of Noxious Substances in Road Tunnels

Master of Science Thesis No.: 203

Mentor:

doc. dr. Jurij Modic, UL – FS

Predsednik komisije:

prof. dr. Mitja Brilly, UL-FGG

član komisije:

doc. dr. Mihael Ribičič, UL-FNT

član komisije:

doc. dr. Alojz Juvanc, UL-FGG

Datum zagovora:

Ljubljana, 11. september 2008

POPRAVKI

| Stran z napako | Vrstica z napako | Namesto | Naj bo |
|-----------------------|-------------------------|----------------|---------------|
|-----------------------|-------------------------|----------------|---------------|

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani IVAN KENDA izjavljam, da sem avtor magistrske naloge z naslovom "**EMISIJE ŠKODLJIVIH SNOVI V CESTNIH PREDORIH**".

Ljubljana, 11.9.2008

Podpis:

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 504.054:624.19(043.3)
Avtor: Ivan Kenda
Mentor: doc. dr. Jurij Modic
Naslov: Emisije škodljivih snovi v cestnih predorih
Obseg in oprema: 108 str., 10 preg., 20 sl., 9 graf., 43 en.
Ključne besede: emisija, imisija, koncentracija, CO, NO_x, polutanti, predor, matematični model, kriterialno število, monitoring

Izvleček

Gradnja predorov, galerij, pokritih vkopov in drugih podzemnih inženirskih konstrukcij je najzahtevnejše opravilo pri nizkih gradnjah. Na videz enostavni objekti zahtevajo interdisciplinarno prepletanje integralnih znanj gradbeništva, geologije, rudarstva, arhitekture, ekologije in drugih strok v vseh fazah načrtovanja, gradnje in vzdrževanja podzemnih objektov. Predor je le del neke ceste. Skrbno načrtovanje prometa skozi predor ne bo imelo pravih učinkov, če se omejimo zgolj na predor. Potrebno je načrtovati promet na širšem vplivnem področju predora, da bi se izognili zastojem in drugim situacijam v predoru, s tem pa tudi nastanku koncentracij emisij v predoru in iz predora. V skladu z zakonodajo, je potrebno s prometnimi študijami in presojami vplivov na okolje, določiti vplivno območje cest, kjer je potrebno v izrednih slučajih spremeniti režim prometa in signalizacije, da ne bi prišlo do nezaželenih situacij v predoru.

Konec leta 2007 je bilo na slovenskih avtocestah 23 predorov, pokritih vkopov in galerij, skupne dolžine 34.125 metrov (seštevek vseh predorskih cevi). Najdaljši in hkrati edini enocevni avtocestni predor v Sloveniji je predor Karavanke, ki v dolžino meri 7.864 metrov, najdaljši dvocevni avtocestni predor v Sloveniji pa je predor Trojane (2.931 m). Omeniti je potrebno tudi predor pod Šentviškim hribom, ki bo povezal gorenjski avtocestni krak z ljubljansko obvoznico, oz. se nahaja v gosto naseljenem okolišu.

Za vse predore je značilno to, da so v njih emisije dimnih plinov, nastalih v motorjih z notranjim zgorevanjem, skoncentrirane, kar pomeni, da tako v cevi, kot na izstopu iz cevi velikokrat zelo presegajo mejne in dopustne vrednosti, kar je še posebej problematično, če je v bližini večje naselje.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 504.054:624.19(043.3)
Author: Ivan Kenda
Supervisor: Asist. Dr. Jurij Modic
Title: Emissions of Noxious Substances in Road Tunnels
Notes: 108 p., 10 tab., 20 fig., 9 grap., 43 eq.
Key words: emission, imission, concentration, CO, NO_x, pollutant, Tunnel, mathematical model, criterial number

Abstracts

Construction of tunnels, galleries, bridging objects and other underground engineers constructions is the most exacting work at low buildings.

Tunnel seems to be very simple building but there must be interdisciplinary interweaving of entire civil engineering knowledge of geology, mining, architectures, ecology and of other in all phases of planning, building and maintenance of underground constructions.

Tunnel is only one of the objects on a road. Careful planning of traffic only through tunnel won't have regular effects when the facts are limited only to tunnel. The traffic must be planned on wider influential area of tunnel to avoid the traffic jams and other situations in tunnel, which can result in emission concentration in and out of the tunnel. In accordance with legislation the influentially range of streets must be defined by traffic studies and estimation of impacts on environment. Therefore the regime of traffic and signaling must be changed in chase of extraordinary accidents to avoid the undesirable situations in the tunnel.

At the end of the year 2007 there were 23 tunnels, galleries and covered dugs on Slovene highways, common length of 34.125 meters. The longest tunnel with only one pipe is the Karavanke tunnel in length of 7.864 meters. The longest two pipes tunnel is called Trojane (2.931 meters).

We have to mention the Šentvid tunnel, which will connect northern and west highway with Ljubljana road circle. The new tunnel is very close to very densely populated district.

The characteristic for all tunnels is that the emissions of gases from engines with internal combustion are concentrated, that means the allowed and limited values inside or outside the tunnel pipes are many times exceeded. This is very big problem in case of the immediate neighborhood of bigger settlements.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju magistrske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju, doc.dr. Juriju Modicu, zaposlenim v Informacijsko-operativnemu centru DARS Vransko, Nadzornemu odboru DARS za možnost uporabe njihovih podatkov.

Zahvalil se bi tudi svoji družini za vso podporo in odrekanje v času študija.

KAZALO VSEBINE

| | | |
|----------------|---|-----------|
| 1 | UVOD | 1 |
| 1.1 | Zakonske podlage | 4 |
| 2 | EMISIJE V PROMETU | 6 |
| 2.1 | Emisije dimnih plinov v izpuhkih cestnih motornih vozil | 6 |
| 2.2 | Mejne vrednosti emisij | 7 |
| 2.2.1 | Prekoračene vrednosti kvalitete zraka | 8 |
| 2.2.2 | Optimiziranje kvalitete zunanjega zraka v okolici predorov | 9 |
| 2.3 | Vrste emisij | 11 |
| 2.3.1 | Emisije ogljikovega dioksida v prometu | 11 |
| 2.3.2 | Emisije žveplovega dioksida v prometu | 11 |
| 2.3.3 | Emisije dušikovih oksidov v prometu | 12 |
| 2.3.3.1 | Tehnologije za odstranjevanje NO₂ | 13 |
| 2.3.4 | Emisije nemetanskih hlapnih ogljikovodikov v prometu | 14 |
| 2.3.5 | Policiklični aromatski ogljikovodiki | 14 |
| 2.3.6 | Benzen | 14 |
| 2.3.7 | Onesnaženje zraka z ozonom | 15 |
| 2.3.8 | Onesnaženje zraka z delci | 16 |
| 2.3.9 | Obraba gum, vozišč in zavor | 18 |
| 2.3.10 | Emisije ogljikovega monoksida | 20 |
| 2.3.11 | Svinec in nepopolno zgorevanje | 21 |
| 2.4 | Čiščenje zraka in predorov | 22 |
| 2.4.1 | Odstranjevanje delcev iz zraka v predorih | 22 |
| 2.4.2 | Strategija čiščenja v predoru | 24 |
| 2.4.3 | Čiščenje izpušnih plinov | 24 |
| 2.5 | Energija in promet | 26 |
| 2.5.1 | Poraba končne energije | 26 |
| 2.5.2 | Poraba naftnih proizvodov | 26 |

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 3 | PREZRAČEVANJE PREDOROV IN NADZOR KAKOVOSTI ZRAKA IZ PREDOROV V OKOLJE | 28 |
| 3.1 | Prezračevanje cestnih predorov | 28 |
| 3.1.1 | Načini normalnega prezračevanja | 29 |
| 3.1.2 | Določanje velikosti ventilatorjev | 33 |
| 3.1.3 | Delovanje ventilatorjev v primeru požara | 33 |
| 3.1.4 | Določanje hitrosti zraka pri prezračevanju predorov | 34 |
| 3.2 | Količine polutantov na izhodu iz predorov ter monitoring | 35 |
| 3.2.1 | Izračun hitrosti zraka z diferencialno enačbo znotraj predora | 40 |
| 3.2.2 | Strategija nadzora prezračevanja | 47 |
| 3.2.3 | Poskusi sledenja | 48 |
| 3.2.4 | Javno mnenje | 49 |
| 3.3 | Mnenje o vplivu emisij zaradi prometa iz predora Dekani na AC Klanec – Srmin z okolico | 49 |
| 3.4 | Ocena koncentracij onesnaženja zraka zaradi prometa na izhodih predorov na trasi AC odseka Vransko – Blagovica | 52 |
| 3.5 | Emisije škodljivih snovi zaradi prometa z motornimi vozili | 53 |
| 3.5.1 | Izračun emisij CO, VOC in NO_x | 53 |
| 3.5.2 | Ocena koncentracije onesnaženja zraka | 54 |
| 4 | MERITVE | 58 |
| 4.1 | Izmerjene vrednosti koncentracij onesnaženja zraka in hitrosti vetra | 58 |
| 4.2 | Izmerjene vrednosti hitrosti zraka | 64 |
| 4.2.1 | Meritve hitrosti zraka | 65 |
| 4.2.2 | Montaža sistema za merjenje hitrosti zraka | 65 |
| 4.3 | Opazovanje motnosti zraka v predorih | 66 |
| 4.3.1 | Meritve motnosti zraka | 68 |
| 4.4 | Meritve koncentracije CO | 68 |
| 4.4.1 | Namestitev naprav za meritve koncentracije CO | 69 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 5 | DOVOLJENE KONCENTRACIJE ŠKODLJIVIH SNOVI IZ PREDOROV IN VPLIV NA ČLOVEKA | 71 |
| 5.1 | Vpliv emisij na človeka | 72 |
| 5.2 | Potrebna količina svežega zraka | 79 |
| 5.3 | Kriterialno število | 81 |
| 6 | NAČRTOVANJE PREZRAČEVANJA PREDORA NA OSNOVI SIMULACIJ KVALITETE ZRAKA | 86 |
| 6.1 | Napoved gostote razpršenih koncentracij polutantov v zraku izven predora | 88 |
| 6.2 | Izpušni plini na izhodu iz predora | 89 |
| 7 | ODGOVORA NA HIPOTEZI | 90 |
| 8 | ZAKLJUČKI | 93 |
| 9 | POVZETEK | |
| 10 | SUMMARY | |
| 11 | VIRI | |

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 3.1: Vrednosti izpušnih emisij vozil za načrtovanje prezračevanja predorov

Table 3.1: Value of the vehicle exhaust emissions for tunnel ventilation planning

Preglednica 3.2: Vrednosti dovoljenih koncentracij CO in vidljivosti za posamezne prometne situacije

Table 3.2: Value of permitted CO concentration and visibility in the separate traffic situation

Preglednica 3.3: Emisije pri 2000 vozilih na uro in dolžini predora 2170 m

Table 3.3: Emission from Tunnel Dekani of length 2170 meters by 2000 vehicles per hour

Preglednica 3.4: Koncentracije pri izhodu iz predora

Table 3.4: Concentrations on the portal of the tunnel

Preglednica 3.5: Koncentracije pri izhodu iz predora s faktorjem zmanjšanja

Table 3.5: Concentrations on the portal of the tunnel with reduction factor

Preglednica 3.6: Faktorji emisij CO, NO_x in VOC pri prometu z motornimi vozili pri hitrosti 100 km/h za osebna vozila in avtocestni režim za tovorna vozila in avtobuse

Table 3.6: Emission factor for CO, NO_x and VOC by speed of 100km per hour for personal vehicles and highway regime for heavy duty vehicles and buses

Preglednica 3.7: Emisije CO, NO_x in VOC zaradi prometa z motornimi vozili

Table 3.7: Emissions of CO, NO_x and VOC due to traffic with motor driven vehicles

Preglednica 3.8: Numerični model za širjenje onesnaženosti zraka

Table 3.8: Numerical model for air pollution extension

Preglednica 5.1: Simptomatika v povezavi s koncentracijo COHb v krvi

Table 5.1: Symptomatic in correlation with COHB concentration in blood

Preglednica 5.2: Štiriindvajset urne mejne imisijske koncentracije škodljivih snovi

Table 5.2: 24 hour limit imission concentrations of noxious substances

KAZALO SLIK

Slika 1.1: Varnost v predoru je odvisna od medsebojne povezanosti posameznih strok

Fig. 1.1: Safety in Tunnels depends on interacting connection of particular professions

Slika 2.1: Elektrostatični filtri, pritrjeni v vertikalni jašek

Fig. 2.1: Electrostatics filters placed in vertical shaft

Slika 2.2: Elektrostatični filtri, pritrjeni v vertikalni jašek

Fig. 2.2.: Electrostatics filters placed in vertical shaft

Slika 3.1: Hitrost, povprečna hitrost in zračni tlaki

Fig. 3.1: Speed, average speed and air pressures

Slika 3.2: Shema dogajanj v predoru (povzeto po Modic, 2004)

Fig. 3.2: Scheme of happening in the tunnel professions (resumed from Modic, 2004)

Slika 3.3: Splošno stanje v predoru (povzeto po Modic, 2004)

Fig. 3.3: Common situation in tunnel (resumed from Modic, 2004)

Slika 3.4: Hitrosti zraka pri različnih dolžinah, 60 km/h, različen delež tovornih vozil
(povzeto po Modic, 2004)

Fig. 3.4: Speed of air according to different length, 60kmph and different share of
freighters (resumed from Modic, 2004)

Slika 3.5: Hitrosti zraka v predoru Kastelec pri različnih pogojih (povzeto po Modic, 2004)

Fig. 3.5: Speed of air in tunnel Kastelec by different conditions (resumed from Modic,
2004)

Slika 3.6: Hitrost zraka v predoru Kastelec pri vetru 130 km/h (povzeto po Modic, 2004)

Fig. 3.6: Speed of air in tunnel Kastelec by speed of wind 130 kmph (resumed from Modic,
2004)

Slika 3.7: Hitrost zraka v predoru Kastelec 1, veter 95 km/h (povzeto po Modic, 2004)

Fig. 3.7: Speed of air in tunnel Kastelec 1, speed of wind 95 kmph (resumed from Modic, 2004)

Slika 3.8: Meritve in simulacije hitrosti zraka v predoru Trojane (leva cev) (povzeto po Modic, 2004)

Fig. 3.8: Measurements and simulations of air speed in left tube of tunnel Trojane (resumed from Modic, 2004)

Slika 4.1: Flowsic 200, naprava za merjenje hitrosti toka zraka

Fig. 4.1: Flowsic 200, instrument for measuring of air stream speed

Slika 4.2: Princip meritve in komponente sistema

Fig. 4.2: Principle of measurement and the system components

Slika 4.3: Princip montaže komponente sistema

Fig. 4.3: Principle of system components setting up

Slika 5.1: Koncentracije CO, 60 km/h (povzeto po Modic, 2004)

Fig. 5.1: Concentrations of CO, 60 kmph (resumed from Modic, 2004)

Slika 5.2: Koncentracije CO, 30 km/h (povzeto po Modic, 2004)

Fig. 5.2: Concentrations of CO, 30 kmph (resumed from Modic, 2004)

Slika 5.3: Kriterialno število M_{od} (povzeto po Modic, 2004)

Fig. 5.3: Criterional number M_{od} (resumed from Modic, 2004)

Slika 6.1: Izračunane NO_2 koncentracije v bližini predora za majhne hitrosti pri vzdolžnem prezračevanju (1 m/s)

Fig. 6.1: Calculated NO_2 concentrations nearby the tunnel for small velocities (1 mps) longitudinal ventilation

Slika 6.2: Izračunane NO₂ koncentracije v bližini predora za velike hitrosti pri vzdolžnem prezračevanju (5 m/s)

Fig. 6.2: Calculated NO₂ concentrations nearby the tunnel for high velocities (5 mps) longitudinal ventilation

Slika 6.3: Izračunane NO₂ koncentracije v bližini predora pri izpustu skozi 10 metrov visok jašek (5 m/s)

Fig. 6.3: Calculated NO₂ concentrations nearby the tunnel for high velocities (5 mps) through shaft

KAZALO GRAFOVIKONOV IN DIAGRAMOV

- Grafikon 4.1: CO v predoru Trojane v mesecu marcu 2007 (povzeto po DARS Vransko, februar 2008)
- Graph 4.1: CO in tunnel Trojane in March 2007 (resumed by DARS Vransko, February 2008)
- Grafikon 4.2: CO v predoru Trojane v mesecu juliju 2007 (povzeto po DARS Vransko, februar 2008)
- Graph 4.2: CO in tunnel Trojane in July 2007 (resumed by DARS Vransko, February 2008)
- Grafikon 4.3: CO v predoru Trojane v mesecu oktobru 2007 (povzeto po DARS Vransko, februar 2008)
- Graph 4.3: CO in tunnel Trojane in October 2007 (resumed by DARS Vransko, February 2008)
- Grafikon 4.4: CO v predoru Trojane v mesecu decembru 2007 (povzeto po DARS Vransko, februar 2008)
- Graph 4.4: CO in tunnel Trojane in December 2007 (resumed by DARS Vransko, February 2008)
- Grafikon 4.5: Veter v predoru Trojane v mesecu marcu 2007 (povzeto po DARS Vransko, februar 2008)
- Graph 4.5: Wind in tunnel Trojane in March 2007 (resumed by DARS Vransko, February 2008)
- Grafikon 4.6: Veter v predoru Trojane v mesecu juliju 2007 (povzeto po DARS Vransko, februar 2008)
- Graph 4.6: Wind in tunnel Trojane in July 2007 (resumed by DARS Vransko, February 2008)

Grafikon 4.7: Veter v predoru Trojane v mesecu oktobru 2007 (povzeto po DARS Vransko, februar 2008)

Graph 4.7: Wind in tunnel Trojane in October 2007 (resumed by DARS Vransko, February 2008)

Grafikon 4.8: Veter v predoru Trojane v mesecu decembru 2007 (povzeto po DARS Vransko, februar 2008)

Graph 4.8; Wind in tunnel Trojane in December 2007 (resumed by DARS Vransko, February 2008)

Grafikon 4.9: CO in veter v predoru Trojane v mesecu marcu 2007 (povzeto po DARS Vransko, februar 2008)

Graph 4.9; CO and wind in tunnel Trojane in March 2007 (resumed by DARS Vransko, February 2008)

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

| | |
|------------------|---|
| APTA | American Public Transportation Association |
| CAFÉ | The Clean Air for Europe |
| CEGR | cooled exhaust gas recirculation - sistem brez aditivov |
| COHb | karboksihemoglobin - Spojina hemoglobina z ogljikovim dioksidom |
| CORINAIR | numerični model za širjenje onesnaženosti zraka, ki ga je potrdila EPA |
| EPA | Environmental Protection Agency - USA |
| IBE | Inženirski biro Elektro d.d. svetovanje, projektiranje in inženiring |
| MIV | (urna) mejna imisijska vrednost v mednarodnem sodelovanju pri razvoju cestne in prometne stroke |
| NMVOC | nemetanske organske hlapne snovi |
| PAH | policiklični aromatski ogljikovodiki |
| PAN | peroksiacetonitratom, produkt fotooksidacije |
| PIARC | Permanent International Association of Road Congress |
| PM ₁₀ | trdni delci v velikosti do 10 µm |
| ppm | parts per million, število delcev na milijon, za zelo nizke koncentracije |
| SCR | selective catalytic reduction |
| SCREEN | numerični model za širjenje onesnaženosti zraka, ki ga je potrdila EPA - ameriška agencija za varovanje okolja |
| VOC | volatile organic compound - lahkohlapna organska spojina |
| WHO | world health organisation – svetovna zdravstvena organizacija |
| ZGO | Zakon o graditvi objektov |
| ZJC | Zakon o javnih cestah |
| ZUP | Zakon o splošnem upravnem postopku |

SLOVAR STROKOVNIH BESED

| | |
|------------------|--|
| Absorpcija | vpijanje, vsrkanje, vsrkavanje, v fiziologiji privzemanje snovi v ali skozi tkivo. Pojav, da se oslabi curek svetlobe ali delcev pri prehodu skozi snov. |
| Adsorpcija | posrkavanje, vezanje, zgostitev plinov ali tekočin na površju trdnih snovi. |
| Ekstinkcija | Slabitev gostote svetlobnega toka pri prehodu skozi snov zaradi absorpcije in sipanja. |
| Emisija | izsevanje, sevanje, izžarevanje, iztekanje, izhlapevanje snovi, ki uhajajo v ozračje |
| Imisija | vpliv tujih snovi v zraku na človeka, živali in rastline |
| Koncentracija | koncentracija raztopine je množina topljenca v enem litru raztopine |
| Nomogram | diagram za izračunavanje vrednosti namesto enačbe |
| Polutant | onesnaževalec, snov, ki onesnažuje |
| Trposferski ozon | Prizemni ali troposferski ozon je skupaj s PAN-om produkt fotooksidacije, ki nastaja v onesnaženem ozračju pod vplivom svetlobe iz primarnih onesnažil, predvsem iz dušikovih oksidov, ogljikovega monoksida in hlapnih ogljikovodikov. Biosfera je nanj razmeroma dobro navajena, posledice utrpi le, če je izpostavljena dalj časa velikim koncentracijam. |

1 UVOD

Naloga obravnava emisije v cestnih predorih v različnih razmerah: daljši predor je glede emisij neugoden, ugodnejši pa je v primeru močnega vetra, ki sicer znižuje nivo varnosti, kajti z dolžino predora se veča tudi zračni upor, ki zaradi tega manjša vpliv vetra. Ugodnejši in bistveno bolj varni so dvocevni predori z enosmernim prometom. V enačbi je pomembna dolžina predora.

Rdeča nit naloge je analiza emisije v cestnih predorih v različnih razmerah in različnih predorih. Teoretična enačba, ki obravnava emisije kaže, da je emisija škodljivih snovi funkcija:

- Vzdolžni nagib (v enačbi je vzdolžni nagib vsebovan)
- Meteoroloških razmer (gostota in temperatura zraka, ter temperaturna razlika) s tem tudi nadmorska višina in ostalo)
- Geometrije predora (v enačbi je vsebovan prerez, oz. profil predora, njegova dolžina, vzdolžni nagib, zavrtost, ki jo opisuje koeficient lokalnih uporov ζ , itd.)
- Režima in značilnosti prometa: hitrosti vožnje, kakovosti vozil, aerodinamika vozil, struktura prometa, kar je vse zajeto v enačbi
- V enačbi je zajet tudi enosmerni ali dvosmerni promet, ter zastoji v predoru
- S tem je zajeta tudi funkcionalnost predora: mestni ali avtocestni, to se definira s pomočjo dovoljenih koncentracij, edina razlika je v morebitni neogretosti motorja
- Odvisnosti emisij NO_x in CO od hitrosti vožnje, kar je zajeto v enačbah za izračun emisij (naklon, hitrost, ...).

Rezultati izračunov so podprti z eksperimentalnimi izsledki, torej na osnovi meritev v nekaterih predorih. Pri izhodu iz predora se koncentracija škodljivih snovi zmanjšuje s kvadratom razdalje.

Dovoljene koncentracije posameznih škodljivih snovi so določene na osnovi mednarodnih predpisov. S temi problemi se v Evropi največ ukvarja organizacija PIARC (**P**ermanent

International Association of Road Congresses), ki je v Evropi tudi merodajna za omenjeno problematiko.

Pozitivne lastnosti pri doseganju kvalitete zraka so izražene, če so predori primerno oblikovani in so pravilno prostorsko umeščeni, pri čemer predvsem v urbanem okolju prerazporedijo emisije iz prometa. Tako so novejši predori zgrajeni predvsem in samo z namenom disperzije koncentracij. Vsi cestni predori vsebujejo in prerazporejajo emisije iz prometa.

Promet je verjetno najhitreje rastoča panoga tako v Evropi kot tudi v Sloveniji. S povečevanjem števila vozil in prevozov, se povečuje tudi trošenje naravnih zalog nafte. Zadovoljevanje ugodja je pripeljalo do tega, da je novozgrajenih cest in avtocest vedno več, prometne študije pa dokazujejo, da le-te zadostijo svojemu namenu kvečjemu 20 let.

Slovenija se po dolžini predorov glede na avtoceste uvršča med države, ki imajo veliko predorov. To je predvsem posledica razvoja in gradnje avtocestnega omrežja v zadnjih petnajstih letih.

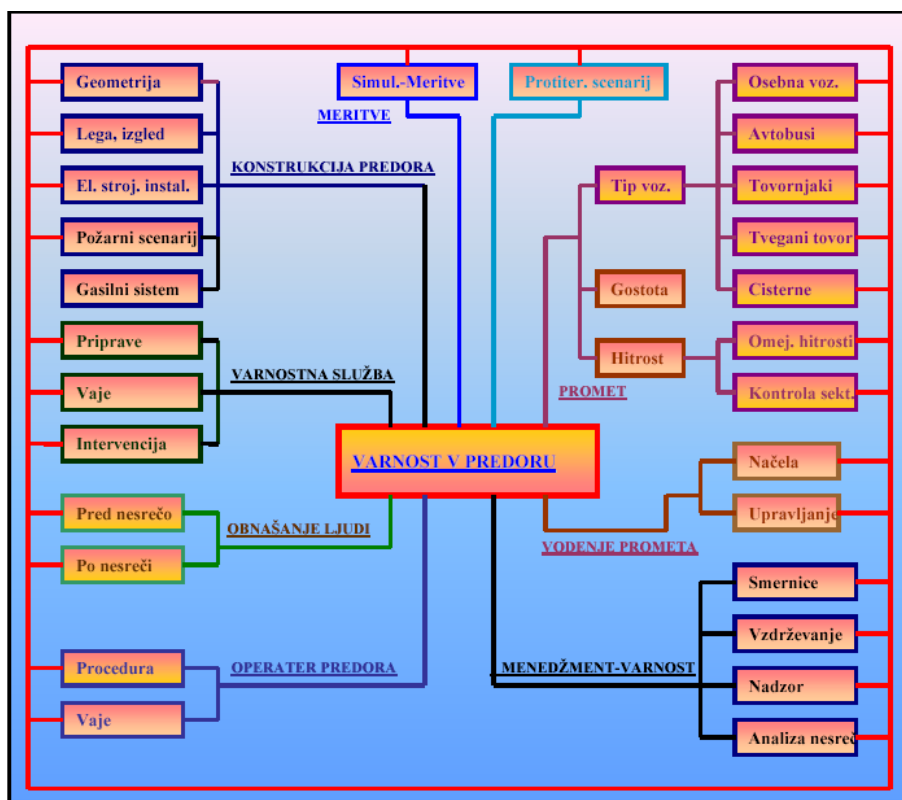
Načrtovanje, gradnja, oprema, obratovanje, vzdrževanje ter nadzorovanje cestnih predorov je, v celoti gledano, interdisciplinarno področje. Potrebno je znanje rudarstva, gradbeništva elektrotehnike, strojništva, meteorologije, prometnih tokov, itd. Zaradi interdisciplinarnosti, prav tako pa tudi zaradi pomembnosti, so vse omenjene stroke enakovredne. Navedene so osnove hidrodinamike, prezračevanja, požarne varnosti, termodinamike v širšem smislu, in merjenja toplotno tehničnih veličin.

Naloga vsebuje tako s presojo predvidene, kot tudi izmerjene količine določenih komponent (meritve emisij CO, hitrost vetra, vidljivost v predoru). V ta namen sta bili podani dve hipotezi:

Hipoteza 1: kvaliteto zraka v predorih je potrebno načrtovati in kontrolirati!

Hipoteza 2: Emisije škodljivih snovi so večje v daljših predorih in imajo podoben vpliv na urbana območja, kot področja z zelo gostim prometom!

Za varnost uporabnikov, pa tudi za varnost prometa, predvsem glede vidnosti, je pomembna sestava zraka v predoru. Tako koncentracije ogljikovega monoksida in dušikovih oksidov zaradi zdravstvenih razlogov, koncentracija dima in saj pa zaradi varnosti prometa, t.j. vidnosti, ne smejo presegati s standardi določenih maksimalno dovoljenih vrednosti. To dosežemo z ustrezno količino dovedenega svežega zraka.



Slika 1.1: Varnost v predoru je odvisna od medsebojne povezanosti posameznih strok (povzeto po Modic, 2004)

Fig. 1.1: Safety in Tunnels depends on interacting connection of particular professions (resumed from Modic, 2004)

Vsaka vrsta izmed različnih predorov ima svoje značilnosti. Tako je v cestnih predorih izjemno pomembna emisija vozil, pa tudi način in vrsta prometa.

Varnost v predoru si lahko predstavljamo kot steno, sestavljeno iz posameznih opek (slika 1.1). Vsaka od opek predstavlja po eno stroko. Vendar pa je varnost zagotovljena le takrat, ko je stena trdna in se drži skupaj. To trdnost zagotovimo tako, da vse sestavne dele povežemo

med seboj v celoto z "varnostnim obročem", ki je pritrjen na vsako opeko posebej. Tako je popolnoma jasno, da bo v primeru, ko popusti ena sama opeka, popustil tudi obroč, stena se bo zrušila, varnost je ogrožena. Zato je poudarjanje pomembnosti posameznih strok nesmiselno. Če hočemo imeti varen predor, morajo vse stroke učinkovito opravljati svojo nalogo.

Iz slike 1.1 vidimo, da je razen posameznih strok pomembno tudi obnašanje uporabnikov, torej njihova vzgoja, pa kakovost načrtovanja in primerjava simuliranih in resničnih vrednosti, v novejšem času tudi posamezni ukrepi in celoten scenarij proti terorizmu, pa kakovost vozil, prometna struktura, organiziranost in usposobljenost osebja, itd.

1.1 Zakonske podlage

- Evropska direktiva o minimalnih varnostnih zahtevah za predore v vseevropskem cestnem omrežju 2004/54/EC ES, z dne 29.04.2004
- Zakon o varstvu okolja, ZVO-1-UPB1 (UL RS, št. 39/2006)
- Uredba o mejnih, opozorilnih in kritičnih imisijskih koncentracijah škodljivih snovi v zraku (UL RS, št. 73/94, 51/98, 46/00)
- Uredba o tehničnih normativih in pogojih za projektiranje cestnih predorov v Republiki Sloveniji (UL RS, 48/06)

Evropska direktiva o minimalnih varnostnih zahtevah za predore v vseevropskem cestnem omrežju 2004/54/EC ES, z dne 29.04.2004, postavlja vrsto zahtev, ki jih naši predori, razen redkih izjem, izpolnjujejo:

"Gradbene zahteve: dve predorski cevi, vsaka z enosmernim prometom, gradient $< 5\%$ (max 3 %), odstavne niše, prečni prehodi, odvodnjavanje vozišča – zaprt sistem, prehodi pred portali.

Zahtevana oprema: razsvetljava (običajna in varnostna), prezračevanje, oskrba z vodo – hidrantna mreža, klic v sili, video nadzor z ADP, prometna oprema (SPIS), radio z možnostjo vključevanja v program, ozvočenje (na portalih in v odstavnih nišah), kontrolni center s

stalnim dežurstvom, redundančno in varnostno napajanje (UPS), prevoz nevarnih snovi, opozorila za hitrost in varnostno razdaljo.

Zahteve za imenovanje služb: Upravni organ (Administrative authority), Vodja predora (Tunnel manager), Varnostnik (Safety officer), Inšpekcijske službe (Inspection Entity).

Zahteve za izvajanje ukrepov: preverjanje načrtovanja, varnostna dokumentacija, sprotno analiziranje predora, nadgrajevanje – modificiranje opreme, redni periodični preizkusi." (Evropska direktiva, 2004)

2 EMISIJE V PROMETU

2.1 Emisije dimnih plinov v izpuhkih cestnih motornih vozil

Podrobne analize kažejo, da je v izpušnih plinih približno 200 komponent polutantov. Prevladujejo ogljikovodiki. (Faganelli, 1999).

Najvažnejše emisije dimnih plinov so:

CO - ogljikov monoksid

NO_x - dušikovi oksidi, vključujoč predvsem mešanico dušikovih oksidov (NO) in dušikovega dioksida (NO₂)

PM_x - Različni delci z aerodinamičnim premerom, manjšim od 10 μm (PM₁₀),

PAH - policiklični aromatski ogljikovodiki

C₆H₆ - ogljikovodiki, vključno z benzenom

SO₂ - žveplov dioksid

Pb - Svinec (v nekaterih državah je svinec še vedno komponenta pogonskih goriv in je rezultat emisij, čeprav je raba neosvinčenega bencina že zelo razširjena po svetu).

Fotokemični smog - emisije motornih vozil povzročajo nastanek fotokemičnega smoga, katerega glavna komponenta je ozon.

Pozitivne lastnosti predorov pri doseganju boljše kvalitete zraka so izražene, če so primerno oblikovani in so pravilno prostorsko umeščeni, pri čemer predvsem v urbanem okolju prerazporejajo emisije iz prometa. Tako so novejši predori zgrajeni predvsem in samo z namenom disperzije koncentracij. (Dix in sod., 2006)

Vozila, ki vozijo po prometnici, so linijski izvor onesnaževanja z izpušnimi plini. Vsebnost (koncentracije) polutanta pravokotno na cestišče (C_{ix}) lahko zapišemo po (Faganelli, 1999) kot:

$$C_{ix} = F(M, p, v, G, u, w, S, a, T, B) \quad (2.1)$$

in je odvisna vrste spremenljivk:

| | |
|---|--|
| M | celotna masa prometa |
| p | vrsta pogonskega motorja (bencinski, diesel) |
| v | srednja hitrost vozila na določeni razdalji |
| G | gradient ceste |
| u | srednja hitrost vetra |
| w | smer vetra |
| S | stabilnost atmosfere |
| a | območje |
| T | položaj cestišča glede na okolico (vkopano...) |
| B | prostost okolice, obzidanost, zaraščenost... |

Če predpostavimo, da je emisija določenega polutanta neodvisna od vplivov, ki uravnavajo razširjanje, in da je celotna emisija določenega polutanta produkt specifične emisije posameznega vozila in celotne mase prometa, lahko funkcijo (2.1) zapišemo v obliki:

$$C_{ix} = M Q_{spx}(p, v, G) f(u, w, S, a, T, B) \quad (2.2)$$

kjer je:

| | |
|-----------|----------------------------|
| Q_{spx} | specifična emisija snovi x |
| f | vpliv atmosferskih pogojev |

Če se omejimo le na posamezno točko vzdolž cestišča, lahko privzamemo, da so spremenljivke T, G, B in S konstantne količine. Zgornjo funkcijsko odvisnost lahko zapišemo v obliki:

$$C_{ix} = M Q_{spx}(v) f(u, w, a) \quad (2.3)$$

2.2 Mejne vrednosti emisij

Mejne vrednosti veljajo samo za zunanji zrak, ne pa za notranjega, npr. v cestnih in železniških predorih. Kritične mejne vrednosti za kakovost zraka v predorih, so definirane v

predpisih PIARC, kakor tudi v navodilih za načrtovanje obratovanja in prezračevanja predorov. Na zelo obremenjenih odprtih cestah, so vrednosti na grobo 5 do 10 krat višje za NO_x in CO in 2 do 3 krat višje za PM_{10} . (Dix in sod., 2006)

Emisije iz prometnega sektorja se bodo v letu 2007 v primerjavi s predhodnim letom zvišale. Vse nevarne emisije, žveplov dioksid (SO_2), ogljikov dioksid (CO_2) in dušikov oksid (NO_x). (Genera, 2006)

2.2.1 Prekoračene vrednosti kvalitete zraka

Dejstvo, da so vrednosti, ki zagotavljajo kakovost zraka lahko presežene, je naraščajoč problem za naslednje projekte, posebej v urbanih predelih:

- dolg predor in gost promet povzroči nastanek velike količine dimnih plinov
- občutljivo okolje (velike koncentracije v bližini bivalnih objektov – portali in/ali prezračevalni objekti). (Dix in sod., 2006)

Uporaba novega predora ponavadi poveča koncentracijo v območju predora. Na drugi strani predor znotraj večjega območja pomeni boljšo kakovost zraka. To se lahko zgodi zaradi številnih okoliščin, kjer je:

obstoječa cesta pokrita, oz. predor nadomesti cesto ali nova cesta s predorom prevzame glavnino prometa ostalih mest. To povečuje dvom kako upravičiti in pridobiti podporo za nove projekte, ki lokalno zelo onesnažujejo, v širši okolici pa precej manj, kot ceste.

Projekti za avtocestne predore priporočajo skrbno analizo saj ni nujno potrebno, da prispevajo nove emisije ampak samo prerazporejajo emisije, ki že nastajajo v cestni mreži, oz. lahko prispevajo v prihodnosti k optimalni razporeditvi emisij. (Dix in sod., 2006)

Eden izmed osnovnih gonilnikov kvalitete zraka v mestih je celotna količina emisij, ki nastanejo v motorjih z notranjim zgorevanjem. Predori lahko optimizirajo le majhen delež emisij, ki nastanejo v cestni mreži. Predori ne morejo nadomestiti prenosa zvoka.

Kakorkoli že, napor bo pripomogel doseči sprejete cilje za kakovost zraka, vsaj za območje predorov in za občutljiva območja, kjer iz predorov v okolje izstopajo emisije.

2.2.2 Optimiziranje kvalitete zunanjega zraka v okolici predorov

Vrsta tehnik je na razpolago že med projektiranjem, nato med delovanjem in na koncu obnovo območja cestnega predora, kako nadzirati zunanjo kakovost zraka z izboljšanim nadzorom nastalih emisij iz predora. Te koristi in možnosti načrtovanja se nadaljujejo skozi vso življenjsko dobo predora. Pomembno je tudi to, da mnogo predorskih načrtovanj predvideva spremembe pri nadzoru kvalitete zraka v času obstoja predora, vključujoč objekte, kot so prostor za čistilne tehnologije, daljši navpični jaški in izboljšano prezračevanje, kjer so bili sistemi nadgrajeni z namenom reševanje problemov kvalitete zraka, ko je npr. ¹sistem za čiščenje delcev. (Dix in sod., 2006)

Nadzor nad emitiranim zrakom iz predora s tehniko razprševanja je daleč najbolj popularen. Velika večina vseh predorov na svetu se zanaša na razprševanje emisije skozi portale. Zato da bi zagotovili primerno kakovost zraka neposredno pred predori, bi bili verjetno potrebni izpusti preko vertikalnih jaškov. Pri načrtovanju predorov so uporabljena znana matematična orodja z namenom določevanja vpliva onesnaževanja in potrebnih izboljšav predora in/ali prezračevanja.

Razprševanje uporablja vrsto tehnik za zagotavljanje temeljitega mešanja emisij vozil s takšno količino zunanjega zraka, da je dosežen standard kakovosti okoliškega zraka. Tehnike razprševanja zagotavljajo boljši rezultat kot so vrednosti emisij na zunanjih cestah.

Od nekaj tisoč predorov na svetu jih ima le majhen delež (< 1%) vertikalno razprševanje (vertikalni jaški) in samo <0,01% jih ima tehnologije za odstranjevanje onesnaženja iz prezračevalnega predorskega zraka. (Dix in sod., 2006)

¹ sistem za čiščenje delcev je nameščen v Japan Ten-nohzan Tunnel

Kakovost zunanjega zraka je lahko nadzirana v katerikoli obliki meritev:

- strateško načrtovanje
- neposredna bližina urbanih področij
- neposredna bližina za kakovost zraka občutljivih aktivnosti
- zveza med predorom in sosednjo cesto - meteorološki pogoji
- tehnike razprševanja onesnaženja
- lokacije razprševanja (portali, odprtine, jaški, ipd.)
- načrtovanje prezračevanja
- Tehnologije odstranjevanja onesnaženja
- Odstranjevanje majhnih delcev
- Odstranjevanje NO_x, NO₂
- Predpisi o cestni rabi
- dovoljenja za vrste vozil
- čas uporabe
- cestnine
- upravljanje prometa z zmanjšanjem kapacitet
- znižanje dovoljene hitrosti
- izboljšanje obnašanja med vožnjo
- pogled na obratovanje predora
- redno čiščenje predora zaradi visokih koncentracij majhnih delcev
- kontrola prezračevalnih kapacitet
- ostala merila (se še preučujejo)
- uporaba deionizirajočih čistilnih sredstev na stenah in stropih z namenom preprečevanja nabiranja finih delcev
- uporaba lepljive tekočine na cestnih površinah v obliki filma, ki zadrži majhne delce na cestišču
- najbolj primerna merila so lahko izbrana z ugotavljanjem
- kakovost zraka v soseščini predora
- vpliv tako v in izven predora.

(Dix in sod., 2006)

2.3 Vrste emisij

2.3.1 Emisije ogljikovega dioksida v prometu

Največji povzročitelji ogljikovega dioksida v prometu so: osebna vozila z 32 %, transport s tovornimi vozili 33% glede na celotno količino nastalega CO₂ (ostalo termoelektrarne, gospodinjstva in industrija, vulkani, ipd.). (Lenz, Pischinger, 2000)

Zmanjšanje porabe za leto 2020 bi lahko na primer po ECE 1/3 MIX-u dosegli z znižanjem vrednosti C_w za 23%, upora pri kotaljenju za 30 %, izboljšanje pogonskega izkoristka za 20%, itn. Razmerje med potrebnim delovanjem pogona za premagovanje zračnega upora in izračunano porabo goriva je definirano kot pogonski izkoristek. Pogonski izkoristek je torej nastal iz karakteristik porabe, zasnove pogona in potrebne pogonske moči. (Lenz, Pischinger, 2000)

Emisije CO₂ se bodo v letu 2007 v prometu povečale za 6,2 % glede na leto 2006 – z 4736 na 5030 tisoč ton. Promet bo predstavljal 31,2 % delež vseh emisij CO₂. (Genera, 2006)

2.3.2 Emisije žveplovega dioksida v prometu

Žveplov dioksid je verjetno najbolj znan polutant. Emisije nastanejo tako v industriji, kot tudi v naravi, kjer so glavni vir vulkani. Plin je brez barve in značilnega vonja. Zaradi velikih koncentracij (preko 10000 µg/m³) pride do zožitve bronhijev in sapnika in do ti. kemičnega bronhitisa. (Dix in sod., 2006)

Koncentracije med 2600 do 2700 µg/m³ povzročajo bronhospazmo pri astmatikih.²

Pri koncentracijah preko 10000 µg/m³ ima žveplov dioksid oster dražeč vonj. Na podlagi zdravstvenih priporočil WHO je dovoljena deset minutna izpostavljenost 350 µg/m³. Do te stopnje je pričakovana zaščita astmatikov. (Dix in sod., 2006)

² WHO je leta 1986 predstavil izsledke o vplivu SO₂ na astmatike.

Količine skupne emisije žveplovega dioksida (SO_2) so v Sloveniji izračunane po metodologiji CORINAIR. Na promet odpade približno 1% vseh emisij. (MOP – ARSO, 2004)

Emisije SO_2 se bodo v letu 2007 glede na predhodno leto zvišale iz 0,82 na 0,90 tisoč ton.

Sektor prometa bo od vseh sektorjev skupaj prispeval k emisijam SO_2 v RS 4,1 %.

(Dix in sod., 2006)

2.3.3 Emisije dušikovih oksidov v prometu

Obstaja veliko vrst dušikovih oksidov, a najbolj pomemben pri preučevanju vplivov na zdravje ljudi je dušikov dioksid (NO_2). Dušikovi oksidi imajo pomembno vlogo pri pojavih onesnaženosti zraka, kot so ³zakisljevanje, ⁴eutrofikacija in fotokemični smog. Glavni vir dušikovih oksidov v urbanih območjih je promet. NO je manj strupen od NO_2 , odvisno od pogojev. Ozon najdemo v urbanih predelih, kot posledico oksidacije, pri čemer se NO preoblikuje v NO_2 v nekaj minutah. WHO navaja, da se 50 % NO pretvori v NO_2 v 1 minuti pri navzočnosti 0,1 ppm ozona.

Pomemben vpliv na količino dušikovih oksidov ima ozon. Mejna urna vrednost je $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in povprečna letna koncentracija je $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

"Človek je izpostavljen pretežno antropogenim emisijam, kot je zgorevanje fosilnih goriv in pri zgorevanju v avtomobilskih motorjih. V večini antropogenih emisij, je primarna oblika dušikov oksid (NO), ki predstavlja od 5 do 10 % vseh NO_x iz motornih vozil." (Dix in sod., 2006)

³ zakisljevanje je stopnja zakisanosti zraka zaradi povečevanja koncentracij SO_2 , NO_x in NH_3 v zraku

⁴ eutrofikacija pomeni zasičenost voda s hranilnimi snovmi iz emisij dušikovih oksidov in amoniaka. Delež iz zraka je 60%

Povedati je potrebno tudi to, da NO_x nastajajo pri zgorevanju dušika v gorivu, ni pa dušik vedno sestavni del goriva. Pri dovolj visoki temperaturi se NO pretvori v NO_2 . Stopnja NO_2 , ki presega $3760 \mu\text{g}/\text{m}^3$, povzroča poškodbe pljučnega tkiva, pri čemer so astmatiki še bolj ogroženi. (Dix in sod., 2006)

Količine skupne emisije dušikovih oksidov (NO_x) so v Sloveniji izračunane po metodologiji ⁵CORINAIR, na podlagi ocen emisij, dobljenih iz statističnih podatkov (prodana goriva). Delež cestnega prometa je 58 % vseh emisij, ostalega prometa pa 1%, skupaj kar slabih 60 %. (MOP-ARSO, 2006)

Emisije NO_x so se v Sloveniji zmanjšale za dobrih 9 % v primerjavi z letom 1990. To zmanjšanje je posledica povečanja deleža vozil z vgrajenim katalizatorjem. Cestni promet ostaja glavni vir onesnaženosti. (MOP-ARSO, 2006)

Emisije NO_x se bodo v letu 2007 v prometu povečale iz 36,21 na 38,94 tisoč ton. Promet bo prispeval največji delež emisij NO_x med vsemi sektorji, to je 62,6 %. (Genera, 2006)

2.3.3.1 Tehnologije za odstranjevanje NO_2

NO_x nastajajo pri visokih temperaturah zgorevanja v konvencionalnih motorjih z notranjim zgorevanjem. Emisije NO_x vsebujejo največ NO, ki se v ozračju spremeni v NO_2 . Slednji je z okoljskega vidika bolj pomemben od NO. Pri sedanji tehniki vozil je 10 do 15 % NO_x -ov emitiranih kot NO_2 , največ pa ostane NO. (Dix in sod., 2006)

Na Japonskem sta bili razviti dve vrsti redukcije. V prvi, ki se imenuje adsorpcijski sistem, so molekule NO_2 odstranjene s fizikalno adsorpcijo.

V drugi, ki se imenuje absorpcijski sistem, so molekule NO_2 kemično spremenjene v nevtralne soli. Oba sistema zagotavljata 90% odstranitev NO_2 . (Dix in sod., 2006)

⁵ CORINAIR CORE INventory of AIR, Commission of the European Community, je enoten evropski program in metodologija za zbiranje podatkov, izračun in prikaz emisij škodljivih snovi v zrak

2.3.4 Emisije nemetanskih hlapnih ogljikovodikov v prometu

Količine skupnih emisij nemetanskih hlapnih ogljikovodikov (NMVOC), so v Sloveniji izračunane po metodologiji za izdelavo Državnih emisijskih evidenc, ki temelji na metodologiji CORINAIR, na podlagi ocen emisij, dobljenih iz statističnih podatkov (prodana goriva). Delež cestnega prometa je 30,8 % vseh emisij, ostalega prometa pa 0,1%, skupaj 31 %. (MOP-ARSO, 2006)

2.3.5. Policiklični aromatski ogljikovodiki

Policiklični aromatični ogljikovodiki nastajajo zaradi nepopolnega zgorevanja organskih materialov. Pri vdihavanju se absorbirajo v pljučih, vendar se takoj prebavijo. Vdihovanje povzroča raka na pljučih, ⁶imunotoksičnost, ⁷genotoksičnost, rakotvornost. (Dix in sod., 2006)

Najbolj raziskan je Benzopiren (BaP), ki predstavlja indikator za rakotvorne policiklične aromatske ogljikovodike v zraku. Nastajanje PAH med kuhanjem in atmosferskega odlaganja na žita, sadje in zelenjavo ima za posledico, da je hrana glavni vir izpostavljanja človeka policikličnim aromatskim ogljikovodikom. (Dix in sod., 2006)

Rakotvornost mešanic PAH je lahko povzročena z navzočnostjo drugih komponent, ki nastanejo pri nepopolnem zgorevanju. Potrebno je več podatkov za razumevanje rakotvornosti PAH, pri čemer ni možno določiti varne meje. (Dix in sod., 2006)

2.3.6 Benzen

Benzen (C_6H_6) je brezbarvna tekočina. Največji vir emisij benzena v zraku so motorji z notranjim zgorevanjem, izgube zaradi izparevanja pri ravnanju, distribuciji, skladiščenju bencina. Benzen, emitiran v atmosfero, se razgradi v manj kot enem dnevu.

⁶ imunotoksičnost je snov, ki deluje strupeno na imunski sistem (priželjc, vranica, bezgavke, kostni mozeg)

⁷ genotoksičnost vpliva na genski material, vodi v mutagenozo (mutacije) in odpira pot k rakavim obolenjem

Izpostavljenost velikim stopnjam povzroči ⁸nevrotične simptome. V smrtni dozi je bila stopnja izpostavljenosti 63800 mg/m³ v času 5 do 10 minut. Stalna izpostavljenost velikim količinam strupenega benzena lahko poškoduje kostni mozeg. Je kancerogen. Veliko število levkemije hrbtne mozga in poškodb rdečih krvničk je posledica izpostavljenosti benzenu.

Za benzen v zraku se varnostne stopnje ne da predpisati, saj ni znane varne meje. V koncentraciji 1 µg/m³ benzena v zraku, je ocenjena življenjska doba tveganja pred levkemijo v območju od 4.4 – 7.5 x 10⁻⁶µg/m³. (Dix in sod., 2006)

2.3.7 Onesnaženost zraka z ozonom

Troposferski Ozon je onesnaževalec in ima dokazano škodljiv vpliv na človeka in rastline, v stratosferi pa preprečuje prekomerno prodiranje UV svetlobe. (Faganelli, 1999)

Ozon je sekundarni polutant in ni emitiran direktno. Nastaja v atmosferi iz različnih predhodnih komponent. Te so: NO_x, fotokemično reaktivne organske sestavine, reaktivni ogljikovodiki, reaktivne organske spojine, nemetanski ogljikovodiki, ogljikovodiki in hlapljive organske snovi. Nadzor ozona zahteva strategije za nadzor predhodnih sestavin in mora prikazati posledice za dovzetnost zunanji izpostavljenosti ozonu. Glavna težava se kaže v zmanjševanje funkcije pljuč in poslabšanje bolezni pljuč do točke, ko začne naraščati smrtnost. Nobena mejna stopnja izpostavljenosti ni določena, to pomeni, da obstaja linearna povezava med povečanjem koncentracije ozona in povečanjem posledic na zdravje.

Po navodilih zdravstvene organizacije (Fact Sheet No. 187 WHO's 1999 Guidelines for Air Pollution Control), se količina ozona določi tako, da se iz urnih koncentracij izračuna najvišja povprečna 8 urna drseča vrednost za vsak dan. Najvišja dovoljena 8 urna koncentracija je 120 µg/m³. Opozorilna koncentracija je definirana kot urna koncentracija, ki je višja od 180 µg/m³.

⁸nevrotičnost – depresije, histerije, živčnost, motnje koncentracij, motnje spomina, motnje razumskega razmišljanja

Pri tako visoki koncentraciji je potrebno obvestiti ljudi. Alarmna vrednost je $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in v Sloveniji še ni bila dosežena. (Faganelli, 1999)

V Sloveniji največ ozona povzroči promet. Koncentracije ozona so odvisne od sončne svetlobe. Pomemben je tudi transport koncentracij ozona prek meja, npr. padska nižina je območje v okolici Slovenije, kjer nastajajo največje količine ozona. (Faganelli, 1999)

V Sloveniji so vsa območja v najslabšem kakovostnem razredu, saj koncentracije povsod, tudi na podeželju in v višjih legah, presegajo mejne vrednosti. Najbolj onesnaženo območje je na Primorskem. (Faganelli, 1999)

2.3.8 Onesnaženost zraka z delci

Delci so mešanica trdnih in tekočih delcev, suspendiranih v plinu, in so različnih oblik, fizikalne in kemijske sestave. Del delcev, ki so navzoči v zraku, nastane kot posledica neposrednih emisij (primarni delci), drugi pa je posledica različnih procesov v atmosferi (sekundarni delci). (Faganelli, 1999)

Delci v velikostnem razredu med $0,01$ in $0,1 \mu\text{m}$ so v tako imenovanem nukleacijskem območju, delci med $0,1$ in $1 \mu\text{m}$ v akumulacijskem območju, za delce, večje od $1 \mu\text{m}$, pa se uporablja izraz grobi delci (coarse particles). Navzočnost delcev v atmosferi ima lahko škodljiv učinek na zdravje. Večji delci ($>10 \mu\text{m}$) se prilepijo na nosne dlačice, v grlu, v žrelu in zg. bronhijih. Bolj fini delci prodrejo v respiratorni trakt z večjo količino odlaganja, če ljudje dihajo skozi usta. Najbolj drobni delci se nalagajo v pljučih.

Učinki na zdravje so odvisni od kemične sestave delcev in njihovo reagiranje z ostalimi polutanti.

V Sloveniji so urne mejne koncentracije ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) presežene vsaj tridesetkrat letno. Večinoma so te lokacije na prometnih območjih, torej emisije iz prometa močno vplivajo na vsebnost delcev v zraku. (Faganelli, 1999)

Vsa območja v Sloveniji so razvrščena v slabši kakovostni razred. Onesnaženost zunanega zraka z delci poleg ozona postaja največji problem pri zagotavljanju kakovosti zraka. Enako velja tudi za navzočnost delcev v predorih, kjer se zmanjša vidljivost.

Dnevna mejna vrednost za PM_{10} v Evropi je $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ki od leta 2005 ne sme biti presežena več ko 35 krat na leto. (Dix in sod., 2006)

CAFÉ (The Clean Air for Europe), je program, ki kaže, da je meja presežena v skoraj vseh večjih urbanih središčih. Lokacije južno od Alp trpijo bolj zaradi neugodnih pogojev razprševanja, kot pa na lokacijah severno od Alp (nasploh nižje hitrosti vetra, bolj stabilni pogoji razprševanja, hitra kondenzacija, padavine, ipd.). Neugodni pogoji za razprševanje imajo lahko za posledico težave s PM_{10} tudi v manjših naseljih. (Dix in sod., 2006)

Agencija RS za okolje je zaključila pilotni projekt »Opredelitev virov delcev PM_{10} v Sloveniji«. Projekt se je začel izvajati pred slabim letom na treh merilnih mestih: Ljubljana Bežigrad, Maribor in Trbovlje. Meritve delcev PM_{10} so se izvajale kontinuirano, zajeli smo zimsko in poletno obdobje. Sedaj smo samo še v fazi analiz in interpretacije podatkov. Cilj projekta je bil pridobiti relevantne informacije o kemijskih in fizikalnih lastnostih delcev v Sloveniji, analizirati in določiti prispevke posameznih, najpomembnejših virov na omenjenih merilnih mestih v Sloveniji ter oceniti delež daljinskega transporta.

Stanje na področju onesnaženosti zraka z delci je v Sloveniji dokaj pereče, saj koncentracije PM_{10} pogosto in tudi dolgotrajno presegajo mejne vrednosti, določene z zakonodajo.

PM_{10} in $PM_{2,5}$ predstavljajo delce, ki so dovolj majhni, da se lahko zadržujejo v ozračju v časovnem obdobju od nekaj ur do več dni in lahko tako s pomočjo (preko) transporta zračnih mas prepotujejo večje razdalje od izvora do receptorja oz. prejemnika. Delci lahko vplivajo tako na klimo, vidljivost, na tla in na kakovost vode. Zlasti pa je kritičen vpliv na zdravje ljudi. Epidemiološke raziskave so pokazale, da lahko že relativno nizke koncentracije delcev povzročijo bolezenska stanja in smrtnost ljudi.

Na Agenciji RS za okolje spremljamo meritve delcev PM_{10} na devetih merilnih mestih po Sloveniji. Najvišje koncentracije delcev izmerimo v urbanih in industrijskih območjih, a tudi

v takšnih območjih ima na nivo koncentracije delcev velik vpliv daljinski in regionalni transport zračnih mas. (ARSO, 2007)

Področje delcev ureja Uredba o žveplovem dioksidu, dušikovih oksidih, delcih in svincu v zunanem zraku (UL RS, št. 52/02). Zakonsko predpisana dnevna mejna vrednost ja PM10 je $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ki je lahko presežena 35-krat v koledarskem letu. Če je prekoračitev več kot 35, je potrebno izdelati plane in programe za zmanjšanje koncentracije delcev.

2.3.9 Obraba gum, vozišč in zavor

So primarna emisija letečih delcev (PM), ki nastanejo v cestnem prometu zaradi obrabe gum in zavor vozil in zaradi obrabe cestnih površin. Delci iz izpuhov niso obravnavani. Viri emisij delcev so obravnavani v skladu s poglavjem cestnega prometa v Vodiču evropske unije (SNAPS 0701-0705), in zajema osebne avtomobile, lahka gospodarska vozila, težka gospodarska vozila in dvokolesnike. (Leonidas, 2003)

Promet je prispeval največji delež tudi pri emisijah trdnih delcev v letu 2005, in sicer 42,1 %. Upoštevani so tudi trdni delci, ki nastajajo zaradi obrabe cestišč, gum in zavor. Izračun emisij trdnih delcev za leti 2006 in 2007 je postal zaradi majhnega deleža porabe trdnih goriv nenatančen (zaokroževanje bilančnih podatkov na 1 km), zato jih v Energetska bilanca za leto 2007 ne navaja. (Genera, 2006)

Leteči delci nastanejo zaradi interakcije gume vozila in cestne površine, podobno nastanejo delci pri zaviranju vozil. V obeh primerih so strižne sile z relativnim momentom površine, glavni mehanizem za nastanek delcev. Sekundarni mehanizem vključuje izhlapevanje snovi s površine zaradi visoke temperature, ki nastane pri stiku. (Leonidas, 2003)

Gume vozila nosijo vozilo in tovor, pri čemer nastane trenje zaradi stika in pri krmiljenju. Velikost absorpcije je odvisna od kvalitete površine in načina vožnje. Pnevmatika je kompleksna gumasta zmes, čeprav točna sestava ponavadi ni znana iz komercialnih razlogov proizvajalcev. Gledano skozi palec, 75% zmesi tvori guma stiren butadien, 15% je naravne gume in 10% polibutadiena v gumah za osebna vozila. Kovinski in organski dodatki so

pomembni za ohranjanje lastnosti materialov med izdelavo in ob uporabi. Cinkov oksid (ZnO) je najbolj pomemben za galvanizacijo. Za osebna vozila se gumam osebnih vozil doda 1,2%, za tovornjake pa 2,1% ZnO. (Leonidas, 2003)

Trenutna stopnja obrabe gume je odvisna od veliko različnih faktorjev, kot so: način vožnje, oblika vozila, masa vozila, stanje ceste in gume, starost gume in vreme. (Leonidas, 2003)

Pri pogonu na prednji kolesi, prihaja tako do trenja zaradi pogona, kot tudi do trenja zaradi krmiljenja, zadnji kolesi pa sta namenjeni samo uravnoveženju vozila in prevozu tovora. Pri pogonu na zadnja kolesa, so prednja kolesa namenjena samo krmiljenju, trenje zaradi pogona pa nosijo zadnja kolesa. Iz tega sledi, da je pri prednjem pogonu večja obraba prednjih gum, pri zadnjem pa zadnjih gum. Ugotovljeno je bilo, da pri prednjem pogonu nastane med 69-85% celotne obrabe vozila, kar je verjetno tudi posledica napak na krmilnem mehanizmu. Prihaja do velike periferne neenakomerne obrabe nizekotlačnih gum. Pri pogonu na zadnja kolesa, pa je bil delež obrabe enakomerno porazdeljen na prednje in zadnje gume. Življenjska doba gum za osebna vozila je 60.000 km (izguba materiala je okoli 1,5 kg na gumo), za tovornjake 100.000 km (izguba materiala do 10 kg na gumo). (Leonidas, 2003)

Velik vpliv na obrabo gum imajo tudi vremenski pogoji in stanje ceste, Mokra vozišča so manj hrapava in nastane ob stiku gume z voziščem manj trenja, na drugi strani je makadamska cesta bolj hrapava. (Leonidas, 2003)

Med vožnjo vozil, se cestišče segreje, pri čemer nastane skupna količina emisije delcev iz cestnega prometa. Cestišče je lahko betonsko (grobi agregat, pesek, cement), ali asfaltno (mešanica mineralnega agregata, peskov, polnil, bitumensko vezivo), pri čemer je sestava zmesi od države do države različna. Na splošno je kamnitih agregatov med 90 – 95%, bitumenskega veziva pa med 5-10%. Lastnosti asfalta se lahko spreminjajo s pomočjo aditivov, kot so adezivi, polimeri in ostali dodatki. V primeru rabe ožebljenih gum pozimi je obraba vozišč še toliko večja. Na Norveškem znaša količina obrabljenega asfalta okoli 250.000 ton letno. (Leonidas, 2003)

Osnovna naloga zavor je ustavljanje vozila. V uporabi sta dva glavna sistema: diskaste zavore in bobnaste zavore. Prve se največ uporabljajo pri manjših vozilih (osebna vozila in motorji) in na sprednjih kolesih lahkih dostavnih vozil, bobnaste zavore pa se uporabljajo pri težjih vozilih (tovornjaki, avtobusi, ipd). Zavore so iz zelo različnih materialov, od kovin, mineralov, keramike do umetnih kompozitov. Veliko vozil je še vedno opremljeno z zavorami, ki vsebujejo azbest. Obraba zavor je bolj pomembna od obrabe gum. Pri manjših vozilih in motorjih, so zavore najbolj obremenjene na sprednjih kolesih, ker zavore na zadnjih kolesih vplivajo na stabilnost vozila, zato so zavorne ploščice spredaj zamenjane na 30.000 km, zadnje pa na 50.000 km. (Leonidas, 2003)

Pri večjih vozilih je zavorna sila bolj enakomerno porazdeljena po oseh, tudi zaradi nižjih hitrosti in naloženega tovora, zavore naj bi vzdržale 60.000 km. Obraba zavor je odvisna tudi od načina delovanja (pnevmatsko, elektronsko), zato je težko določiti življenjsko dobo zavor. (Leonidas, 2003)

Emisije delcev zaradi obrabe gum, vozišča in zavor niso posledica izpuhov, zato so za njihovo merjenje in določanje v rabi trije postopki:

- določanje z merjenjem v laboratoriju, velikokrat je ta metoda manj uporabljena, ker je simulacija nepopolna
- vzorčenje in analiziranje zraka v okolici, je najbolj razširjena metoda, vzorci aerosolov so odvzeti v določenem okolju (predori, viadukti, vkopi, podvozi, ipd.), razdeljeni so glede na vire nastanka s kemičnimi indikatorji. Metoda se imenuje tudi metoda komponent.
- kombinacija določevanje emisij velikosti profila prenosa z merjeno obrabo. Ta je merjena s tehtanjem gum.

2.3.10 Emisije ogljikovega monoksida

CO je brezbarven plin, brez vonja, brez okusa, malce manj gost od zraka. Afiniteta do hemoglobina je 210 krat večja od kisika. Nastane ti. karboksihemoglobin (COHb), ki ovira normalen metabolizem. Verjetno je eden izmed najbolj navzočih polutantov v zraku. Nastane

pri nepopolnem zgorevanju ogljika. Nastane tudi pri nekaterih industrijskih in bioloških procesih.

Znaki zastrupitve s CO so utrujenost, glavobol. Da gre za zastrupitev s CO, je potrebno preseči 10 % zasičenja v krvi s COHb. To je približno enakovredno koncentraciji v atmosferi (70 mg/m^3), za osebo, ki opravlja lažja opravila.

2.3.11 Svinec in nepopolno zgorevanje

V izpušnih plinih nastajajo kot posledica nepopolnega izgorevanja primesi, ki so v gorivih. To sta predvsem Pb in žveplo. Približno 80% v bencinu vsebovanega Pb zapusti motor z izpušnimi plini. Žveplo pa je navzoče predvsem v dieselskem gorivu. Na trenutno koncentracijo polutantov vzdolž cestišča (imisija polutanta) vplivajo trenutni atmosferski pogoji (predvsem smer in hitrost vetra).

Vpliv gostote prometa je pomemben predvsem ob zgoščitvah (kolone). Gostoto prometa (GP) definiramo kot število vozil na enoto dolžine cestišča enega voznega pasu. Gostota prometa doseže maksimum, ko se kolona zaustavi (hitrost vozila se približuje 0 km/h). Zelo goste kolone, ki se premikajo z majhnimi povprečnimi hitrostmi, predstavljajo nestabilni pretok (P). Pretok pomeni število vozil, ki v časovni enoti prevozi določeno razdaljo. Nestabilni pretok pomeni, da del vozil na cestišču miruje, del pospešuje, del pa zavira. To so pojavi raztezanja in krčenja, torej valovanja. Za onesnaženje pomeni tak režim prometa visoko emisijo CO in C_xH_y , pa tudi polutantov, ki so v gorivu. Ko je gostota prometa majhna, se hitrost vozil približuje maksimalni dovoljeni vrednosti. Onesnaženje s CO in C_xH_y se zmanjša, poveča pa se obremenitev okolja z NO_x . Le-ta je odvisna predvsem od maksimalne hitrosti vozil ter od dodatnih obremenitev motorja (vzpetine). (Faganelli, 1999)

Svinec je strup, ki se kopiči, posledice njegovega delovanja pa se kažejo na ledvicah, krvi in centralnem živčnem sistemu. Dokazano je, da izpostavljenost majhnih otrok vodi v umsko zaostalost med 2. in 3. letom za vsakih 10 mg/dl. Podobno, kot je svinec vplival na okolje, vpliva tudi na človeka. Največ svinca se zaužije z onesnaženo soljo in prahom, ki ga otroci zaužijejo pri svojih aktivnostih (umazane roke). Zato je zelo pomembna osebna higiena

(umivanje rok in obraza) pred obroki hrane, oprati je potrebno igrače in zelo dobro je posejati travo ali pa kontaminirano površino kako drugače prekriti. (Dix in sod., 2006)

Z uvedbo neosvinčenega bencina v razvitih državah so se emisije svinca nedvoumno in strmo znižale.

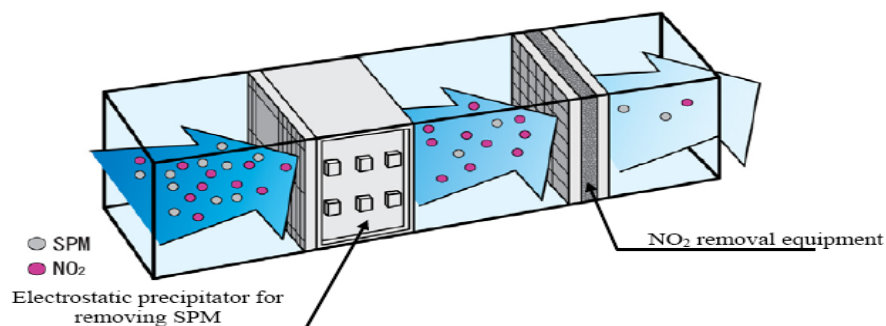
2.4 Čiščenje zraka in predorov

Odstranjevanje delcev ima dolgo zgodovino pri vzdrževanju vidljivosti v predoru, kjer je težko zagotoviti zunanji zrak. Odstranjevanje delcev za boljšo kakovost zunanjega zraka je redko, a je bilo kljub temu uvedeno v nekaterih predorih po svetu (Japonska, Norveška, in Italija), kjer kakovost zunanjega zraka velja za slabo, zato so razprševalne tehnike neuspešne. (Dix in sod., 2006)

2.4.1 Odstranjevanje delcev iz zraka v predorih

Kar nekaj tehnologij za odstranjevanje delcev se danes uporablja. Tehnologije so se zelo izboljšale v zadnjih petih letih (manjše izgube tlaka, učinkovitost odstranjevanja prahu, daljša življenjska doba, boljši servis). Zato nekateri posamezni projekti v Aziji in eden v Evropi predvidevajo inštaliranje te opreme za doseg ciljev za izboljšanja zunanje kvalitete zraka. (Dix in sod., 2006)

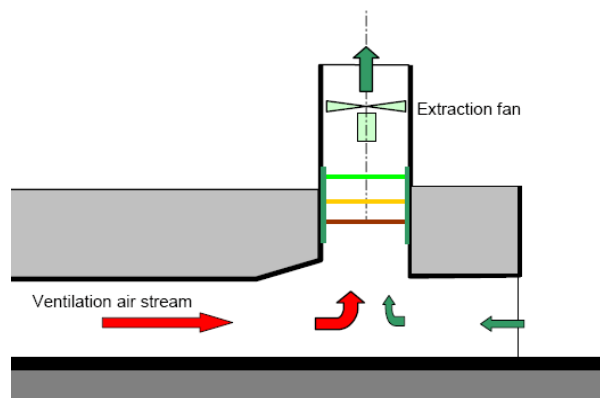
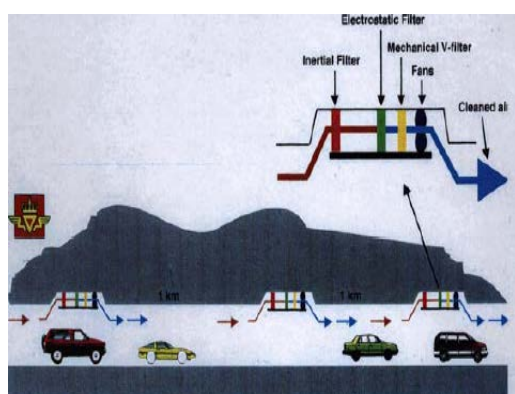
Sitem za čiščenje zraka vsebuje naprave za odstranjevanje NO₂, in elektrostatični filter za odstranjevanje trdnih delcev (SPM). Sistem za odstranjevanje NO₂ je bil razvit za čiščenje zraka v velikih mestih, kjer standardi niso nikoli izpolnjeni. Sistem za odstranjevanje NO₂ je vgrajen v vertikalnih jaških. Sistem je izveden na Japonskem v štiripasovnem predoru med Tokijem in sosednjimi mesti. Predor je dolg 10 km in ima 9 vertikalnih jaškov. (Dix in sod., 2006)



Sistem za čiščenje NO₂ in trdnih delcev (Draft PIARC, 2006, str. 33)

Princip čiščenja trdnih delcev temelji na električnem polju med dvema elektrodama, ki sta pod visoko napetostjo, čiščenje NO₂ pa na osnovi absorberjev, ki imajo obliko satovja, kjer se s pomočjo KOH pretvori v KNO₂ in KNO₃. Izkoristek z meseci uporabe pade, zato je potrebna regeneracija sistema po 8 do 10 mesecih (pranje sistema, sušenje, namakanje v KOH, ponovno sušenje). Izkoristek preko 90%, doba trajanja 20 let. (Dix in sod., 2006)

Obstaja tudi način fizične adsorpcije NO₂ v pore pelet. Regeneracija je potrebna po 12 dneh (raztopina Na₂SO₄). Izkoristek preko 90%, doba trajanja 20 let. (Dix in sod., 2006)



Sliki 2.1 in 2.2: Elektrostatični filtri, pritrjeni v vertikalni jašek
Fig. 2.1 and 2.2.: Electrostatics filters placed in vertical shaft

Primerjava filtrov, pritrjenih na strop ali v jašku, kaže, da je sistem z jaški bolj učinkovit.

2.4.2 Strategija čiščenja v predoru

Čiščenje sten in stropov zniža količino trdnih delcev (PM) v zraku v predoru. V nekaterih predorih se čisti tudi vozišče. Posebna tekočina ustvari na tleh filmsko prevleko, ki prepreči gibanje prahu, medtem ko je trenje zmanjšano samo za 10 – 20 %. Jasno mora biti da s strategijami lahko uravnavamo večje delce. (Dix in sod., 2006)

2.4.3 Čiščenje izpušnih plinov

Zahteve lahko dosežemo z uporabo motorja s katalizatorjem. Osnovne zahteve so pretvorba onesnaževalcev CO, HC in NO_x v CO₂, H₂O in N₂, ki manj obremenjujejo okolje. Pretvorbe potekajo po znanih reakcijah z uporabo katalizatorjev, vendar z drugačnimi zahtevami kot v petrokemijski industriji: hitre spremembe temperature (tudi do 1000 °C), volumna in sestave plinov v izpuhu, prisotnost "strupov" (Pb, P) za katalizatorje. Reakcije so: (Faganelli, 1999)

- oksidaciji - pretvorba CO in HC



- redukciji (trismerni reakciji) - pretvorba NO_x



Možne pa so tudi sekundarne katalitične reakcije, pri katerih nastajajo H₂S, NO, SO₃, HCN, H₂O in so vse razen H₂O škodljive:





Ločimo več vrst kataliziranih motorjev v odvisnosti od oksidacijskih in redukcijskih reakcij udeleženih v pretvorbah CO, HC in NO_x in lastnosti katalizatorja.

Emisije dieselskih motorjev, ki vsebujejo nizke koncentracije CO in HC, a visoke koncentracije lebdečih suspendiranih delcev, ki vsebujejo tudi aromatske ogljikovodike (PAH), izboljšamo z uporabo filtracije in oksidacije delcev pri temperaturi >600 °C. Alternativno predstavlja katalitska oksidacija pri nižji temperaturi (300 °C). (Faganelli, 1999)

Za čiščenje izpušnih plinov se uveljavljata dva osnovna postopka. Pri prvem uporabljamo za čiščenje dodatek uree (sečnina), pri drugem pa se del izpušnih plinov vrača v izgorevanje. Nekateri izdelovalci večjih gospodarskih vozil zagovarjajo tehnologijo dodatnega izgorevanja izpušnih plinov. (Čiščenje..., 2006)

Sistem SCR (selective catalytic reduction) je znan že kar nekaj časa, saj so ga uporabljali v proizvodnih procesih v tovarnah in v ladijski industriji, sedaj pa je našel pot tudi v avtomobilsko industrijo, predvsem zaradi izpolnjevanja standardov euro 4 in euro 5.

Urea (sečnina) je precej korozivna, zmrzne že pri -11⁰C, potrebni so dodatni rezervoarji, specializirane črpalke, zato je učinkovit samo pri dobro ogretyh motorjih, pri čemer pa so dobre lastnosti, da ne obremenjuje motorja, omogoča prihranek pri gorivu. Sistem deluje pri 250⁰ C, pri čemer amoniak reagira z dušikovim oksidom, kar izpušne pline spreminja v dušik in vodo:



Sistem brez aditivov CEGR deluje tako, da se del izpušnih plinov ponovno vrne v izgorevanje. Del zajetih dimnih plinov (18%, standard euro 4, 25% euro 5) se ponovno vrne v turbinski polnilnik, kjer se ohladijo in zmešajo s svežim zrakom. Zaradi nižje temperature

mešanice nastane manj NO_x-ov. Sistem je poleg "odprtih" cest uporaben tudi v urbanem okolju. (Čiščenje..., 2006)

2.5 Energija in promet

Od leta 1992 do leta 2000 je poraba končne energije v Sloveniji zrasla za 20%. Najhitreje rastejo potrebe po energiji v prometu. (Čiščenje..., 2006)

Emisije toplogrednih plinov, predvsem ogljikovega dioksida, ki izhajajo iz prometa, naraščajo hitreje kot emisije iz drugih virov. Emisije svinca so se uspešno zmanjšale, naraščajo pa emisije nekaterih predhodnikov škodljivega troposferskega ozona.

Potrebam po povečanju cestnega prometa sledi tudi gradnja cestne infrastrukture in površin, ki ga ta zaseda.

Zaradi dokaj hitre obnove voznega parka, je povprečna starost vozil v Sloveniji 7,3 leta, delež vozil s katalizatorji pa je dosegel povprečni delež v EU. (MOP – ARSO, 2004)

V Sloveniji je raba javnega prevoza v zadnjih 15 letih močno padla, zato je pomembna podpora ukrepom za izboljšanje javnega prevoza, ob predpogoju, da bi bil ta udobnejši, cenejši in pogostejši ter boljše možnosti za pešce in kolesarje.

2.5.1 Poraba končne energije

V Sloveniji se je poraba končne energije v prometu povečala za 20 PJ ali za 54,4 % od leta 1992 do leta 2000 (EU 16,5 %). Delež prometa je leta 1992 znašal 24,4 %, leta 2000 pa že 31,3 %.(MOP – ARSO, 2004)

2.5.2 Poraba naftnih proizvodov

Končna poraba utekočinjenega naftnega plina bo v letu 2007 večja za 2,0 % v primerjavi s predhodnim letom in bo dosegla 91,4 tisoč ton. (Lynx, 2006)

Končna poraba motornega bencina v prometu bo v letu 2007 manjša za 6,7 %, uvoz motornega bencina pa bo manjši za 6,3% v primerjavi s predhodnim letom. Od končne porabe motornega bencina v letu 2007, ki naj bi znašala 550,4 tisoč ton, naj bi bioetanol predstavljal 11 tisoč ton. (Lynx, 2006)

Poraba letalskega bencina in goriva za reaktivne motorje (JET) bo v letu 2007 večja za 3,3 % v primerjavi s predhodnim letom. (Lynx, 2006)

Rast porabe dizelskega goriva se bo nadaljevala tudi v letu 2007. Poraba dizelskega goriva v letu 2007 bo večja za 14,4% v primerjavi s predhodnim letom. Od porabe dizelskega goriva v prometu, ki naj bi v letu 2007 znašala 1043,5 tisoč ton, naj bi biodizel predstavljal 20,9 tisoč ton. (Lynx, 2006)

3 PREZRAČEVANJE PREDOROV IN NADZOR KAKOVOSTI ZRAKA IZ PREDOROV V OKOLJE

3.1 Prezračevanje cestnih predorov

V vseh cestnih predorih je potrebno prezračevanje, potrebno zaradi odstranjevanja onesnaženih delcev, ki nastajajo kot proizvod motorjev vozil pri normalnem obratovanju. Prezračevanje je povzročeno z naravnimi pogoji, z gibanjem vozil povzročenim "batnim učinkom", pri čemer gre za naraščanje tlaka v cevi, zato je pomembno izenačevanje tlakov, npr. z vmesnimi vertikalnimi jaški, pri čemer se učinek "batnega efekta" zmanjša. S tem se zmanjša tudi upor, pozitivna posledica pa je manjša poraba pogonskih goriv. Prezračevanje je povzročeno tudi z mehansko opremo. Izbrani način prezračevanja mora biti ekonomičen tako s stališča opreme in porabe energije, kakor tudi s stališča pogona in vzdrževanja. Način prezračevanja mora torej biti pravilno izbran, da lahko zagotovimo ustrezen nadzor nad različnimi plini, vključno z dimom, in s tem zagotavljamo zadovoljive pogoje in vidnost tudi v primeru požara, ter s tem omogočimo umik ljudem z ogroženega področja. Pri tem lahko uporabljamo naravne zakonitosti, kjer izkoriščamo s povišano temperaturo in dimom povzročen vzgon in podobne učinke, ali pa uporabimo mehansko opremo, torej prisilno prezračevanje.

"Poznamo tri načine prezračevanja cestnih predorov: normalno prezračevanje, interventno prezračevanje in začasno prezračevanje. Če imamo naravno prezračevanje, se dim, ki nastaja, dviga pod strop predvsem zaradi vzgona. Pri večji hitrosti zraka pa se dim zaradi mešanja z zrakom hitreje ohlaja in manj dviga ter s tem poslabša vidnost." (Modic, 2004, str. 3)

Interventno prezračevanje uporabljamo zato, da nadzorujemo in odstranjujemo dim in vroče pline v primeru požara. Zagotoviti moramo zadostno vidnost in primerno nizko temperaturo vročih plinov po evakuacijski poti. Običajno povečamo količino odsesovanega zraka, s pomočjo nastavljenih loput. V primeru polprečnega prezračevanja moramo tok zraka obrniti v nasprotno smer, tako da sveži zrak vstopa skozi portale in je s tem omogočeno dihanje

reševalcem. Če je izvedba predora z dvojnimi stropom in z reverzibilnimi ventilatorji, dim sesamo skozi dvojni strop. Tako vzdržujemo v predoru razmeroma čist zrak.

V primeru požara moramo najprej ustaviti, potem pa pognati ventilatorje s polno močjo. S tem preprečimo preveliko mešanje zraka in dima. Dim ostaja pod stropom dalj časa. Tako vzdržujemo tik nad cestiščem razmeroma čisto področje, ki olajša umik udeležencem v prometu in vstop reševalnim ekipam.

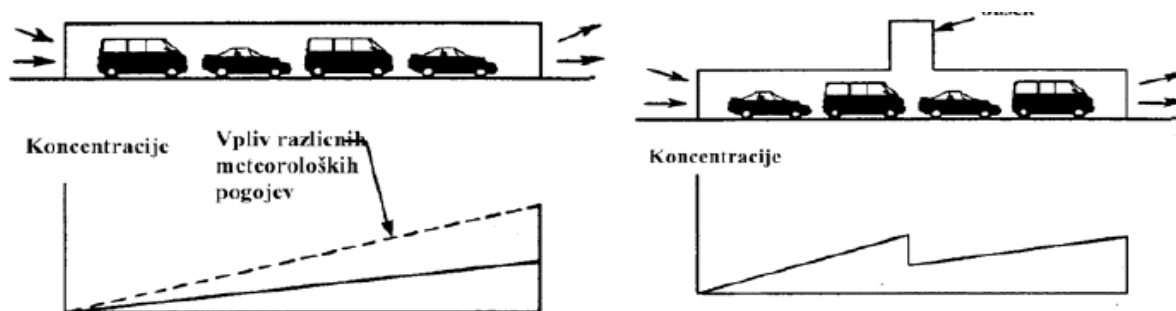
V daljših predorih moramo predvideti posamične sektorje ali cone. Tako v cono, v kateri so vozila ujeta, torej pred cono s požarom, dovajamo maksimalno količino svežega zraka, ter sesamo malo dima. Iz cone za požarom, kjer promet še poteka, pa sesamo maksimalno količino dima in vročih plinov, ter dovajamo minimalno količino svežega zraka. Tako lahko z dobro zasnovanim prezračevalnim sistemom ugodno vplivamo na razmere v predoru v primeru požara.

3.1.1 Načini normalnega prezračevanja

S prezračevanjem v normalnih pogojih, redčimo koncentracijo koncentracije škodljivih snovi, v primeru požara pa nadzorujemo dim. Pri tem moramo upoštevati vse značilnosti predora, geometrijske, prometne, okoljske in ostale. To so med drugimi dolžina predora, njegov prerez in naklon, njegova okolico, gostota prometa, smer prometa (enosmerni, dvosmerni), sestava prometa, in investicijski stroški.

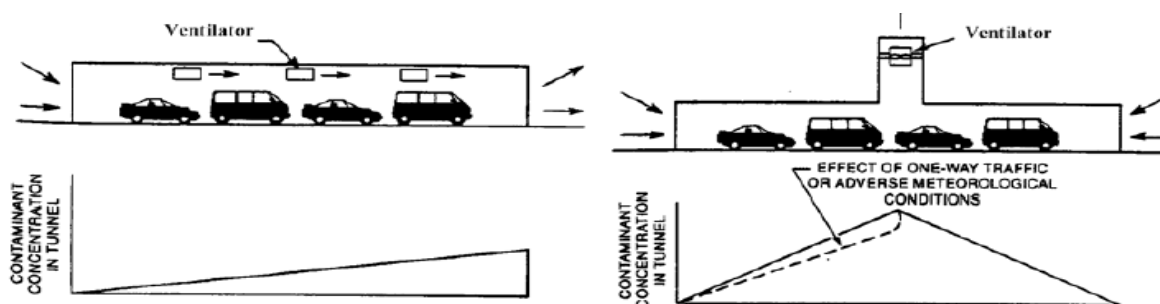
"Naravno prezračevanje zadošča pri kratkih predorih do dolžine 200 m pri dvosmernem prometu, oziroma do dolžine od 2000 do 2500 m pri enosmernem prometu. V ostalih primerih je potrebno prisilno prezračevanje. Pri enosmernem prometu poteka naravno prezračevanje s pomočjo razlike tlakov med obema stranema, oz. povzroča gibanje zraka."

(Modic, 2004, str. 4)



Naravno vzdolžno prezračevanje brez jaška in z jaškom (Modic, 2004, str. 4)

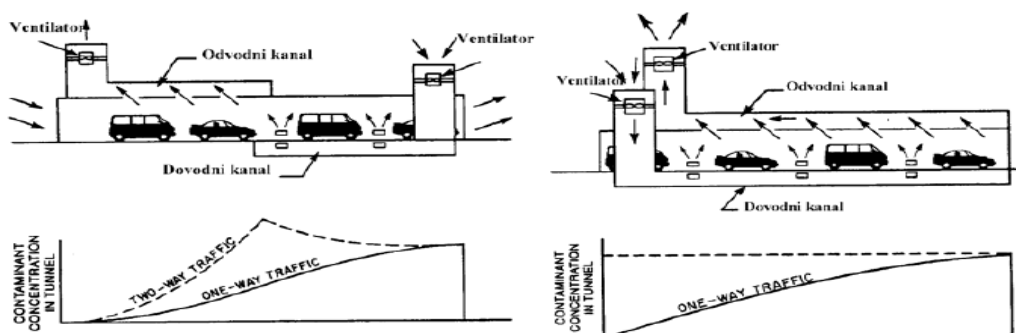
Vzdolžno prisilno prezračevanje dosežemo z vpihovanjem ali odsesovanjem zraka s pomočjo ventilatorjev, nameščenih na koncu in (ali) v sredini predora. Ta sistem je primeren predvsem v primeru enosmernega prometa do dolžine 3500 m. Pri dvosmernem prometu pa so ventilatorji za prezračevanje nujno potrebni.



Vzdolžno prisilno prezračevanje brez jaška in z jaškom (Modic, 2004, str. 4)

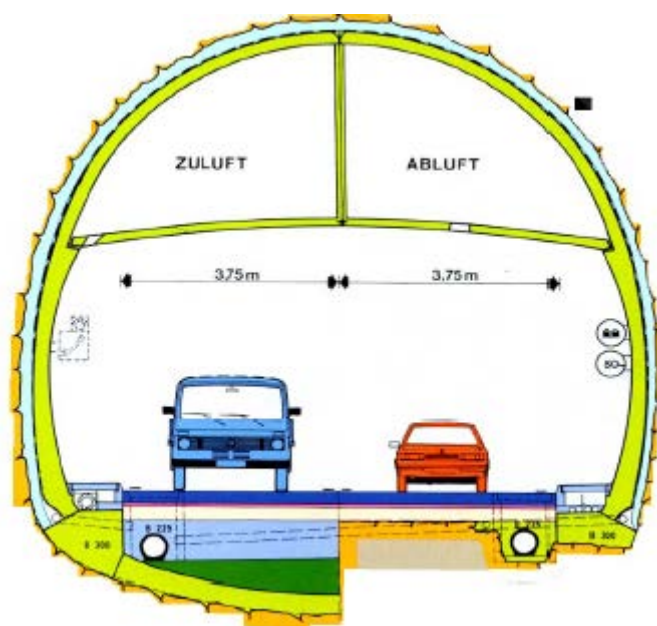
Ta primer je uporaben tudi pri predorih z dvosmernim prometom, ko se koncentracije izpušnih plinov večajo od obeh koncev predora proti sredini.

"Pri pol prečnem prezračevanju vpihujemo svež zrak s pomočjo zračnega kanala, nameščenega po celotni dolžini predora. Vpihovanje je najpogosteje od spodaj navzgor (čeprav vedno ni tako), izstop zraka je na koncih predora. Ta sistem uporabljamo za nekoliko daljše predore. Skozi predor se pojavlja relativno močan zračni tok." (Modic, 2004, str. 5)



Polprečno (levo) in prečno (desno) prisilno prezračevanje (Modic, 2004, str. 5)

Možno je tudi, da slab zrak odsesavamo s pomočjo ventilatorjev, sveži zrak pa vstopa v predor po naravni poti, zaradi podtlaka, povzročenega z odsesovanjem. Ta varianta je v primeru požara celo ugodnejša. Zrak prihaja do ventilatorjev skozi jašek, skozi jašek odhaja tudi odpadni zrak na prosto.



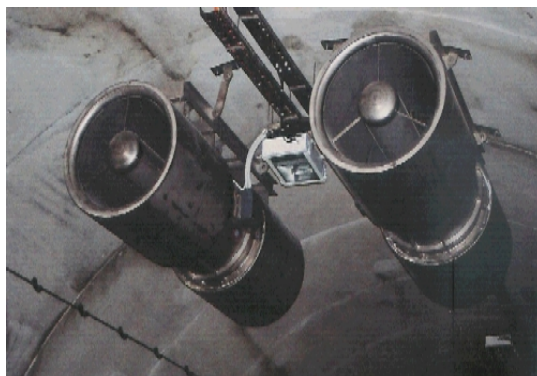
Vpihovanje in odsesovanje v predoru Plabutsch (Modic, 2004, str. 5)

Pri prečnem prezračevanju sta dva kanala, eden za dovod svežega zraka in drugi za odvod onesnaženega zraka. Odsesovanje je vedno na vrhu, od spodaj navzgor. Vpihovanje pa je lahko od tal, od spodaj navzgor, ali pa je v predoru dvojni strop, kot je prikazano na zgornji sliki. Tak sistem je zelo drag in se uporablja v dolgih predorih (tudi do 10.000 m in več). Predor je lahko razdeljen na več posameznih sekcij, v vsaki je samostojno odvajanje in

dovajanje zraka ter ustrezne ventilatorske enote. Zrak prihaja do ventilatorjev skozi jašek, skozi jašek odhaja tudi odpadni zrak na prosto.



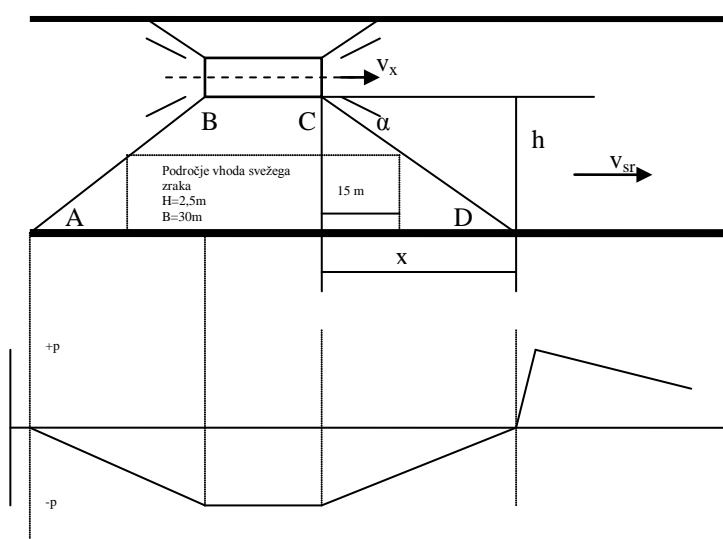
V izogib nesrečam, ki so se dogajale v evropskih avtocestnih predorih, je bilo pri zagotavljanju varnosti na področju prezračevanja v novih slovenskih avtocestnih predorih Dekani in Kastelec, vgrajenih 36 aksialnih, reverzibilnih ventilatorjev.



Posebnost teh ventilatorjev je ta, da lahko delujejo v obe smeri. Omenjeni ventilatorji v normalnih pogojih služijo za prezračevanje, v primeru nesreče (požara) pa poleg prezračevanja še za odvod dima in toplote. Ventilatorji so preizkušeni tako, da lahko delujejo pri temperaturi 250°C do 90 min in so plod domačega znanja in razvoja. Testi, ki so bili opravljeni v laboratoriju v tovarni in na licu mesta, v predoru, kažejo, da ventilatorji celo presegajo projektantske zahteve. V preteklosti sta bila opremljena tudi cestna predora Jasovnik in Trojane.

3.1.2 Določanje velikosti ventilatorjev

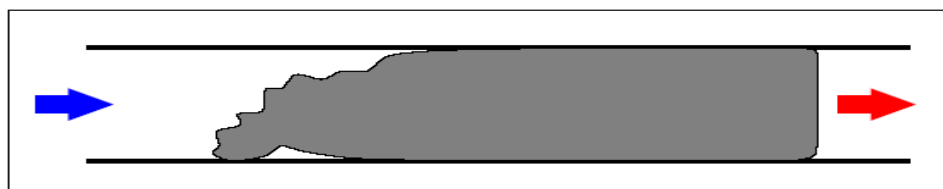
Zmogljivost ventilatorjev je odvisna od količine zraka, oz. indukcije. Na določeni razdalji "x" se masni tok zraka povečuje pod kotom $6^{\circ} - 9^{\circ}$, prav tako se povečuje masa masnega toka, po tem ostane masa nespremenjena. Hitrost zraka je srednja hitrost, ki je teoretično konstantna, dejansko pa se zmanjšuje zaradi gibanja zraka. Masa se povečuje zaradi okoliškega zraka. Če se v tej coni nahaja odprtina za vstop svežega zraka, se v masnem toku, ki ustvarja indukcijo, dodaja sveži zrak. Negativni tlak je v coni med točkami A, B, C in D. (APTA, 2003)



Slika 3.1: Hitrost, povprečna hitrost in zračni tlaki / Fig. 3.1: Speed, average speed and air pressures

3.1.3 Delovanje ventilatorjev v primeru požara

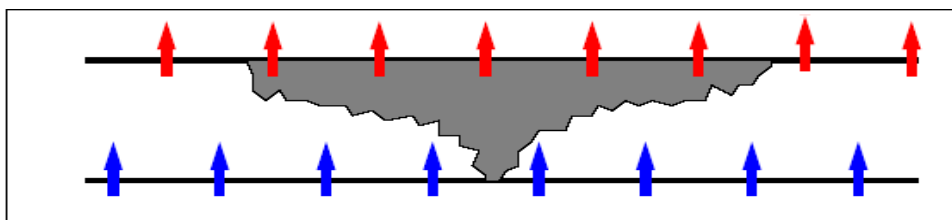
Na naslednjih štirih slikah je prikazano širjenje dima, do katerega pride v primeru nesreč s požarom:



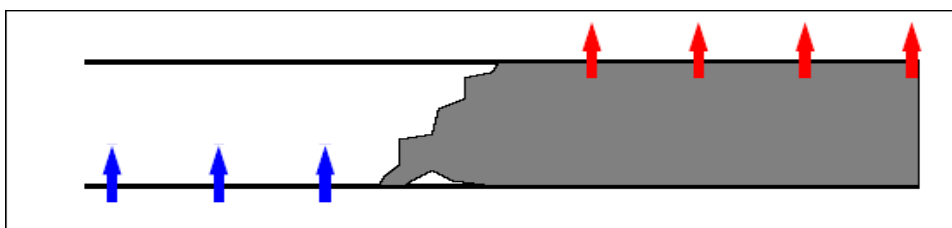
vzdolžno prezračevanje



vzdolžno prezračevanje in izpust skozi vertikalni jašek



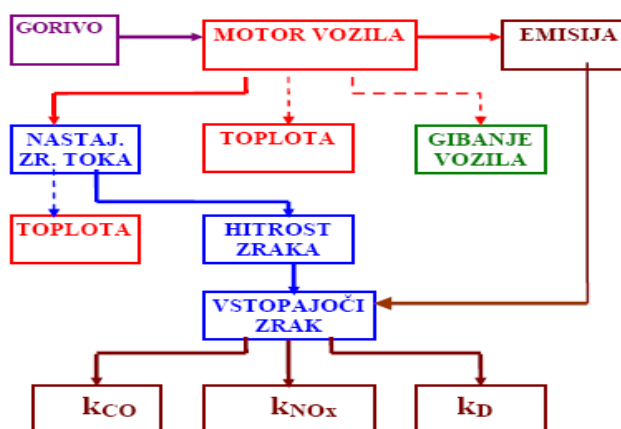
prečno prezračevanje



prečno prezračevanje s kombinacijo vzdolžnega

3.1.4 Določanje hitrosti zraka pri prezračevanju predorov

Matematični model je izdelan kot originalno univerzalno orodje za analizo dogajanja v predoru. Z njim prikažemo medsebojne odvisnosti opazovanih parametrov na koncu predora.



Slika 3.2: Shema dogajanj v predoru (povzeto po Modic, 2004)

Fig. 3.2: Scheme of happening in the tunnel professions (resumed from Modic, 2004)

Na sliki 3.2 je prikazana shema modela, ki prikazuje celotno dogajanje v predoru. Vozeča vozila povzročajo gibanje zraka, stoječa ali v nasprotni smeri vozeča to gibanje zavirajo. Razlika zračnih pritiskov ob obeh portalih (na vstopu in na izstopu) gibanje bodisi pospešuje, bodisi zavira. Tako je časovno spremenljiva hitrost zraka razen od časa, odvisna od:

- trenja in tlačne razlike med portali,
- števila stoječih vozil v predoru,
- števila in smeri vožnje gibajočih se vozil,
- hidrodinamičnih lastnosti vozil,
- strukture prometa,
- hitrosti vožnje,
- geometrijskih parametrov predora. (Modic, 2004)

3.2 Količine polutantov na izhodu iz predorov ter monitoring

Po Uredbi o tehničnih normativih in pogojih za projektiranje cestnih predorov v Republiki Sloveniji iz leta 2006, veljajo za prezračevanje predorov in za nadzor kakovosti zraka iz predorov v okolje, naslednji členi:

108. člen – prezračevanje predorov

"Prezračevanje predorov mora biti za vse predore dimenzionirano tako, da bo v predoru vzdrževana predpisano nizka stopnja onesnaženosti z ogljikovim monoksidom (CO), dušikovim monoksidom (NO), aldehydi in ostalimi neizgorelimi ogljikovodiki (CH) ter zadovoljiva vidljivost pri normalnem obratovanju predora." (Ur. list RS, 48/2006, str. 5216)

"Pri izračunu potrebnih količin svežega zraka in izbiri ustreznega prezračevalnega sistema v predoru je potrebno upoštevati več dejavnikov: vertikalni potek predora, število predorskih cevi in prometnih pasov v smeri vožnje, predvideno sestavo prometnega toka, računsko hitrost in gostoto prometnega toka ter višinsko lego in dolžino predora, kar vse vpliva na koncentracijo škodljivih snovi v predoru." (Ur. list RS, 48/2006, str. 5216)

"Poleg tega mora izbrani prezračevalni sistem (vzdolžno, polprečno, prečno ali kombinirano prezračevanje) v primeru požara v predoru zagotoviti možnost usmerjanja dima, vročine in plinov." (Ur. list RS, 48/2006, str. 5216)

"Če predpisi o emisijah vozil ne obstajajo in podatki o meritvah dejanskih emisij niso na voljo, naj se uporabljajo osnovne emisijske vrednosti, ki jih podajajo priporočila PIARC." (Ur. list RS, 48/2006, str. 5216)

"Pri projektiranju cestnih predorov v Sloveniji, naj se upoštevajo vrednosti o izpušnih emisijah vozil iz preglednice 3.1. (Ur. list RS, 48/2006, str. 5217)

Preglednica 3.1: Vrednosti izpušnih emisij vozil za načrtovanje prezračevanja predorov

Table 3.1: Value of the vehicle exhaust emissions for tunnel ventilation planning

| Leto | 2000 | | 2005 | | 2010 | | 2015 | | 2020 | |
|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| | CO m ³ /h/voz | Delci m ² /h/voz | CO m ³ /h/voz | Delci m ² /h/voz | CO m ³ /h/voz | Delci m ² /h/voz | CO m ³ /h/voz | Delci m ² /h/voz | CO m ³ /h/voz | Delci m ² /h/voz |
| Osebna vozila bencin | 0,075 | 0 | 0,043 | 0 | 0,033 | 0 | 0,029 | 0 | 0,028 | 0 |
| Osebna vozila diesel | 0,014 | 20,6 | 0,010 | 13,9 | 0,009 | 9,53 | 0,009 | 7,30 | 0,008 | 6,49 |
| Tovorna vozila diesel | 0,063 | 71,1 | 0,037 | 36,3 | 0,024 | 16,9 | 0,019 | 8,88 | 0,018 | 6,91 |

"Pri tem je potrebno za vsak posamezen projekt vrednosti emisij ovrednotiti glede na leto projektiranja, predvideno prometno obremenitev, starost vozil, število že prevoženih kilometrov, lego predora in najnovejše dosežke pri izdelavi pogonskih motorjev vozil." (Ur. list RS, 48/2006, str. 5217)

"Projektne kriteriji za dimenzioniranje prezračevalnega sistema predora obsegajo koncentracijo CO, zmanjšanje vidljivosti in hitrost gibanja zraka ob normalnem obratovanju in v primeru požara v predoru. Z izpolnitvijo zahtev o količinah CO in ustrezni vidljivosti zaradi dima in prašnih delcev (z izpušnih plinov vozil in drugih prašnih delcev) se zadosti tudi drugim standardom o emisijah, na primer o NO_x in neizgorelih CH." (Ur. list RS, 48/2006, str. 5217)

109. člen - minimalni kriteriji za načrtovanje prezračevanja

"Priporočila PIARC dopuščajo različne standarde za kakovost zraka v predoru v odvisnosti od prometne situacije. Prezračevalni sistem mora biti dimenzioniran tako, da bodo pri normalnem obratovanju doseženi naslednji kriteriji:

tekoč promet (hitrosti med 100 km/h in 30 km/h):

- mejna koncentracija CO = 100 ppm
- mejni koeficient zmanjšanja vidljivosti: $k = 0,007 \text{ m}^{-1}$

V predorih med večjimi mesti je potrebno s sistemom za nadzor in upravljanje s prometom pri normalnem prometu onemogočiti nastajanje zastojev prometa. V takih predorih naj bo hitrost vozil v predoru vedno večja od 30 km/h." (Ur. list RS, 2006, str. 54)

"V primeru sprememb se upoštevajo najnovejša veljavna priporočila PIARC." (Ur. list RS, 48/2006, str. 5217)

110. člen - (nadzor kakovosti zraka v predoru)

"V vsaki predorski cevi, v kateri bo nameščen mehanski prezračevalni sistem, morajo biti v vsakem prezračevalnem odseku načrtovani: dva merilna sistema za merjenje CO in vidljivosti ter merilni sistem za merjenje hitrosti in smeri zraka v predoru." (Ur. list RS, 48/2006, str. 5217)

Preglednica 3.2: Vrednosti dovoljenih koncentracij CO in vidljivosti za posamezne prometne situacije
Table 3.2: Value of permitted CO concentration and visibility in the separate traffic situation

| Prometna situacija | CO koncentracija ppm | Vidljivost m^{-1} |
|--|-------------------------|-------------------------------|
| Tekoč promet (50 – 100 km/h) | 70 | 0,005 |
| Dnevno zgoščen promet z možnimi zastoji | 70 | 0,007 |
| Izjemoma zgoščen promet z možnimi zastoji | 100 | 0,009 |
| ⁹ Vzdrževalna dela v predoru pod prometom | 20 | 0,003 |
| Zapora predora | 200 | 0,012 |

⁹ velja tudi za predore, ki so razen motornim vozilom namenjeni tudi pešcem in kolesarjem

"Signali morajo biti posredovani nadzorni enoti prezračevanja, nadzoru prometa in centru za upravljanje predora." (Ur. list RS, 2006, str. 5217)

"Pri vzdolžnih prezračevalnih sistemih ob normalnem obratovanju hitrost zraka ne sme presegati 8 m/s. Za nadzor hitrosti zraka in kontrolo delovanja prezračevalnega sistema morajo biti v vsakem prezračevanem odseku nameščene merilne naprave." (Ur. list RS, 48/2006, str. 5217)

"Čeprav so požari v predorih redki, je njihov pojav pri dimenzioniranju prezračevalnega sistema in izdelavi načrta delovanja prezračevanja potrebno upoštevati. V trenutku, ko kontrolni sistem v predoru zazna požar, mora preklopiti iz normalnega režima v režim delovanja v primeru požara. V skladu s priporočili PIARC mora biti doseženo, da bo spodnja polovica prometnega prostora čim dlje brez dima in vročih plinov, s čimer bo omogočeno varno področje in zadostna vidljivost za umik ljudi iz predora. V predorih z enosmernim prometom in vzdolžnim prezračevanjem mora prezračevalni sistem delovati tako, da bo hitrost zraka v cevi v primeru požara največ 1,5 m/s. Pri dvosmernem prometu pa mora biti vzdolžni pretok zraka v predoru ustavljen oz. mora tok zraka omogočati odvod dima čim bližje mesta požara." (Ur. list RS, 48/2006, str. 5218)

"Za predore v dolžini 2000 m in več, v katerih bo potekal dvosmerni promet, je potrebno načrtovati prečno ali delno prečno prezračevanje, ki bo omogočalo neprekinjeno izsesavanje dima in vročih plinov skozi prezračevalne kanale že v začetnem obdobju požara, ko je dim koncentriran samo pod stropom predorske cevi. Priporočena kapaciteta izsesavanja po PIARC za primer požara je $80 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}$." (Ur. list RS, 48/2006, str. 5218)

"Sistem upravljanja prezračevanja mora biti načrtovan tako, da se meri hitrost zraka, koncentracija prašnih delcev in CO v predoru, izmerjene vrednosti pa se primerja s predhodno določenimi mejnimi vrednostmi za delovanje prezračevalnih naprav. V primeru prekoračitve mejnih vrednosti mora nadzorno-krmilni sistem ustrezno reagirati." (Ur. list RS, 48/2006, str. 5218)

"V predorih, ki niso namenjeni prometu motornih vozil prezračevanje ni potrebno." (Ur. list RS, 48/2006, str. 5218)

Portali (vhodi, izhodi, oz ustja) iz predorov so viri onesnaževanja okolice. Za razširjanje onesnaženja ob poznanem onesnaževanju pri viru, lahko za linijske vire uporabimo dva načina, in sicer dvodimenzionalni model razširjanja pri stacionarnem stanju in tridimenzionalni model pri nestacionarnem dogajanju. Z dvodimenzionalnim in tridimenzionalnim modelom za razširjanje onesnaženja zraka od linijskega vira je izračunana razporeditev onesnaženja od tega vira. (Rakovec, 1978)

Le za ravne odseke tega vira (npr. ceste, predori, ipd.) in za veter, pravokotno nanj, je dvodimenzionalni model ustrezen. S primerjavo rezultatov obeh modelov pa je na primeru ceste z ovinki, viadukti, predori in useki prikazano, koliko je treba rezultate dvodimenzionalnega modela zgladiti ali popraviti, da se z njimi približamo tistim iz tridimenzionalnega modela. (Rakovec, 1978)

Pri napovedi onesnaženja zraka zaradi virov, ki so šele v načrtu, je numerično modeliranje dober način in ima mnoge prednosti, predvsem glede preizkušanja raznih variant modela. Tak model mora povezovati vire onesnaženja in vsebovati njihovo dejansko onesnaževanje (emisija – onesnaženje), način razširjanja v okolico virov in s tem tudi meteorološke in reliefne pogoje. Gre za to, da pri numeričnem načinu opisujemo razširjanje onesnaženja navadno v mreži računskih točk, ki pa morajo biti značilne za ves volumen, ki tako točko obdaja.

Potrebno je reči, da problem za posebne oblike virov (npr. cesta v useku), še ni povsem zadovoljivo rešen in bodo zato potrebne še mnoge sočasne meritve emisije in onesnaženja ob samem viru.

Tridimenzionalni model lahko uporabimo tudi za nestacionarno dogajanje. Tu lahko vnaprej določimo časovni potek emisije in gibanje zraka. (Rakovec, 1978)

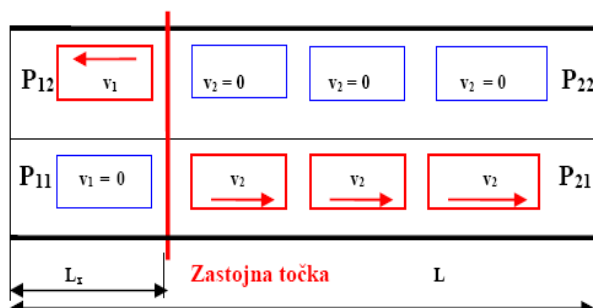
"Pri tleh moremo za marsikateri polutant (npr. CO) predpostaviti popolno refleksijo. Izračunane vrednosti so bile pri tridimenzionalnem modelu prenesene v mrežo točk, pri dvodimenzionalnem modelu pa so bili koordinatni začetki vertikalnih presekov postavljeni na ustreznna mesta v mreži – na cesto." (Rakovec, 1978, str 22)

"Pri šibki turbulentni izmenjavi moremo do neke mere uporabljati rezultate preprostega dvodimenzionalnega modela, če znamo oceniti napake, ki iz tega slede. Pri analizi rezultatov moramo upoštevati nehomogenosti, ki so vzrok za tridimenzionalnost dogajanja, in to tiste glede virov onesnaženja, kot tudi tiste v reliefu, ki posredno vplivajo tudi na nehomogenosti v toku zraka (spremenljivost smeri vetra, divergenca, konvergenca, deformacija, itd.)." (Rakovec, 1978, str 22)

3.2.1 Izračun hitrosti zraka z diferencialno enačbo znotraj predora

Analizirajmo primer, ko poteka promet skozi predor v dveh smereh. Na poljubni razdalji L_x imamo zastočno točko. V tej točki se pojavi ovira, ki zaustavi promet. V predoru naj bodo področja P_{11} , P_{12} , P_{21} in P_{22} .

| | |
|--|--|
| P_{11} $v_1 = 0$ N_{os} - število stoječih osebnih vozil N_{ts} - število stoječih tovornih vozil | P_{12} $v_1 > 0$ N_{o1} - število vozečih osebnih vozil N_{t1} - število vozečih tovornih vozil |
| P_{21} $v_2 > 0$ N_{o2} - število vozečih osebnih vozil N_{t2} - število vozečih tovornih vozil | P_{22} $v_2 = 0$ N_{os} - število stoječih osebnih vozil N_{ts} - število stoječih tovornih vozil |



Slika 3.3: Splošno stanje v predoru (povzeto po Modic, 2004)

Fig. 3.3: Common situation in tunnel (resumed from Modic, 2004)

Splošna diferencialna enačba ima obliko:

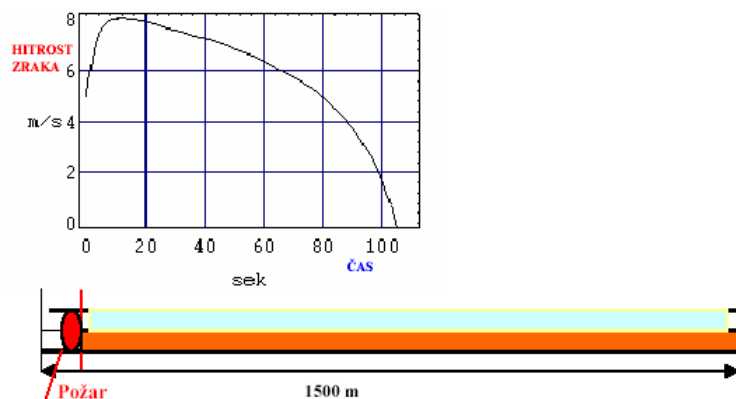
$$\frac{du}{dt} = \pm A(u,t) \pm B(u,t) \pm C(u,t) \pm D(u,t) \pm E(u,t) \pm F(u,t) \quad (3.1)$$

Če upoštevamo vpliv vseh parametrov, dobimo končno diferencialno enačbo:

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} = & - \left(\frac{\lambda}{D_h} + \frac{\Sigma \xi}{L} \right) \frac{u^2}{2} \text{sign}u \pm & \text{A} \\ & \pm \frac{\Delta p}{\rho L} - & \text{B} \\ & - \frac{1}{LA} (c_{vo} A_{vo} N_{0s} + c_{vt} A_{vt} N_{ts}) \frac{u^2}{2} \text{sign}u - & \text{C} \\ & - (c_{vo} A_{vo} N_{o1} + c_{vt} A_{vt} N_{t1}) \left(1 - \frac{t}{L_x} |v_1| \right) \frac{(v_1 + u)^2}{2} \text{sign}(v_1 + u) + & \text{D} \\ & + (c_{vo} A_{vo} N_{o2} + c_{vt} A_{vt} N_{t2}) \left(1 - \frac{t}{L - L_x} |v_2| \right) \frac{(v_2 - u)^2}{2} \text{sign}(v_2 - u) \pm & \text{E} \\ & \pm \frac{S_p}{\rho LA} & \text{F} \end{aligned} \quad (3.2)$$

"Enačba (3.2) je univerzalna, zato omogoča analizo hitrosti gibanja zraka tako v predorih z dvosmernim, kot tudi v predorih z enosmernim prometom. Vsebuje elemente časovne in krajevne skale. Časovna odvisnost je definirana s časom t, oz. z odvodom hitrosti po času, krajevna pa s končno dolžino predora L in delno dolžino L_x." (Modic, 2004, str. 7)

"Enačba je atipična, najbolje jo je reševati numerično. Časovno odvisen potek hitrosti ob ustreznih robnih pogojih, je zastoj na začetku 1500 m dolgega predora je prikazan na spodnji sliki." (Modic, 2004, str. 7)



Časovni potek hitrosti zraka v predoru (L=1500 m) ob zastoju na začetku predora (Modic, 2004, str. 8)

"Diferencialna enačba (3.2) je sestavljena iz šestih členov. Prvi člen (A) zajema trenje, drugi člen (B) tlačno razliko med portali, tretji člen (C) vpliv stoječih vozil, četrti (D) in peti člen (E) vpliv vozečih vozil in smer gibanja, šesti člen (F) pa vpliv ventilatorjev. Pri tekočem prometu odpade vpliv stoječih vozil, člena D in E pa vplivata v nasprotnih smereh. Zato moramo v predorih z dvosmernim prometom zagotoviti gibanje zraka s pomočjo ventilatorjev, ali z drugimi besedami, naravno prezračevanje ni možno, razen če imamo dovolj veliko tlačno razliko med portali. Vendar je ta razlika spremenljiva, tako po velikosti, kakor tudi po smeri." (Modic, 2004, str. 7)

"Če se omejimo na predore s tekočim enosmernim prometom, odpadeta člena C in D, če je prezračevanje naravno, odpade člen F. Ravno tako odpade oznaka sign, ker hitrosti ne spreminjajo svoje smeri." (Modic, 2004, str. 7)

"Tako dobi enačba (3.2) za predore s tekočim enosmernim prometom, brez upoštevanja vpliva ventilatorjev in vetra enostavno obliko:

$$\frac{du}{dt} = -\left(\frac{\lambda}{D_h} + \frac{\Sigma \xi}{L}\right) \cdot \frac{u^2}{2} + \frac{1}{LA} (c_{wo} A_{vo} N_o + c_{wt} A_{vt} N_t) \left(1 - \frac{t}{L - L_x} |v|\right) \frac{(v - u)^2}{2} \quad (3.3)$$

Ker je promet sestavljen iz osebnih in iz tovornih vozil, in je delež tovornih vozil podan v odstotkih z ozirom na celoten promet (p_t), lahko zapišemo za celotno število vozil v polnem predoru v odvisnosti od deleža tovornih vozil:

$$N = \left(1 - \frac{p_t}{100}\right) N_o + \frac{p_t}{100} N_t \quad (3.4)$$

V realnih razmerah pa moramo upoštevati mešan promet skozi predor, kombinacijo osebnih in tovornih vozil, torej trenutno naključno stanje, ter tudi gostoto prometa. V tem primeru variira hitrost od minimalne, povzročene s prometom osebnih vozil, do maksimalne, povzročene s prometom tovornih vozil. Tako dobimo različne kombinacije, ki so za analizo trenutnih razmer primerne, problem pa nastane, če želimo izračunati hitrosti, ki jih želimo

uporabiti za izračun povprečne količine zraka, ki je osnovni kriterij za odločitev. Ali zadošča naravno prezračevanje ali ne." (Modic, 2004, str. 8)

"Če v enačbi (3.3) za enosmerni promet upoštevamo še razmere v določenem trenutku, lahko predpostavimo kvazistacionarno stanje, torej:

$$t = 0 \quad \frac{du}{dt} = 0$$

Tako iz enačbe (3.3) dobimo enačbo

$$\frac{1}{LA} (c_{wo} A_{vo} N_o + c_{wt} A_{vt} N_t) \frac{(v-u)^2}{2} - \left(\frac{\lambda}{D_h} - \frac{\Sigma \xi}{L_x} \right) \frac{u^2}{2} \left(\pm \frac{\Delta p}{L \rho} \right) = 0 \quad (3.5)$$

S pomočjo enačbe (3.5) lahko določimo hitrost zraka na koncu predora, torej pri dolžini L v odvisnosti od števila vozil, pri tem pa moramo upoštevati ustrezno število vozil na vsakokratni dolžini predora. Za analizo hitrosti na koncu vsakega od množice predorov preuredimo enačbo tako, da pri znanih podatkih: dolžini in prerezu predora, hitrosti vožnje in številu vozil izračunamo ustrezno hitrost zraka. Tako dobimo:

$$\begin{aligned} & u^2 \left\{ \frac{1}{2LA} \left[\left(1 - \frac{p_t}{100} \right) \frac{M}{L} l_0 c_{wo} A_{vo} + \frac{p_t}{100} \frac{M}{L} l_t c_{wt} A_{vt} \right] - 0.50 \left(\frac{\lambda}{D_h} + \frac{1.35}{L} \right) \right\} - \\ & - u \left\{ \frac{1}{LA} \left[\left(1 - \frac{p_t}{100} \right) \frac{M}{L} l_0 c_{wo} A_{vo} + \frac{p_t}{100} \frac{M}{L} l_t c_{wt} A_{vt} \right] v \right\} + \\ & + v^2 \left\{ \frac{1}{2LA} \left[\left(1 - \frac{p_t}{100} \right) \frac{M}{L} l_0 c_{wo} A_{vo} + \frac{p_t}{100} \frac{M}{L} l_t c_{wt} A_{vt} \right] \right\} \pm \frac{\Delta p}{\rho L} = 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Kvadratna enačba (3.6) omogoča izračun hitrosti zraka na koncu predora z enosmernim prometom kot funkcijo dolžine in prereza predora ter lastnosti (koeficienta zračnega upora in čelne površine) vozil, števila in hitrosti vozil, ter koeficienta trenja ob stenah predora. Ker je ta tudi funkcija hitrosti, moramo na osnovi izračunane hitrosti zraka, račun za λ ponoviti s približevanjem hitrosti zraka." (Modic, 2004, str. 9)

"Če v enačbi (3.6) posamezne koeficiente nadomestimo s simboli f_1 , f_2 in f_3 :

$$\begin{aligned}
 f_1 &= \left\{ \frac{1}{2LA} \left[\left(1 - \frac{p_t}{100} \right) \frac{M}{L} l_0 c_{wo} A_{vo} + \frac{p_t}{100} \frac{M}{L} l_t c_{wt} A_{vt} \right] - 0.50 \left(\frac{\lambda}{D_h} + \frac{1.35}{L} \right) \right\} \\
 f_2 &= \left\{ \frac{1}{LA} \left[\left(1 - \frac{p_t}{100} \right) \frac{M}{L} l_0 c_{wo} A_{vo} + \frac{p_t}{100} \frac{M}{L} l_t c_{wt} A_{vt} \right] v \right\} \\
 f_3 &= \left\{ \frac{1}{2LA} \left[\left(1 - \frac{p_t}{100} \right) \frac{M}{L} l_0 c_{wo} A_{vo} + \frac{p_t}{100} \frac{M}{L} l_t c_{wt} A_{vt} \right] v^2 \right\}
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

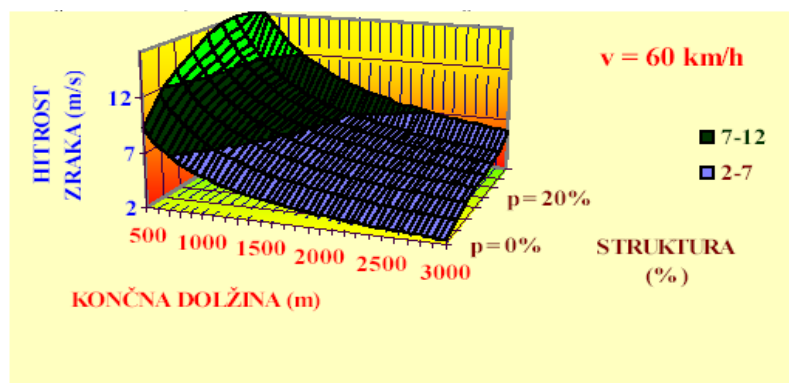
je rešitev enačbe za hitrost zraka

$$u = \frac{-\frac{f_2}{2} + \left[\left(\frac{f_2}{2} \right)^2 - f_1 \cdot f_3 \right]^{0.50}}{f_1} \tag{3.8}$$

Od tu vidimo, da vsebuje hitrost zraka naslednje funkcijske povezave med parametri

$$u = u(L, A, D_h, \sum \xi, \lambda, \Delta p, p_t, c_{wo}, c_{wt}, M, l_0, l_t) \tag{3.9}$$

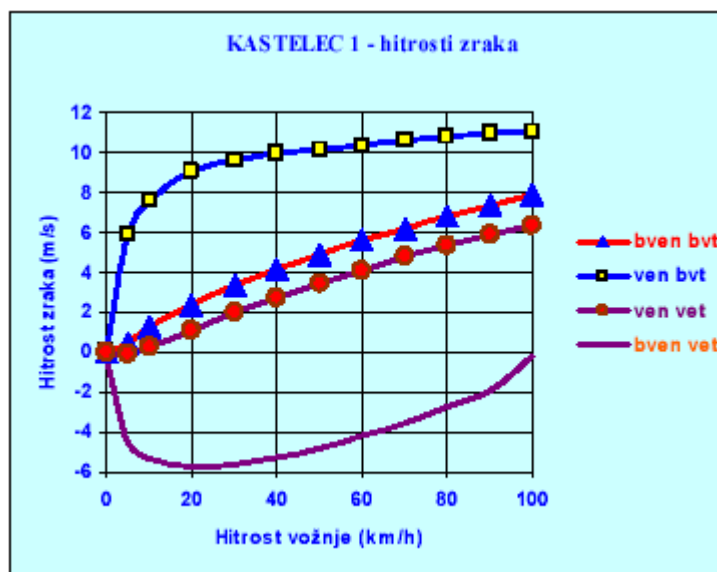
Iz izraza (3.9) vidimo, da je hitrost zraka na koncu predora funkcija številnih parametrov. Zato moramo za njen konkreten izračun zmanjšati število parametrov. To storimo tako, da izberemo množico enakih predorov, pri katerih se spreminja samo dolžina L, variiramo pa npr. število vozil, ki vozijo skozi predor, pri tem pa se ne spreminjajo ostali, za promet značilni parametri. Ta postopek lahko ponavljamo za različne primere. (Modic, 2004, str. 10)



Slika 3.4: Hitrosti zraka pri različnih dolžinah, 60 km/h, različni delež tovornih vozil (povzeto po Modic, 2004)

Fig. 3.4: Speed of air according to different length, 60kmph, different share of freighters (resumed from Modic, 2004)

Na sliki 3.4 je prikazan primer hitrostnega polja za predor dolžine 3000 m, pri hitrosti vožnje 60 km/h, v odvisnosti od razmerja med osebnimi in tovornimi vozili.



Slika 3.5: Hitrosti zraka v predoru Kastelec pri različnih pogojih (povzeto po Modic, 2004)

Fig. 3.5: Speed of air in tunnel Kastelec by different conditions (resumed from Modic, 2004)

Konkreten primer (predor Kastelec), je prikazan na sliki 3.5. Ta način prikazovanja hitrosti je za projektante bolj primeren. Na sliki 3.5 so prikazane hitrosti zraka v predoru Kastelec 1 pri polni obremenitvi (maksimalen promet), pri vetru (130 km/h) in pri brezvetrju, ter pri vključenih in izključenih ventilatorjih.

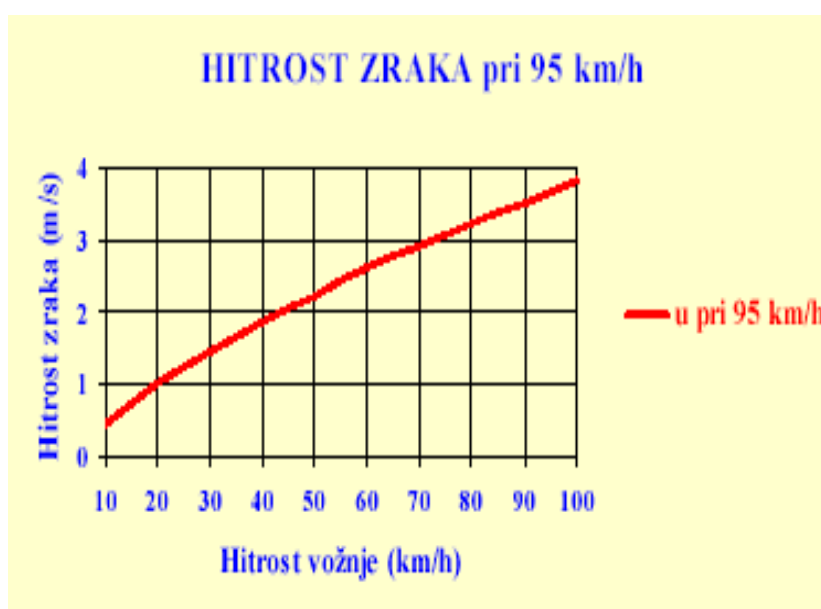


Slika 3.6: Hitrost zraka v predoru Kastelec pri vetru 130 km/h (povzeto po Modic, 2004)

Fig. 3.6: Speed of air in tunnel Kastelec by speed of wind 130 kmph (resumed from Modic, 2004)

Pri četrtinski obremenitvi predora, ki je tudi relativno velika, in v zimskem času običajno ni dosežena, vidimo, da je učinek batnega efekta, vključno z ventilatorji preslab, in imamo prevelike negativne hitrosti gibanja zraka (spodnja krivulja, slika 3.6).

Iz slike 3.5 vidimo, da pri hitrosti vetra 130 km/h ventilatorji, vključno z batnim efektom zagotavljajo pozitivne hitrosti zraka pri hitrosti vožnje od 40 km/h naprej. Če dopuščamo negativno hitrost zraka do -0.5 m/s, je najnižja potrebna hitrost vožnje pri polni obremenitvi predora (300 vozil/h) približno 30 km/h. To prikazuje zgornja krivulja na sliki 3.6.

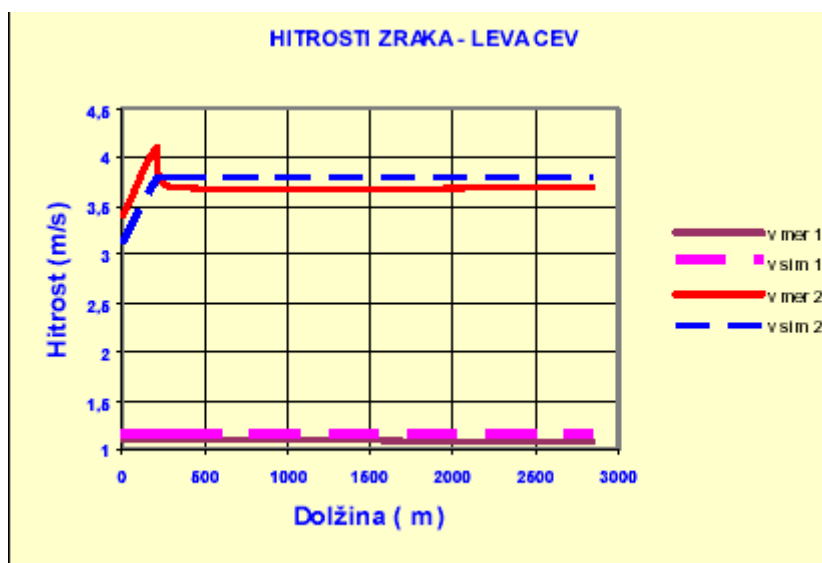


Slika 3.7: Hitrost zraka v predoru Kastelec 1, veter 95 km/h (povzeto po Modic, 2004)

Fig. 3.7: Speed of air in tunnel Kastelec 1, speed of wind 95 kmph (resumed from Modic, 2004)

Analize kažejo, da je za četrtinsko obremenitev predora največja možna hitrost vetra, če ta piha naravnost v predor, cca 95 km/h (slika 3.7)

Tudi v predoru Trojane – leva cev, je bilo preverjeno, ali se računalniško simulirane hitrosti ujemajo z izmerjenimi vrednostmi (slika 3.8):



Slika 3.8: Meritve in simulacije hitrosti zraka v predoru Trojane (leva cev) (povzeto po Modic, 2004)

Fig. 3.8: Measurements and simulations of air speed in left tube of tunnel Trojane (resumed from Modic, 2004)

Pomembno je ugotoviti, če simulacija daje pravilne rezultate. V predoru Trojane so bile izmerjene hitrosti zraka pri praznem predoru, za iste razmere so bile hitrosti tudi simulirane. Spodnji dve krivulji na sliki 3.8 kažeta, da so rezultati simulacij in meritev hitrosti zelo podobni. Enako velja za merjene in simulirane hitrosti pri vključenih ventilatorjih (zgornji krivulji). Pri meritvah je pri prvem paru ventilatorjev očitno prišlo do kratkotrajne motnje.

Hitrost je pomembna zaradi količine svežega zraka, ki vstopa v predor, zaradi vpliva na gibanje dima v primeru požara in za čiščenje predora po požaru.

3.2.2 Strategija nadzora prezračevanja

Ko govorimo o prezračevalni strategiji je potrebno upoštevati kompleksnost predorov. Če govorimo o izmenjavi pri tleh, o veliko vstopnih in izstopnih nagibih, to pomeni, da bo prezračevanje drugačno od tistega v preprostih predorih z enim vhodom in enim izhodom.

Glavna principa strategije prezračevanja sta:

- uporabiti strategijo, ki ustvarja pogoje podtlaka v predoru namesto prevladujočih nadtlačnih pogojev
- razmejiti predorski sistem z vpihovanjem svežega zraka na določenih lokacijah.

Preprost razlog za uporabo podtlačnih pogojev v vsakem elementu predora je, da je mnogo lažje nadzirati pogoje zračnega toka v celotnem sistemu predora. Onesnažen zrak je brez težav možno odvesti do izpušnih jaškov. Pri nadtlačku pa je manj nadzora nad stanjem zračnega toka v različnih delih predora.

3.2.3 Poskusi sledenja

Medtem, ko raziskave kvalitete zraka zagotavljajo meritve koncentracij polutantov na samo enem položaju (letno povprečje), poskusi sledenja zagotavljajo meritve koncentracij polutantov na veliko položajih, vendar samo za nekaj ur. Obe metodi sta relativno dragi.

Takšne raziskave so lahko namenjene samo obstoječim predorom in zato niso orodje za napovedovanje ampak za analiziranje.

Na primer:

- zelo veliki gradienti koncentracije so bili najdeni v neposredni bližini portalov, na razdalji, manjši od 10 metrov, so bile vrednosti dvakratne.
- Promet močno ovira razpršitev polutantov iz predorov, ponavadi je ustvarjen tok v enosmernih predorih. Efekt je omejen na bližnjo okolico portala in ceste in ima majhen vpliv na razširjanje koncentracije nekaj deset metrov stran.
- Zračni tok iz predora se ukrivlja hitreje v smeri okoliškega vetra, zato je poleg izstopne hitrosti, oblike predora, pomembna tudi hitrost in smer vetra.
- Visoke vrednosti redčenja pri izpuhu dimnih plinov iz predora.

Efekt vzgona verjetno igra glavno vlogo pri razpršitvi polutantov iz predorskih portalov in bi lahko bil vključen v matematični model pri posameznih študijah. (Dix in sod., 2006)

3.2.4 Javno mnenje

- sam obstoj tehnologije še ne opravičuje njene rabe
- obveščanje javnosti v primerni obliki in že v začetni fazi projektiranja o kvaliteti zraka
- pravilno načrtovana razpršitev na portalih se prikaže kot sprejemljiv vpliv na okolje
- izpeljati je potrebno testiranje in pravnomočnost merjenja ter promocijo
- izpeljati je potrebno vzorčne študije in/ali kalkulacije v začetni fazi projektiranja
- ustrezni programi za zmanjšanje emisij vozil (tudi drugih virov emisij – industrija, ladje, ipd.)
- sprememba v rabi lahko vodi k povečanju emisij, povzročenih z vozili (dovoljenja za prevoz težkih tovornih vozil), potrditev sprememb v pomenu kvalitete zraka
- hitre izboljšave imajo za posledico, da obstoječe meritve niso potrebne, lahko jih ustavimo in prihranimo energijo in denar.

Sklep

V zadnjih dvajsetih letih, je bila količina večine polutantov, ki so nastali v razvitih deželah, drastično znižanih, predvsem zaradi standardov o emisijah, ki nastanejo pri delovanju motorjev vozil. Tehnično povedano, intervencija zaradi velikosti izpustov vozil preko dovoljene koncentracije.

Na drugi strani različni predstavniki oblasti, organizacij in prebivalci opozarjajo na naraščanje problemov (kakovost zraka) pri dolgih predorih v urbanih področjih z zelo gostim prometom.

Potreben je ustrezen prikaz vpliva na okolje v vseh okoliščinah.

3.3. Mnenje ARSO o vplivu emisij zaradi prometa iz predora Dekani na AC Klanec - Srmin na okolico

Za okoljske razmere ob ustjih predorov so najpomembnejši podatki o emisiji škodljivih snovi ob izhodu iz predorskih cevi. V predorih je neko stalno gibanje zraka, ki je odvisno od hitrosti

vetra, gibanja vozil ter mikroklimatskih dejavnikov. V okolici Dekanov poteka trasa AC v predoru. Leva (južna) cev je dolga 2050 m, desna pa 2170 m. Hidrometeorološki zavod RS je dal 16. aprila 1997, svoje mnenje z naslovom "Ocena vpliva prometa (AC in M10) na kakovost zraka na območju stanovanjskih blokov "Na Vardi" in predlog omilitvenih ukrepov". Ugotovljeno je bilo, da bi v večernih in jutranjih urah lahko emisija iz predora ob predpostavki, da vsa emisija ob velikem prometu izhaja skozi zahodni portal, povzročila previsoke koncentracije dušikovih oksidov na območju blokov Na Vardi. (Planinšek, 1999)

Podrobnejša analiza razmer je bila napravljena na podlagi podatkov o gostoti prometa skozi predor in režimih prezračevanja predora. Podatki o režimih prezračevanja predora so dobljeni iz projektov prezračevanja. Vsaka predorska cev se prezračuje vzdolžno v smeri prometa. Pri tem pomaga t.i. batni efekt, ko vozeča vozila ustvarjajo tok zraka v smeri vožnje. Kadar je tok zraka zaradi batnega efekta premajhen za prezračevanje, se vključijo ventilatorji, s katerimi se zagotovi zadosten pretok zraka. Maksimalni volumski pretok zraka je preračunan na potrebno prezračevanje zaradi ogljikovega monoksida in znaša $233 \text{ m}^3/\text{s}$. (Planinšek, 1999)

Vzhodni portal je od naselij toliko oddaljen, da emisije onesnaženja zraka s tega portala ne onesnažujejo naseljenih območij prekomerno. Zato so obravnavane le emisije iz zahodnega portala. (Planinšek, 1999)

Preglednica 3.3: Emisije pri 2000 vozilih na uro in dolžini predora 2170 m

Table 3.3: Emission from Tunnel Dekani of length 2170 metres by 2000 vehicles per hour

| Snov | E (g/h) |
|------|---------|
| CO | 31573 |
| HC | 1193 |
| NOx | 6437 |

Iz volumskega pretoka zraka izračunamo koncentracijo pri izhodu iz predora in dobimo naslednje vrednosti:

Preglednica 3.4: Koncentracije pri izhodu iz predora

Table 3.4: Concentrations on the portal of the tunnel

| Snov | C($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
|------|-------------------------------|
| CO | 37641 |
| HC | 1422 |
| NOx | 7674 |

Prerez predorske cevi je 48 m^2 . Oceno je narejena za najslabšo možnost, se pravi, da tok zraka zavije proti 150 m oddaljenim blokom Na Vardi, koncentracije pa se zaradi mešanja z okoliškim zrakom razredčijo. Razredčitev je ocenjena s pomočjo faktorjev, ki jih pri širjenju emisij v okolico upoštevajo disperzijski modeli. Po tej predpostavki se dimni plini širijo v stožcu, ki ima presek eliptične oblike. Naraščanje preseka stožca odvisno od stabilnosti atmosfere in oddaljenosti od vira. Od dimenzij osi elipse pri izhodu predora - 12,6 m in 9,43 m narasteta na 37,9 m in 30,2 m pri blokih. Če izračunamo razmerje presekov elips, dobimo faktor 10,5. Upoštevani so bili stabilni vremenski pogoji, v manj stabilnih je razredčenje še veliko večje. V konkretnem primeru gre za pobočje, protihrupno ograjo in promet po voznem pasu v smeri proti Kozini, ki še dodatno razredčijo koncentracijo plinov takoj pri izhodu iz predora. Zato lahko faktor manjšanja z 10,5 povečamo na 15. Tako so dobljene naslednje koncentracije (Planinšek, 1999):

Preglednica 3.5: Koncentracije pri izhodu iz predora s faktorjem zmanjšanja

Table 3.5: Concentrations on the portal of the tunnel with reduction factor

| Snov | C($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
|------|-------------------------------|
| CO | 2509 |
| HC | 95 |
| NOx | 511 |

Verjetnost, da gre tok zraka iz predora po najkrajši poti proti blokom na Vardi je zelo majhna zaradi situacije vetrov. Podatki o vetru na ankaranskem križišču kažejo, da prevladujeta smeri W-NW in E-SE, razmeroma pogost pa je tudi severni veter. Lokacija Na Vardi se razlikuje od lokacije v ankaranskem križišču po tem, da je bolj v dolini Rižane. Na tem območju se tako srečujeta vpliva dolinskega in obalnega vetra. Oba vpliva delujeta v isto smer glede na dnevni čas. Zaradi oblike terena je veter močno kanaliziran v smeri doline. Ponoči piha po dolini

navzdol, podnevi pa navzgor. Takšen dnevni hod smeri vetra je viden že iz podatkov z merilnega mesta v ankaranskem križišču, na obravnavani lokaciji pa je še veliko bolj izrazit. (Planinšek, 1999)

Urna mejna imisijska vrednost (MIV) koncentracije CO je 30 mg/m^3 ($30000 \text{ } \mu\text{g/m}^3$). To pomeni, da bodo predvidene koncentracije CO veliko nižje od dopustnih. (Paradiž, 1992)

Pri dušikovih oksidih je MIV predpisana samo za dušikov dioksid, in sicer $300 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. Večina dušikovih oksidov (približno 90%) iz motorjev z notranjim izgorevanjem prihaja v obliki dušikovega monoksida, ki je manj škodljiv kot dušikov dioksid. Če upoštevamo, da predstavlja emisija NO_2 le 10% od skupne emisije dušikovih oksidov, bo koncentracija NO manjša od MIV ob najslabših vremenskih pogojih in zelo gostem prometu. (Planinšek, 1999)

Ogljikovodiki predstavljajo celo skupino spojin, ki so različno škodljive. Od spojin, ki jih največ emitirajo motorji z notranjim izgorevanjem, je mejna vrednost določena le za toluen, in sicer polurna MIV znaša 1 mg/m^3 ($1000 \text{ } \mu\text{g/m}^3$). Koncentracije se tudi ob največji emisiji in najslabših pogojih ne bodo niti približale tej vrednosti. (Planinšek, 1999)

3.4. Ocena ARSO o koncentraciji onesnaženosti zraka zaradi prometa na izhodih predorov na trasi avtocestnega odseka Vransko - Blagovica

Študija je bila izdelana za odsek avtoceste Vransko - Blagovica. Krajanje Ločice, Trojan in Šentožbolta so postavili izdelovalcu študije o vplivu avtoceste na okolje vprašanje o vplivu emisij iz predorov na kakovost zraka v naseljenih območjih v okolici vhodov v predore.

Na širjenje onesnaženja v prostoru vplivajo vremenski pogoji, predvsem smer in hitrost vetra ter stabilnost atmosfere. Zaradi zelo razgibanega reliefa so za določitev vetrovnih razmer ustrezne le meritve vetra v neposredni okolici vira, v našem primeru vhoda v predor. Meteorološke pogoje smo zato ocenili le na podlagi naših izkušenj, pridobljenih ob meritvah na podobnih lokacijah. (Planinšek, Rode, 1995)

3.5. Emisije škodljivih snovi zaradi prometa z motornimi vozili

Ocena emisije CO, VOC in NO_x je bila izdelana z uporabo faktorjev po metodologiji CORINAIR, ki je vpeljana kot enotna evropska metodologija za izdelavo katastrov emisij. Uporabljeni emisijski faktorji so zbrani v preglednici 3.5. (Planinšek, Rode, 1995)

Emisije CO, VOC, in NO_x so izračunane, medtem ko ni bilo možno oceniti emisije SO₂ in svinca, ker ni bilo na voljo podatkov o deležu dieselskega goriva, oziroma osvinčenega bencina na posameznih odsekih.

Preglednica 3.6: Faktorji emisij CO, NO_x in VOC pri prometu z motornimi vozili pri hitrosti 100 km/h za osebna vozila in avtocestni režim za tovorna vozila in avtobuse

Table 3.6: Emission factor for CO, NO_x and VOC by speed of 100km per hour for personal vehicles and highway regim for heavy duty vehicles and buses

| VOZILA | OSEBNA | TOVORNA | AVTOBUSI |
|--------------------------------|--------|---------|----------|
| Poraba goriva (g/km) | 47,5 | 154 | 215 |
| Emisija CO (g/km) | 4,1 | 4,2 | 3,0 |
| Emisija VOC (g/km) | 0,66 | 0,6 | 1,7 |
| Emisija NO _x (g/km) | 2,65 | 6,0 | 13,9 |

Faktor emisije, oziroma porabe goriva (g/km) nam pove koliko gramov škodljive snovi emitira vozilo na 1 kilometer prevožene poti pri določenem režimu vožnje, oziroma koliko gramov goriva se porabi na 1 kilometer vožnje.

3.5.1 Izračun emisij CO, VOC in NO_x

Emisije škodljivih snovi in porabe goriva so poleg hitrosti in tipov vozil odvisne tudi od starosti vozila, vrste in kvalitete uporabljenega goriva, načina vožnje, vožnje s hladnim oziroma toplim motorjem, kakovosti vzdrževanja vozil in teže tovora, ki se, posebno pri tovornih vozilih, zelo spreminja.

Vseh teh vplivov seveda ni bilo možno upoštevati, zato je bilo predpostavljeno za povprečne tipe vozil v naslednjih kategorijah: osebna vozila, tovorna vozila in avtobusi. Predpostavljena je bila tudi povprečna hitrost 100 km/h za osebna vozila, oziroma režim vožnje na avtocestah

za tovorna vozila in avtobuse, kot to določa metodologija CORINAIR. (Planinšek, Rode, 1995)

Za povprečno osebno vozilo je bilo vzeto vozilo teže do 2,5 t, z motorjem prostornine do 1400 cm³ (ECE 15/04 - standard Ekonomske komisije ZN za Evropo), ki je še najbolj podobno stanju vozil na naših cestah. (Planinšek, Rode, 1995)

Za povprečno tovorno vozilo je bilo vzeto vozilo teže od 3,5 do 16 ton z dizelskim motorjem. Za avtobuse velja isti režim vožnje kot za tovorna vozila. (Planinšek, Rode, 1995)

Emisije v posameznih predorih so računane na osnovi povprečnega letnega dnevnega prometa (PLDP), ki znaša (po podatkih naročnika te študije) 30216 vozil na dan (od tega 14% tovornih) za predor Trojane in 28370 vozil na dan (od tega 15% tovornih) za predor Ločica. Izračunane emisije CO, NO_x in VOC so prikazane v kg/km na dan, oziroma kg na odsek na dan v preglednici 3.6.

Preglednica 3.7: Emisije CO, NO_x in VOC zaradi prometa z motornimi vozili

Table 3.7: Emissions of CO, NO_x and VOC due to traffic with motor driven vehicles

| PREDOR | Emisije v kg/km na dan | | | | Emisije v kg/odsek na dan | | |
|---------|------------------------|-------|-----------------|------|---------------------------|-----------------|------|
| | DOLŽINA | CO | NO _x | VOC | CO | NO _x | VOC |
| Trojane | 2,9 km | 124,2 | 95,3 | 19,8 | 360 | 276,3 | 57,5 |
| Ločica | 0.77 km | 116,6 | 90,5 | 18,6 | 89,8 | 69,7 | 14,3 |

3.5.2 Ocena koncentracij onesnaženja zraka

Za prvo oceno je upoštevana obremenitev v prometni konici. Emisijo onesnaženja v prometni konici se izračuna tako, da dnevno emisijo delimo z 10 (urna konica predstavlja 10 % dnevnega prometa). Predpostavimo, da vozila s svojo hitrostjo poganjajo zrak v smeri vožnje. Takšna predpostavka je pri gostem prometu s precejšnjim deležem tovornih vozil in zaradi enosmernega prometa v eni predorski cevi (dvocevni predor) dokaj realna. Pri izračunu urnih koncentracij za posamezni vhod v predor upoštevamo polovične emisije, podane v tabeli 5, in deljene z 10 (emisije v prometni konici). (Planinšek, Rode, 1995)

Predor Trojane - vhod Ožbolt

Zahodni izhod iz predora Trojane je predviden v dolini Radomlje, nekaj metrov nad dnom doline, približno 200 m od najbližjih hiš in okoli 500 m od cerkve v Šentožboltu. Dolina je na tem mestu ozka. Veter v takšni dolini je popolnoma kanaliziran. Ob lepem vremenu prevladuje lokalna cirkulacija. Podnevi piha veter po dolini navzgor, takrat so tudi razmere za razpršitev emisije v večji volumen ugodnejše kot ponoči. V nočnem času pa piha veter po dolini navzdol. Pred preходом vremenskih front piha jugozahodni veter, ki na tej lokaciji piha po dolini navzgor. Po prehodu fronte se pojavi severozahodni veter, ki se najbrž tudi kanalizira po dolini navzgor, le v primeru, ko začne pihati na Primorskem burja, piha vzhodnik, torej po dolini navzdol. Vetrovi, povezani z vremenskimi spremembami, so močnejši od lokalnih vetrov. V smeri proti Blagovici, v razdalji 2 km od predora ni stanovanjskih hiš, so ocenjene le koncentracije onesnaženja, kadar piha veter po dolini navzgor. Za razdalje do 500 m so bile z modelom SCREEN¹⁰ izračunane naslednje koncentracije:

Preglednica 3.8: Numerični model za širjenje onesnaženosti zraka

Table 3.8: Numerical model for air pollution extension

| snov | razdalja (m) | | | | |
|-----------------|--------------|-----|-----|-----|-----|
| | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 |
| NO _x | 849 | 448 | 291 | 238 | 193 |
| CO | 1109 | 585 | 380 | 311 | 252 |
| VOC | 175 | 92 | 60 | 49 | 40 |

Primerjava koncentracij z mejnimi imisijskimi vrednostmi koncentracij ni enostavna. Pri dušikovih oksidih je predpisana samo urna mejna imisijska vrednost za NO₂, in sicer 200 µg/m³. Iz motorjev pa izhajajo pretežno NO, ki je precej manj škodljiv kot NO₂.

¹⁰ SCREEN - numerični model za širjenje onesnaženosti zraka, ki ga je potrdila EPA - agencija za varovanje okolja v ZDA

Urna mejna imisijska vrednost koncentracije CO je $30.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pri hlapnih ogljikovodikih je v izpušnih plinih več spojin, ki imajo različne mejne imisijske vrednosti koncentracij, ki zavzemajo vrednosti med 100 in $8000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. (Planinšek, Rode, 1995)

Izračunani kažejo, da koncentracije ne bodo presegale mejnih imisijskih vrednosti. V primeru, da se bo promet po obstoječi cesti bistveno zmanjšal glede na sedanje stanje, se bodo koncentracije onesnaženja zraka na območju Šentožbolta znižale glede na obstoječa stanja.

Predor Trojane - vhod Trojane - Podzid

Tudi lokacija vzhodnega vhoda v predor Trojane je v dolini, vendar je ta dolina širša in manj globoka kot pri Šentožboltu. Lokalni veter piha čez dan po pobočju navzgor. Zato se lahko čez dan na območju Podzida pojavijo nekoliko povišane koncentracije onesnaženja zraka. Vendar koncentracije ne bodo presegle vrednosti, ki jih povzroča promet po obstoječi cesti. Na srečo je dnevni lokalni veter dovolj turbulenten, da se emisija premeša v večji volumen in koncentracije ne presegajo mejnih vrednosti. Nočni lokalni veter piha po pobočjih in dolini navzdol, tako da koncentracije ne bodo ogrožale naseljenih območij.

Vetrovi, povezani s preходом fronte, pihaajo večinoma po dolini navzdol. To velja za jugozahodnik in severozahodnik. Le vzhodni veter, za katerega je predvidena pogostnost na tem območju med 5 in 10 %, lahko vpliva na Trojane s koncentracijami okoli $\text{CO } 400 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{NO}_x 300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in $\text{VOC } 60 \mu\text{g}/\text{m}^3$. (Planinšek, Rode, 1995)

Predor Ločica - severni vhod

Lokacija severnega vhoda v predor Ločica je v dolini. Na tem mestu se združi več dolin. Zaradi razgibanega reliefa je ocena vetrovnih razmer na tej lokaciji močno negotova. Po smeri doline, ki na tem mestu poteka v smeri sever - jug, imajo lokalni vetrovi pretežno južno smer, tako podnevi kot tudi ponoči. Enako velja za pred frontalni jugozahodnik, medtem ko za severozahodnik in vzhodnik brez meritev vetra ni možno določiti, kako pihata na tej lokaciji. Izhod iz predora je lociran v neposredni bližini vasi Ločica, nekaj metrov nad dnem doline. Na tem mestu se z jugovzhodne in vzhodne smeri vključijo tri stranske doline v glavno

dolino. Ponoči teče tok hladnega zraka po teh dolinah navzdol in se vključi v tok zraka po dolini Bolske navzdol. Obstaja velika verjetnost, da bo tok zraka iz stranskih dolin nosil pline iz predora naravnost v Ločico. Če veter tako piha, koncentracija onesnaženja v mirnih nočeh v Ločici zaradi predora znaša od 700 do 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ NO_x , od 1000 do 1300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ CO in od 150 do 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ VOC. Pri tem ni upoštevano, da zrak, ki piha po dolini Bolske navzdol, s sabo nosi emisije iz predora Jasovnik in z dela ceste med obema predoroma. (Planinšek, Rode, 1995)

"Onesnaženost zraka zaradi prometa se bo z izgradnjo predorov v naseljih Trojane in Šentožbolt zmanjšala zaradi zmanjšanja prometa po obstoječi cesti. Emisije plinov iz predorov ne bodo prekomerno onesnaževale teh dveh krajev. Razmeroma redko bodo koncentracije povišane, vendar ne preko mejnih vrednosti." (Planinšek, Rode, 1995, str. 6)

"V Ločici je možno, da bodo zaradi izgradnje nove ceste v delu naselja mejne vrednosti koncentracij dušikovih oksidov presežene. Brez meritev vetra so izračuni z disperzijskim modelom le okvirne ocene bodočega stanja." (Planinšek, Rode, 1995, str. 6)

4. MERITVE

4.1 Izmerjene vrednosti koncentracij onesnaženja zraka in hitrost vetra

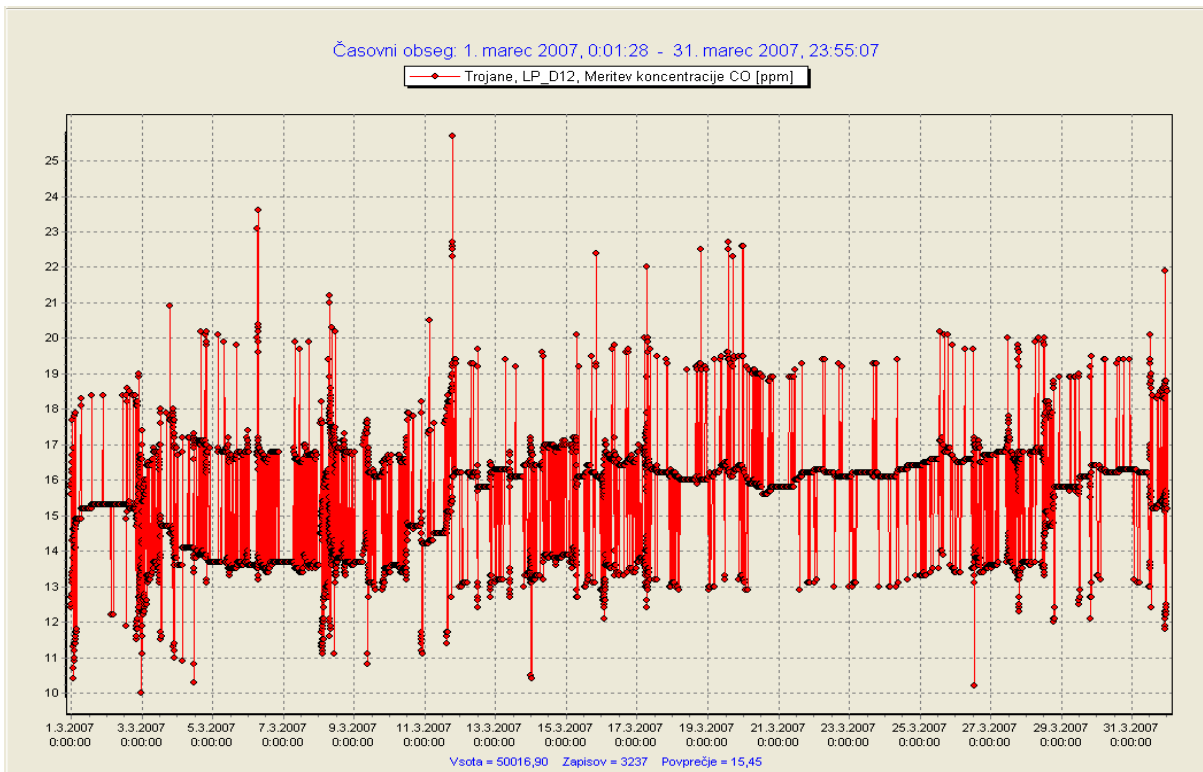
V operacijskem centru DARS - OC Vransko že nekaj let v skladu z Uredbo o tehničnih normativih in pogojih za projektiranje cestnih predorov v Republiki Sloveniji (UL RS, št. 48/06), spremljajo naslednje parametre v predoru:

- ogljikov monoksid
- hitrost vetra
- vidljivost v predoru se opazuje
- v letu 2008 se bodo začele izvajati tudi meritve lahko hlapnih organskih spojin (VOC).

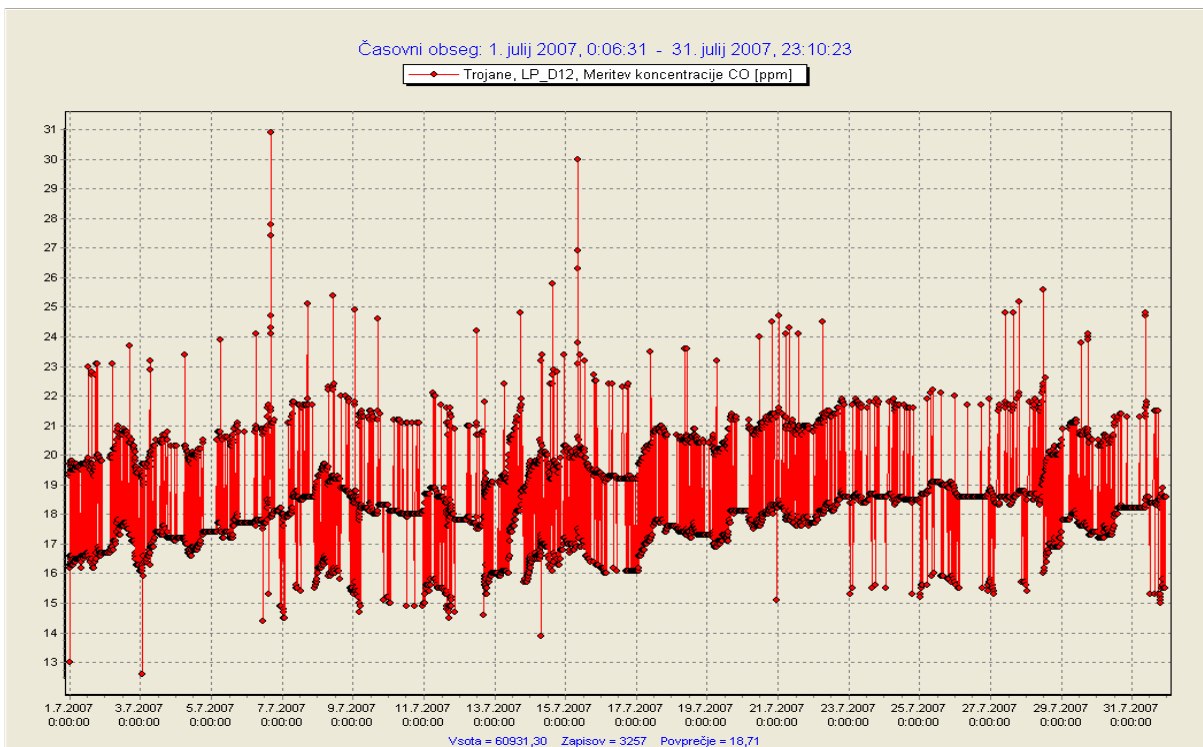
Na prvih štirih slikah so prikazane mesečne meritve ogljikovega monoksida (CO), izvedene v predoru Trojane. Podatki so za mesec marec, julij, oktober in december 2007.

Mejna koncentracija CO = 100 ppm, ni bila presežena v nobenem mesecu, je pa v jesensko - zimskem času koncentracija CO večja. Ravno tako se koncentracija CO poveča v času jutranje in popoldanske prometne konice, v času pred prazniki in v času turistične sezone. Zaradi gostejšega prometa, se hitrosti v predoru znižajo, koncentracija pa se poveča.

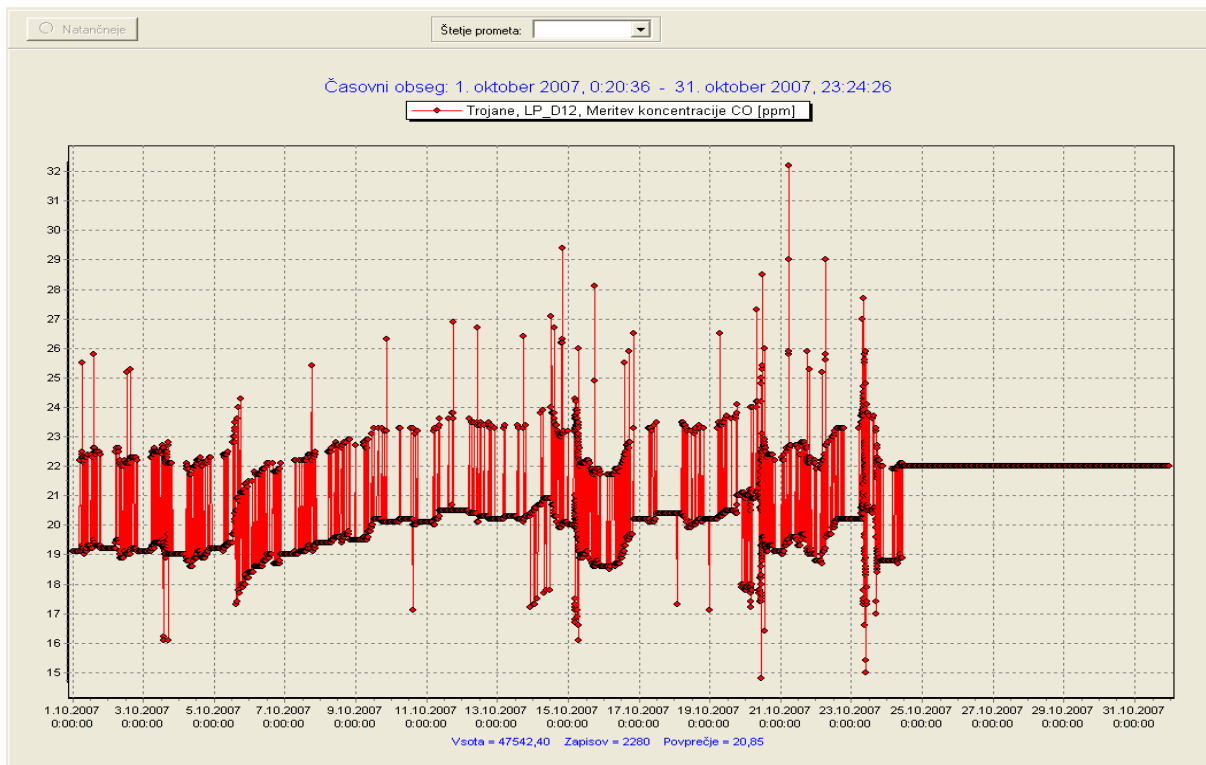
Vidljivost se v času gostejšega prometa zmanjša.



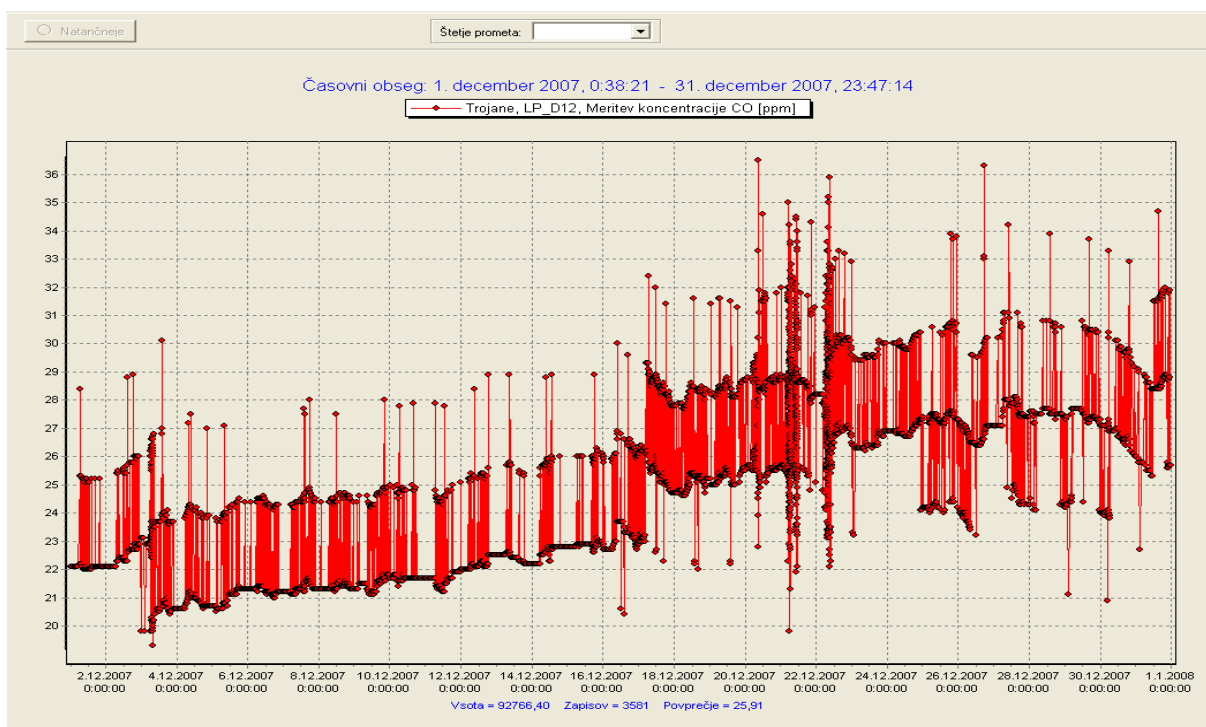
Grafikon 4.1: CO v predoru Trojane v mesecu marcu 2007 (povzeto po DARS-OC Vransko, februar 2008)
Graph 4.1: CO in tunnel Trojane in March 2007 (resumed by DARS-OC Vransko, februar 2008)



Grafikon 4.2: CO v predoru Trojane v mesecu juliju 2007 (povzeto po DARS-OC Vransko, februar 2008)
Graph 4.2: CO in tunnel Trojane in July 2007 (resumed by DARS-OC Vransko, februar 2008)



Grafikon 4.3: CO v predoru Trojane v mesecu oktobru 2007 (povzeto po DARS-OC Vransko, februar 2008)
Graph 4.3: CO in tunnel Trojane in October 2007 (resumed by DARS-OC Vransko, februar 2008)

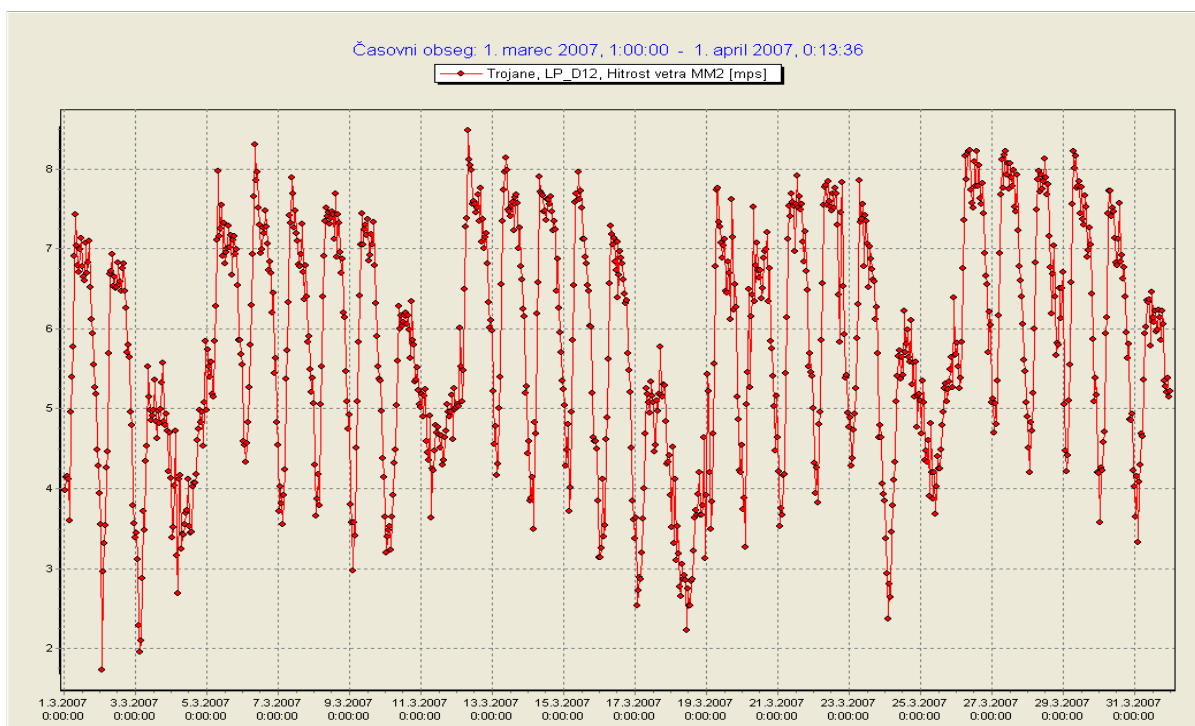


Grafikon 4.4: CO v predoru Trojane v mesecu decembru 2007 (povzeto po DARS-OC Vransko, februar 2008)
Graph 4.4: CO in tunnel Trojane in December 2007 (resumed by DARS-OC Vransko, februar 2008)

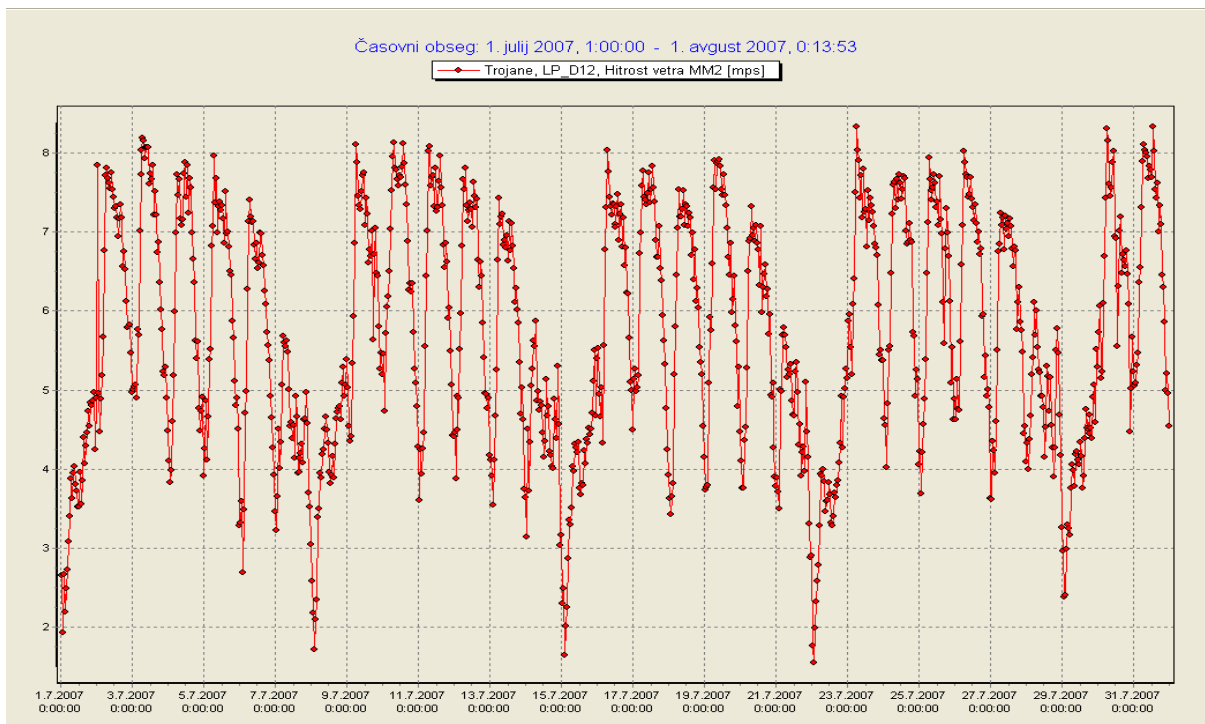
Na naslednjih štirih slikah pa so prikazane mesečne meritve vetra v predoru Trojane. Podatki so za mesec marec, julij, oktober in december 2007. Pri večji hitrosti zraka se dim zaradi mešanja z zrakom hitreje ohlaja in manj dviga ter s tem poslabša vidnost. Pri vzdolžnih prezračevalnih sistemih ob normalnem obratovanju hitrost zraka ne sme presegati 8 m/s.

Za nadzor hitrosti zraka in kontrolo delovanja prezračevalnega sistema morajo biti v vsakem prezračevanem odseku nameščene merilne naprave.

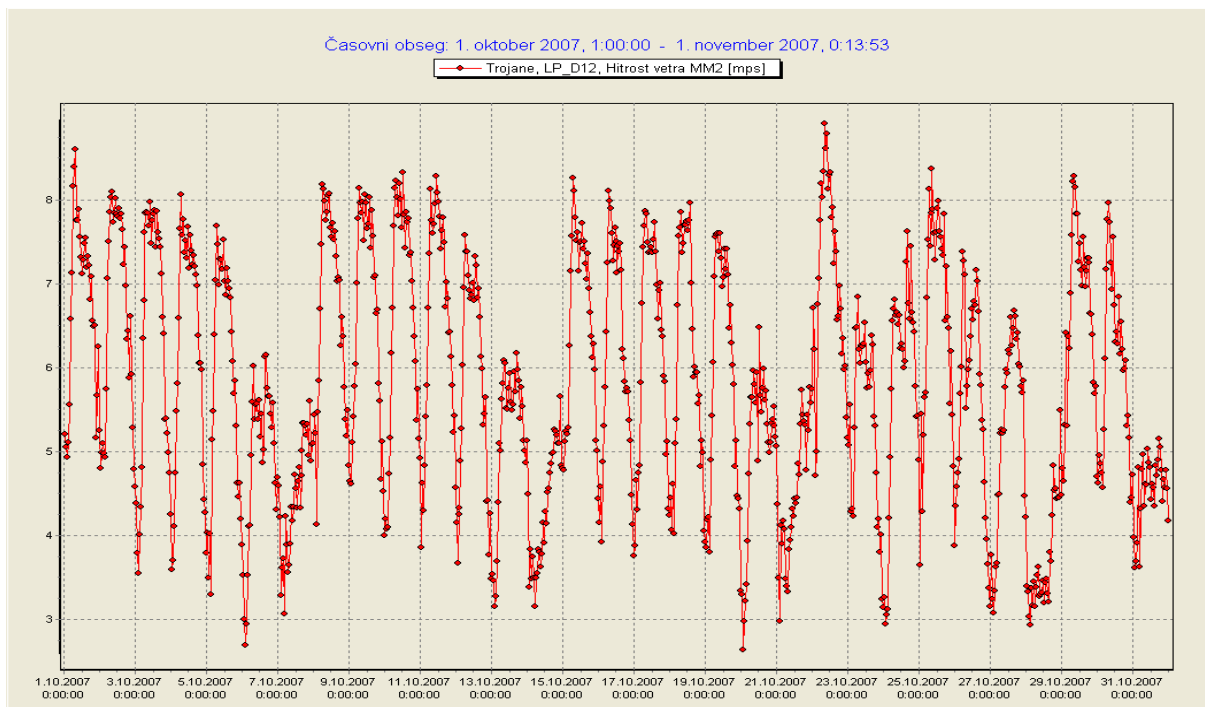
Ugotovimo lahko, da je hitrost 8 m/s največkrat presežena v popoldanskem času, v času prometnih konic in tiste dneve, ko so bile vremenske spremembe izrazitejše.



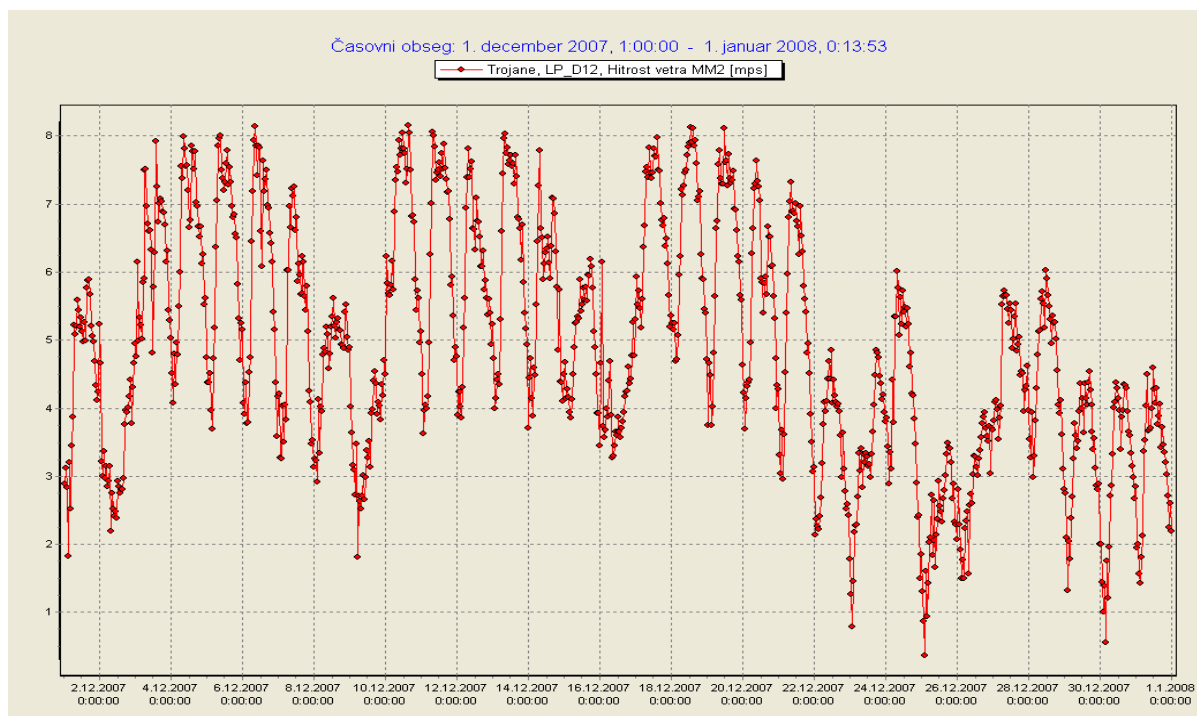
Grafikon 4.5: Vetr v predoru Trojane v mesecu marcu 2007 (povzeto po DARS-OC Vransko, februar 2008)
Graph 4.5: Wind in tunnel Trojane in March 2007 (resumed by DARS-OC Vransko, februar 2008)



Grafikon 4.6: Veter v predoru Trojane v mesecu juliju 2007 (povzeto po DARS-OC Vransko, februar 2008)
Graph 4.6: Wind in tunnel Trojane in July 2007 (resumed by DARS-OC Vransko, februar 2008)

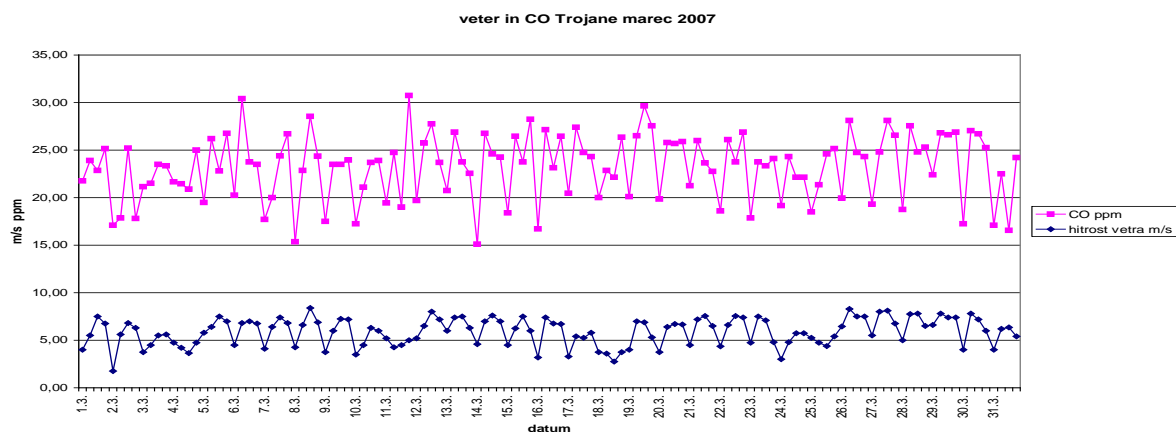


Grafikon 4.7: Veter v predoru Trojane v mesecu oktobru 2007 (povzeto po DARS Vransko, februar 2008)
Graph 4.7: Wind in tunnel Trojane in October 2007 (resumed by DARS-OC Vransko, februar 2008)



Grafikon 4.8: Veter v predoru Trojane v mesecu decembru 2007 (povzeto po DARS-OC Vransko, februar 2008)
Graph 4.8; Wind in tunnel Trojane in December 2007 (resumed by DARS Vransko, februar 2008)

Na grafikonu 4.9 sta združena tako CO, kot tudi veter. Opazimo lahko, da je v času močnejšega vetra v predoru manj CO, pri čemer je v predoru boljša vidljivost, v času šibkega vetra pa se koncentracija CO močno poveča, poslabša pa se vidljivost. Gre za vrednosti v času popoldanske konice.



Grafikon 4.9: CO in veter v predoru Trojane v mesecu marcu 2007 (povzeto po DARS-OC Vransko, feb. 2008)
Graph 4.9: CO and Wind in tunnel Trojane in March 2007 (resumed by DARS-OC Vransko, februar 2008)

4.2 Izmerjene vrednosti hitrosti zraka

Vrednosti hitrosti zraka so izmerjene z uporabo mehanskih, termičnih in ultrazvočnih merilnih naprav.

Predori, podvozi in podzemni promet so sestavni del modernih prometnih povezav. Za učinkovito upravljanje in krmiljenje prezračevanja predorov, so natančne vrednosti jakosti in smeri zračnega toka, nujno potrebne.

Mehanske ali termične merilne naprave zajemajo le točkovne vrednosti zračnega toka. Posebej pri zapleteni montaži so dobljeni rezultati premalo natančni zaradi smeri in hitrosti zraka, zaradi prereza predora.

Merilni postopek na osnovi ultrazvoka daje avtomatsko srednje vrednosti hitrosti po celotnem prerezu predora. Meritev poteka brez stika z medijem, brez mehanskega gibanja delov in je zaradi tega zelo zanesljiva in merilna naprava skorajda ne potrebuje vzdrževanja.

Naprava je zmogljiva in stroškovno ugodna, saj je namenjena večletnemu delovanju.



Slika 4.1: Flowsic 200, naprava za merjenje hitrosti toka zraka

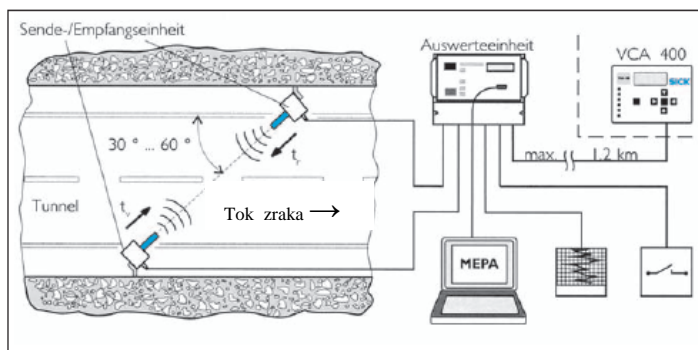
Fig. 4.1: Flowsic 200, instrument for measuring of air stream speed

Sistem je sestavljen iz dveh pretvornikov, oddajno/sprejemnih enot, ki ju je možno pritrditi in naprave za sprejemanje podatkov. Sistem deluje na osnovi oddajanja/sprejemanja ultrazvoka. V napravi za sprejem podatkov je vsa potrebna elektronika za pretvorbo in obdelavo signalov,

prikazovalniki izmerjenih vrednosti in signalov, krmilna enota za upravljanje, vzdrževanje in servis naprave.

4.2.1 Meritve hitrosti zraka

Na obeh stenah predora sta pod kotom 30° do 60° glede na vzdolžno os predora vgrajena dva pretvornika ultrazvoka, ki delujeta izmenično kot oddajnik in sprejemnik. Različne hitrosti in smeri toka zraka v različnih časovnih intervalih se merijo s pomočjo impulzov ultrazvoka. Pri vožnji proti pretvornikoma je časovni interval t_v skrajšan, pri vožnji v nasprotni smeri t_r pa podaljšan. Iz te razlike časovnih intervalov je hitrost izračunana neodvisno od tlaka in temperature.



Slika 4.2: Princip meritve in komponente sistema

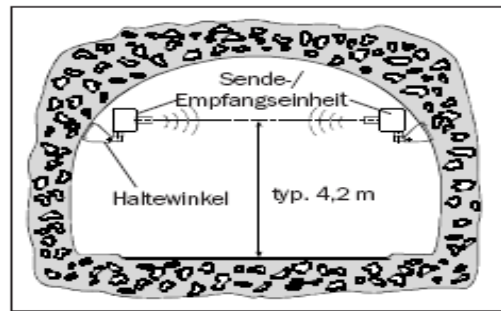
Fig. 4.2: Principle of measurement and the system components

Lastnosti sistema:

- območje delovanja naprave je nastavljivo med -20 m/s do $+20$ m/s,
- merilno območje med 5 in 20 metri,
- največji razmak med pretvornikoma je 1000 m,
- natančnost meritev je $\pm 0,1$ m/s,
- delovanje pri temperaturi od -10°C do $+50^{\circ}\text{C}$.

4.2.2 Montaža sistema za merjenje hitrosti zraka

Pretvornika se pritrdita na nasprotnih stenah predora, v višini 4,2 metra. Naprava za sprejemanje podatkov se lahko nahaja na različnih mestih in izvedbah, največkrat v ohišju.



Slika 4.3.: Princip montaže komponente sistema

Fig. 4.3: Principle of system components setting up

4.3 Opazovanje motnosti zraka v predorih

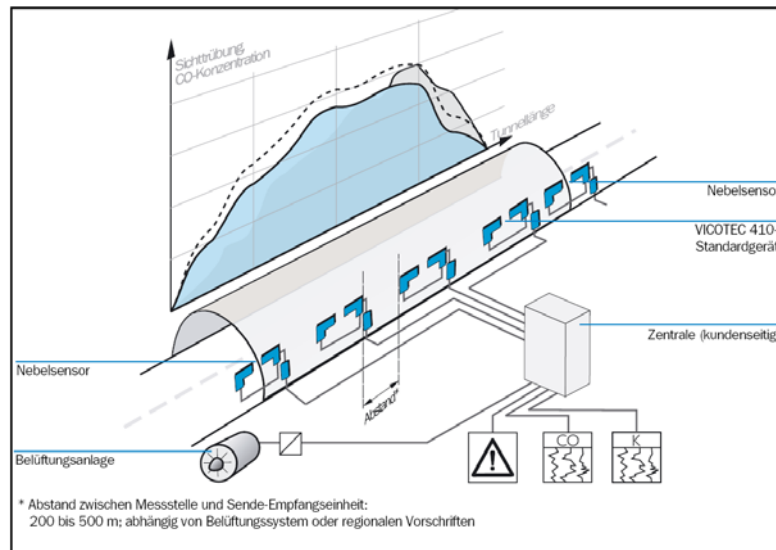
Naprava deluje na osnovi optike in elektronske obdelave podatkov. Namenjena je kontinuiranemu merjenju ali merjenju z zakasnitvijo, vrednosti CO in motnosti zraka. Kompaktni in robustni senzorji so nameščeni direktno v zračni tok.

Odlikuje se zaradi:

- simultane merjenja motnosti samo zraka, ali samo CO koncentracije ali pa obeh skupaj;
- udobne rabe (velik grafični zaslon);
- avtomatska časovna primerjava ter optimizacija zagonskih stroškov;
- minimalni stroški inštalacije, zagona in vzdrževanja;

Zaradi možnosti simulacije posamezne meritve koncentracije motnosti in CO, naprava ponuja možnost uporabe:

- nadzor krajših predorov ali podzemnih komunikacij s samo enim merilnim mestom;
- zajem daljših predorov;
- vgradnja senzorjev megle na portalih predora (maksimalno 2, vhod, izhod);



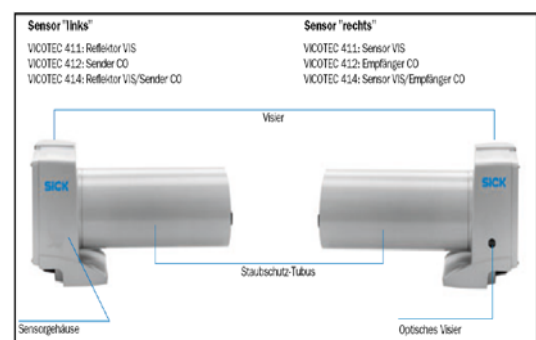
Konfiguracija naprave VICOTEC 410 (povzeto po DARS –OC Vransko, 2008)

Naprava je sestavljena iz naslednjih komponent:

- dva senzorja (levi, desni);
- analizator

opcijsko pa so lahko dodane še komponente:

- za vsak portal ena sonda za meglo;
- dodatna enota za različne vrste napetosti



Analizator ter levi in desni senzor (povzeto po DARS – OC Vransko, 2008)

4.3.1 Meritve motnosti zraka

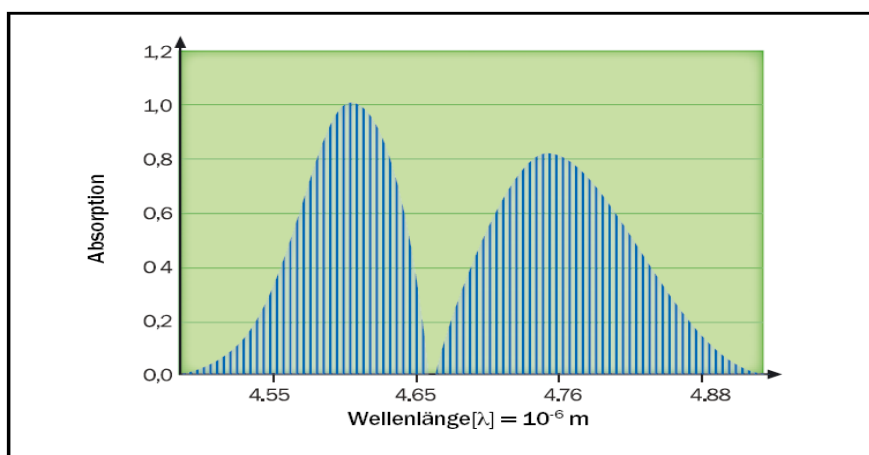
Vsak par senzorjev ima eno ali dve elektronski optični merilni napravi, ki merita vrednosti motnosti ali koncentracije CO, neodvisno ena od druge.

Naprava za merjenje CO koncentracij, (IR enota), je sestavljena iz infrardečega oddajnika in sprejemnika. Vzporedno temu je nameščena tudi naprava za merjenje motnosti (VIS enota), ki je sestavljena iz oddajno-sprejemne enote in trojnega reflektorja, ki je od enote oddaljen 10 metrov. Meritev poteka na podlagi samonastavitve naprave. Svetloba je poslana od oddajnika preko reflektorja k sprejemniku, pri čemer opravi pot, dolgo 20 metrov.

Sprejemnik zajame zmanjšane vrednosti merjene svetlobe, zaradi delcev prahu, saj, ipd., ki so v predorskem zraku. Pridobljena groba vrednost se v analizatorju pretvori v merjeno vrednost. Možna odstopanja, zaradi npr. onesnaženja ali (pre)dolge uporabe naprave v merjenem toku, so s to napravo kompenzirana.

4.4 Meritve koncentracije CO

Princip merjenja CO koncentracij sloni na specifičnih valovnih dolžinah absorpcije z infrardečo svetlobo v ogljikovem monoksidu. CO je navzoč v območju z valovno dolžino med 4,5 do 4,9 μm absorpcijskega spektra, ki je sestavljen iz množice iglastih absorpcijskih črt:



Absorpcijski spekter CO (povzeto po DARS – OC Vransko, 2008)

4.4.1 Namestitvev naprav za meritve koncentracije CO

Razporeditev naprav na merska mesta mora biti usklajena s sistemom prezračevanja.

Podrobnosti so odvisne od:

- oblike predora;
- vodenja trase;
- izvedba prezračevalnega sistema
- število in razporeditev zračnikov;
- področna zakonodaja.

Izbira merilnih mest se določa po naslednjih kriterijih:

- pri polprečnem in prečnem prezračevanju se priporoča enakomerna porazdelitev po vsej dolžini predora, z minimalno dvema merilnima mestoma na posamezni prezračevalni sektor.
- v enocevnom predoru z enosmernim prometom, se vožnja v nasprotni smeri na splošno ne izključuje. Po zakonodaji za predorsko opremo in vzdrževanje, mora biti dolg prezračevan predor opremljen z vsaj tremi merilnimi mesti, 2 merilni mesti približno 150 metrov oddaljeni od portalov, vsaj eno pa je na sredi predora.
- Če obstaja nevarnost, da se v predoru pojavi megla, morajo biti senzorji za meglo postavljeni maksimalno 10 metrov od portalov. V predorski cevi se lahko efekt megle okrepi, predvsem zaradi kemične reakcije delcev prahu v zraku s kapljicami megle. Take kapljice povečajo motnost, nepreglednost. Pri konceptu merjenja s senzorji za meglo, je megla zaznana takoj. Zaradi tega se lahko s krmiljenim prezračevanjem izognemo vsesavanju megle.
- Pri zavutih cestiščih se opaža, da se merilni žarek med posameznimi senzorji zaradi obdelave predorskih sten, ali gibajočih se vozil, prekinja.

Ponavadi megla prodre v predor do 150 metrov globoko. Kjer megle ni možno zanemariti, se priporoča vgraditev dodatnih tipal za meglo v bližini portalov predora. S pravočasno informacijo se lahko izognemo sesanju megle v predor s spremenjenim načinom

prezračevanja. Pri uporabi parov tipal za meglo na portalih, se uporablja učinkovit program za korekcije vrednosti megle. Program vsebuje potek prepoznavanja megle, ki prodira v predor. Uravnavanje prezračevanja je lahko tako, da v predor ne pride skoraj nič megle. Upoštevati je potrebno, da se razmere od predora do predora spreminjajo, zato obstaja možnost, da se program uravnavanja količine megle v predoru parametrira za vsak predor posebej.

Nameščanje tipal v predoru je med 3,5 do 4, 5 metrov visoko, pri čemer višina zaradi dobrega mešanja zraka ni kritična. Na splošno je v frekventno obremenjenem predoru koncentracija delcev po prerezu zelo enakomerno porazdeljena. Promet, strujanje pri naravnem prezračevanju in batni efekt v predorski cevi zaradi enosmerne vožnje, povzroči hitro mešanje zraka. Najhitreje se zrak vrtinči za motornim vozilom.

5. DOVOLJENE KONCENTRACIJE ŠKODLJIVIH SNOVI IN VPLIV NA ČLOVEKA

Zgorevanje in s tem povezana čistost dimnih plinov pri bencinskih motorjih je pri ogretilih motorjih optimalna, uravnavana pa je s pomočjo katalizatorja. Zgorevanje v dieselskih motorjih pa je razmeroma slaba, saj se poleg dimnih plinov v ozračje izločajo tudi trdi delci, kar je še posebej pomembno pri zagotavljanju vidljivosti v predorih. Trdi delci nastajajo tudi zaradi obrabe vozišča in gum. Škodljive snovi pa ne nastajajo samo pri zgorevanju goriv v motorjih z notranjim zgorevanjem ampak tudi v primeru požara v predoru.

Pri načrtovanju prezračevanja v predorih je zelo pomemben podatek ali je predor namenjen samo enosmernemu ali dvosmernemu prometu. Na osnovi tega se določi način prezračevanja, katerega glavna naloga je da so v tunelu koncentracije škodljivih dimnih plinov v dovoljenih mejah pri maksimalni prometni obremenitvi. Za vsak tunel posebej je potrebno s pomočjo računalniških simulacij izračunati parametre, ki so odvisni od prereza in volumna predora, nadmorske višine na vhodu in izhodu, hitrosti vožnje skozi predor, vrste vozil, ipd..

Glavni vzrok velikim koncentracijam ogljikovega monoksida CO in hlapnih organskih snovi VOC, pa tudi koncentracij dušikovih oksidov NO_x v izpušnih plinih so nestacionarni pogoji zgorevanja in lokalne temperaturne razlike v zgorevalnem prostoru. Te razmere se na avtocestah, kjer poteka promet razmeroma kontinuirano, precej izboljšajo. V urbanem načinu vožnje se večino koristne energije motorja porablja za premagovanje kotalnega upora in se med pospeševanjem pretvarja v kinetično energijo, med zaviranjem pa se pretvarja v nekoristno toploto. Zato režim prometa z veliko pospeševanja in zaviranja prispeva k večji porabi goriv in zaradi nestacionarnega delovanja motorja k večjemu onesnaževanju.

Na avtocestah pa so hitrosti vožnje višje, zato se velik del moči motorja porablja za premagovanje zračnega upora, ki narašča s kvadratom hitrosti, moč motorja, potrebna za njegovo premagovanje pa s tretjo potenco hitrosti. Zato se z večjo hitrostjo povečata poraba goriv in onesnaževanje. To je zelo izrazito pri ekstremnih hitrostih.

V zadnjih letih so avtomobili na bencinski motor opremljeni s katalizatorji. Po prehodu izpušnih plinov skozi katalizator se koncentracija CO, VOC in NO_x zaradi med seboj povezanih reakcij oksidacije in redukcije močno zmanjša, vendar mora katalizator imeti ustrezno visoko temperaturo. Tega problema na avtocestah praktično ni. Koncentracija omenjenih snovi, pa tudi dimnih plinov, prihajajočih iz izpušnih cevi dieselskih motorjev, se redči po naravni poti, pri tem se okolje onesnažuje. V zaprtih prostorih, izpostavljenih prometu, moramo dodatno poskrbeti za znižanje koncentracij na dovoljeno mejo, kar dosežemo z različnimi načini prezračevanja.

Sistem za prezračevanje mora zagotavljati ustrezno koncentracijo škodljivih snovi, tako v ekstremnih, kakor tudi v normalnih razmerah. Vedeti moramo namreč, da se prometna situacija časovno lahko zelo spreminja in lahko nastopijo naslednji primeri:

- Do zastoja pride izven predora, posledica tega je zmanjševanje hitrosti s potovalne hitrosti postopoma na mirovanje, kjer tečejo motorji v prostem teku. Ko promet spet steče, pride do obratnega vrstnega reda, od mirovanja se hitrost počasi stopnjuje do potovalne hitrosti.
- Emisija ogljikovega monoksida pri pospeševanju in zaviranju je večja, kot pri tekoči vožnji, vendar gledano v celoti ne zagrešimo prevelike napake, če tega ne upoštevamo (cca 10%, kar je upoštevano pri varnosti).
- Promet poteka kot enota z nespremenjenimi razdaljami med avtomobili, ne glede na vzpon ali padec cestišča.

5.1 Vpliv emisij na človeka

Ogljikov monoksid CO

Na osnovi znanih medicinskih poskusov lahko ugotovimo povezavo med koncentracijo ogljikovega monoksida (CO) v vdihanem zraku in koncentracijo karboksihemoglobina (COHb) v človeški krvi. Vsi motorji z notranjim zgorevanjem proizvajajo izpušne pline, ki vsebujejo škodljive komponente: ogljikov monoksid (CO), dušikove okside (NO_x),

ogljikove vodike (C_xH_y) in dim. Za primerjavo: v bivalnih prostorih je pomembna količina cigaretne dima, dima iz peči ali kamina, neprimerno prezračevanje.

V predorih je najbolj nevaren ogljikov monoksid (CO), če preseže dovoljeno mejo. V človeški krvi ogljikov monoksid povzroča naraščanje koncentracije karboksihemoglobina, v tem primeru hipoksio tkiva.

S pomočjo matematičnih modelov, se lahko izračunajo koncentracije nekaterih nevarnih substanc ob izstopu iz predora. Za ta primer je bila izpeljana nova diferencialna enačba, ki prikazuje zvezo med koncentracijo ogljikovega monoksida (CO) v zraku in koncentracijo karboksihemoglobina (COHb)¹¹ v krvi. (Modic, 2003)

Predstavljeni matematični model lahko prikaže različne razmere v predoru (hitrost premikajočega se zraka zaradi indukcije, koncentracije škodljivih snovi in kriterialno število).

Prav tako je razvit ustrezen računalniški program, ki lahko hitro izdela preproste kalkulacije. Vsi rezultati so preizkušeni in dokazani s poskusi. Izpeljana je bila tudi diferencialna enačba, ki prikazuje časovno zvezo med obema parametroma, kot funkcije karakteristik predora.

Ogljikov monoksid se veže s hemoglobinom v krvi podobno kot kisik, in sicer ena molekula ogljikovega monoksida na en atom železa. Vendar se veže dosti lažje, pri tem nastaja karboksihemoglobin (COHb). Njegova afiniteta do hemoglobina je približno 210 krat večja, kot je afiniteta kisika, in je odvisna od temperature krvi, njene pH vrednosti, stanja ionov in od koncentracije hemoglobina. Večja afiniteta ogljikovega monoksida do hemoglobina je posledica dejstva, da poteka disociacija COHb približno 1000 krat počasneje, kot disociacija O_2Hb . Povezava med koncentracijo COHb v krvi in simptomatiko je prikazana v preglednici 5.1. (Modic, 2004)

Znaki zastrupitve s CO so utrujenost, glavobol. Da gre za zastrupitev s CO, je potrebno preseči 10 % zasičenja v krvi s COHb.

¹¹ COHb – karboksihemoglobin – koncentracija CO v krvi

To je približno enakovredno koncentraciji v atmosferi (70 mg/m^3), za osebo, ki opravlja lažja opravila. Cobrunov model uporablja WHO:

- 15 minut - 100 mg/m^3
- 30 minut - 60 mg/m^3
- 1 ura - 30 mg/m^3
- 8 ur - 10 mg/m^3 . (DRAFT, 2006)

Prglednica 5.1: Simptomatika v povezavi s koncentracijo COHb v krvi

Table 5.1: Symptomatic in corelation with COHB concentration in blood

| DELEŽ COHb (%) | SIMPTOMI |
|----------------|---|
| 0 ÷ 10 | Nobenih posebnih znakov (kadilci |
| 10 ÷ 15 | Nobenih težav, le pri telesnih naporih omotica (hudi kadilci) |
| 15 ÷ <u>25</u> | Pri mirovanju ni težav, omotica pri naporih, glavobol, razširjene kapilare |
| 25 ÷ 35 | Glavobol, omedlevica, nemiren pulz, razdražljivost, težja presoja, težave z vidom |
| 35 ÷ 45 | Kot zgoraj, vendar izraziteje, tresenje, mrzlica, prividi, vse že pri neznatnih naporih |
| 45 ÷ 55 | Težke motnje zavesti, omedlevica, sunkovito dihanje, povišan utrip, kolaps, smrtno nevarno v daljšem času |
| 55 ÷ 65 | Trzavica, ohromelost dihanja |
| NAD 65 | Neposredna smrtna nevarnost |

Povprečna maksimalna dopustna koncentracija COHb v krvi je 50 ppm (55 mg/m^3), pri nadmorski višini preko 1500 m pa 25 ppm. Pri tem moramo upoštevati tudi čas izpostavljenosti ogljikovemu monoksidu in človekovo aktivnost. Pri visoki koncentraciji ogljikovega monoksida v vdihanem zraku nastopi nevarnost že po nekaj vdihih. Približno 0.50% volumna CO deluje smrtno v zelo kratkem času ($0.01\% = 100 \text{ ppm}$), 0.30% deluje smrtno približno po dveh urah izpostavljanja. Koncentracija COHb je odvisna od koncentracije CO v vdihanem zraku, ter od časa izpostavljanja. Klinična slika je odvisna tudi od telesne aktivnosti (faktor k1) in od koncentracije hemoglobina, zato je le delno sorazmerna s koncentracijo COHb v krvi. Tudi velika koncentracija ogljikovega dioksida v vdihanem zraku povzroča povečanje koncentracijo COHb v krvi. (Modic, 2004)

"Za stopnjo nasičenosti krvi s karboksihemoglobinom (COHb) kot funkcijo časa izpostavljanja τ in koncentracije CO v vdihanem zraku je bilo na osnovi vrste eksperimentov ugotovljeno, da lahko določimo nasičenje krvi s COHb po enačbi (5.1):

$$\log COHb = konst_1 k_{CO} + konst_2 \log(c_1 c_2 \tau) - konst_3 \quad (5.1)$$

pri tem je:

| | | |
|-----------|---|-------|
| COHb | stopnja nasičenosti krvi (hemoglobina) s COHb | (%) |
| k_{CO} | koncentracija CO v vdihanem zraku | (ppm) |
| c_1 | koeficient vpliva dejavnosti | |
| c_2 | koeficient nadmorske višine (spr. gostote zraka v pljučih!) | |
| τ | čas izpostavljanja | (min) |
| $konst_1$ | 0.85763 | |
| $konst_2$ | 0.62995 | |
| $konst_3$ | 2.29519 | |

za c_1 je:

| | |
|---------------------|--------------|
| mirovanje (sedenje) | $c_1 = 1.00$ |
| lahko gibanje | $c_1 = 1.69$ |
| lahko delo | $c_1 = 2.81$ |
| težko delo | $c_1 = 3.77$ |

za c_2 je:

$$c_2 = \frac{p_0}{p_H} = \left(\frac{1013.25 - 22.87H}{1013.25} \right)^{-5.255} \quad (5.2)$$

Pri tem je:

| | | |
|-------|-----------------------------------|--------|
| p_0 | zračni tlak na morski gladini | (mbar) |
| p_H | zračni tlak na nadmorski višini H | (mbar) |
| H | nadmorska višina | (km) |

Za izračun stopnje nasičenosti krvi s COHb kot funkcijo časa je ugodneje, če osnovno enačbo (5.12) zapišemo v diferencialni obliki:

$$\frac{d(\text{COHb})}{d\tau} = 0.0031926k_{CO}^{0.85753} (c_1c_2)^{0.63} (c_1c_2\tau)^{-0.37005} \quad (5.3)$$

Enačbo lahko rešimo numerično ali s pomočjo računalnika. " (Modic, 2004, str. 15-16)

Dušikovi oksidi

Prikaz emisij škodljivih snovi v utežnostnem ali procentualnem deležu delu ne prikazuje njihove resnične nevarnosti, ker je njihova škodljivost različna. Njihovo škodljivost (posredno) podajajo šele njihove mejne imisijske vrednosti. Mejne imisijske vrednosti za SO₂, NO_x, CO, in respirabilne delce so podane v Tabeli 5.2. (Modic, 2004)

Preglednica 5.2: Štiriindvajset urne mejne imisijske koncentracije škodljivih snovi

Table 5.2: 24 hour limit immision concentrations of noxious substances

| | SO ₂ (mg/m ³) | NO _x (mg/m ³) | CO (mg/m ³) | DELICI (mg/m ³) |
|-------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 24 urna mejna vr. | 0.12 | 0.10 | 5.00 | 0.10 |

Vrednosti, podane v preglednici 5.2 so povzete po predlogu ¹² Uredbe o mejnih, opozorilnih in kritičnih vrednostih imisij v zraku. NO_x nastopajo v fotokemičnih reakcijah, katerih produkt je spodnji ozon, tj. ozon, ki nastaja v ¹³ troposferi.

Pri dovolj visoki temperaturi se NO pretvori v NO₂. Stopnja NO₂, ki presega 3.760 µg/m³, povzroča poškodbe pljučnega tkiva, pri čemer so astmatiki še bolj občutljivi. 1 urna koncentracija 200 µg/m³, letna koncentracija 40 µg/m³. (Dix in sod., 2006)

"Ker je dopustna koncentracija ogljikovega monoksida 100 ppm, dobimo na osnovi razmerja relativne škodljivosti med NO_x in CO

$$f_{NO_x} = \frac{0.75}{0.18} = 4.17 \quad (5.4)$$

¹² Uredba o mejnih, opozorilnih in kritičnih vrednostih imisij v zraku, MOP, Ljubljana, avgust 1994

¹³ troposfera - najnižja in najgostejša plast ozračja. Sega do okoli 10 km nadmorske višine. V njej se nahajajo oblaki in se dogajajo vremenski pojavi.

Tako je dopustna koncentracija dušikovih oksidov v primerjavi z dopustno koncentracijo CO:

$$k_{NO_x \max} = \frac{k_{CO \max}}{f_{NO_x}} = \frac{100}{4.17} = 25 \text{ ppm} \quad (5.5)$$

Dim in saje

Prezračevanje predorov ima razen razredčevanja koncentracije ogljikovega monoksida in dušikovih oksidov še eno pomembno nalogo: razredčevanje dimnih plinov dieselskih motorjev na mejo, ki še zagotavlja potrebno vidnost zaradi prometne varnosti.

Sestava delcev v okolju in v cestnih predorih je zelo različna, kot tudi njihov izvor. Poleg delcev, ki se v zrak izločijo z izpušnimi plini, obstajajo tudi delci, ki nastanejo pri obrabi vozišča, delci kremenca, delci avtomobilskih gum, delci zavor, kovinski delci spojev na vozilih, ipd..

Emisije delcev v izpušnih plinih imajo zelo fino obliko, pod $0,2 \mu\text{m}$. Zaradi koagulacije in kondenzacije se delci povečajo v času in oddaljenosti od vira. Delci z velikostjo $0,1$ do $1 \mu\text{m}$, se prenašajo na dolge razdalje. Največji delež prahu predstavljajo delci zaradi erozije na cestah.

Motnost v zraku povzročajo:

- prašni delci velikosti od $1 \mu\text{m}$ do $30 \mu\text{m}$, največ pa okoli $10 \mu\text{m}$ in
- izpušni plini (dim, saje) dieselskih motorjev velikosti od $0.01 \mu\text{m}$ do $1 \mu\text{m}$, največ okoli $0.30 \mu\text{m}$.

Praktično prašni delci nimajo odločujočega vpliva na vidnost, tako je glavni problem pri prezračevanju predorov zagotavljanje vidnosti zaradi izpušnih plinov dieselskih motorjev.

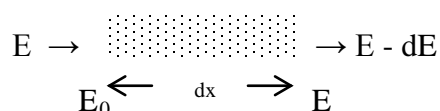
Vendar na tem področju ni na voljo vseh ustreznih podatkov. Težava je tudi v tem, da

- količina vstopnega zraka služi tako za zniževanje koncentracije CO kot izpušnih plinov dieselskih motorjev in ni kumulativna, ampak sprotna, ter

- promet skozi predore je mešan, sestavljen iz vozil z bencinskimi motorji, ki izločajo malo dima in veliko CO, in iz vozil z dieselskimi motorji, ki imajo ravno obraten učinek. (Modic, 2004)

"Snop svetlobe z energijo E_0 pri svojem prehodu zadene v aerosol, in samo en del (E_T) pride do konca, ostali del pa se razsipa (E_D - disperzija), in absorbira v delcih (E_A). Vsota zadnjih dveh komponent, ki ne prideta do konca, je ¹⁴ekstinkcija svetlobe:

$$E_0 = E_T + E_D + E_A \quad (5.6)$$



Po Lambertovem zakonu je na razdalji dx zmanjšanje energije svetlobe sorazmerno dolžini poti

$$dE = -EKdx \quad (5.7)$$

Predznak minus pomeni zmanjšanje, vrednost K (m^{-1}) je koeficient ekstinkcije. Če enačbo 5.7 integriramo v mejah od $x = 0$ do $x = L$, nato antilogaritmiramo, dobimo enačbo 5.8:

$$K = -\frac{1}{L} \log_e \frac{E}{E_0} \quad (5.8)$$

Pri čemer je:

K mera za motnost.

Če je zrak popolnoma čist, je $K=0$ in $E=E_0$, če je zrak popolnoma umazan, je $K=\infty$ in $E=0$

Za transmissijski koeficient na dolžini L velja:

$$T_L = \frac{E_L}{E_0} \quad (5.9)$$

¹⁴ ekstinkcija: motnost ali oslabitev svetlobe pri prehodu skozi snov; Slovenski pravopis, 2003

Če je $T_L = 0$, se vsa svetloba uniči, če je $T_L = 1$, gre vsa svetloba neovirano naprej. Motnost N je komplementarna transmisivnosti T .

$$N = 1 - T \quad (5.10)$$

Zato lahko koeficient ekstinkcije izrazimo ali s pomočjo transmisivnosti T , ali s pomočjo motnosti N :

$$K = -\frac{1}{L} \log_e \frac{E}{E_0} = -\frac{1}{L} \log_e T_L = -\frac{1}{L} \log_e \left(1 - \frac{N}{100} \right) \quad (5.11)$$

"Zmanjševanje transmisivnosti je odvisno tudi od valovne dolžine svetlobe." (Modic, 2004, str. 18-19)

To so osnovna izhodišča za izračun potrebne količine zraka, ki naj zagotovi zahtevano vidljivost. V ta namen predpišemo minimalno razdaljo vidljivosti L_V tako, da motnost (ekstinkcija) ne preseže dopustne vrednosti K_{dop} . To pomeni, da je transmitivnost T_D enaka ali večja od T_{izk} , ali da je motnost N_D enaka ali manjša od dopustne motnosti N_{dop} . Številčne vrednosti za T_D in N_D so odvisne predvsem od predpisane minimalne vidljivostne razdalje. Na osnovi tega je v vseh evropskih državah (pa tudi v ZDA in na Japonskem) predpisano, da je

$$K_{Dmax} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}. \quad (\text{Modic, 2004})$$

5.2 Potrebna količina svežega zraka

"Po Avstrijskih zahtevah in zahtevah EU mora biti emisija škodljivih delcev osebnih in tovornih vozil v naslednjih mejah:

- CO 2.10 g/km
- NOx 0.62 g/km
- HC 0.25 g/km
- Trdni delci 0.37 g/km

Dopustne koncentracije v zraku v predorih pa so:

- Ogljikov monoksid $k_{CO_{dop}} = 100 \text{ ppm}$
- Koeficient ekstinkcije $k_{D_{dop}} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$
- Dušikovi oksidi $k_{NO_{x_{dop}}} = 25 \text{ ppm}$

Na osnovi emisije škodljivih delcev določimo ustrezno količino zraka, ki je potrebna za vzdrževanje dopustnih koncentracij." (Modic, 2004, str. 20)

Ogljikov monoksid

"Potrebna količina zraka za zagotavljanje zahtevane koncentracije ogljikovega monoksida

$$Z_{CO} = \sum_n [(q_{CO_{ob}} D_{ob}) + (q_{CO_{od}} D_{od}) + (q_{CO_{it}} D_{it})] \frac{278}{10^6 k_{CO_{dop}}} \left(\frac{m^3}{s.km} \right) \quad (5.12)$$

Pri tem je: n število stez (voznih pasov)

Dušikovi oksidi

Potrebna količina zraka za zagotavljanje zahtevane koncentracije dušikovih oksidov je

$$Z_{NO_x} = \sum_n [(q_{NO_{x_{ob}}} D_{ob}) + (q_{NO_{x_{od}}} D_{od}) + (q_{NO_{x_{it}}} D_{it})] \frac{278}{10^6 k_{NO_{x_{dop}}} \left(\frac{m^3}{s.km} \right) \quad (5.13)$$

Zahtevana vidljivost

Metode izračuna so razmeroma enostavne, problem je le v ustreznih podatkih. S tipom in z vrsto avtomobila je podana gostota izpušnih plinov na izstopu iz izpušne cevi, izražena s K_0 (m^{-1}), volumen izpušnih plinov γ (m^3/km) ali količina izpušnih plinov q_{ip} ($mg/km \ t$) in masa vozila G (t), s samim predorom in njegovo lego pa dolžina L (m), ter korekturna koeficienta f_i in f_h , ki pa sta že podana v obliki enačbe. Po podatkih daljših izvajanjih dobimo, da je potrebna količina zraka za zagotavljanje zahtevane vidljivosti.

$$Z_{vid} = \sum_n [(q_{dt} D_t) + (q_{do} D_{od}) + (q_{COt} D_t)] \frac{278}{10^6 k_{Ddop}} \left(\frac{m^3}{s.km} \right) \quad (5.14)$$

Skupna potrebna količina svežega zraka za zagotavljanje še dopustnih koncentracij v predoru je:

$$Z = \sum_n [(q_{COb} D_{ob}) + (q_{COd} D_{od}) + (q_{COt} D_t)] \frac{278}{10^6 k_{COdop}} + \sum_n [(q_{NOxb} D_{ob}) + (q_{NOxd} D_{od}) + (q_{NOxt} D_t)] \frac{278}{10^6 k_{NOxdop}} + \sum_n [(q_{dt} D_t) + (q_{do} D_{od}) + (q_{COt} D_t)] \frac{278}{10^6 k_{Ddop}} \left(\frac{m^3}{s.km} \right) \quad (5.15)$$

Tako izračunana količina svežega zraka Z (m^3/s km) zagotavlja v celotnem predoru največ maksimalno dopustno koncentracijo ogljikovega monoksida in dušikovih oksidov, ter ustrezno vidljivost zaradi izpušnih plinov osebnih vozil z dieselskimi motorji in težkih motornih vozil." (Modic, 2004, str. 20-21)

5.3 Kriterialno število

Iz analize hitrosti, koncentracij škodljivih snovi, ter ostalih parametrov vidimo, da zahteva analiza stanja v predoru precej podatkov in računskih postopkov. Dogajanja v predoru so odvisna od vrste parametrov, ki so povezani med seboj, tako moramo upoštevati:

hitrost zraka, hitrost vožnje, dolžino predora, prerez predora, čelno površino osebnih vozil, čelno površino tovornih vozil, krajevne tlačne razmere, krajevne temperaturne razmere, hidravlični premer, gostoto prometa, naklon cestišča, nadmorsko višina, koeficient zračnega upora osebnih in tovornih vozil, koeficient trenja, koeficient lokalnih uporov, število osebnih vozil, število tovornih vozil, dolžino osebnih vozil, dolžino tovornih vozil, strukturo prometa. "Večina naštetih parametrov je med seboj povezanih. Zato poiščemo izraze, ki kažejo njihovo medsebojno odvisnost.

hitrost zraka:

$$u = \frac{-\frac{f_2}{2} + \left[\left(\frac{f_2}{2} \right)^2 - f_1 \cdot f_3 \right]^{0.50}}{f_1} \quad (5.16)$$

Količina zraka

$$Z_u = A \frac{-\frac{f_2}{2} + \left[\left(\frac{f_2}{2} \right)^2 - f_1 \cdot f_3 \right]^{0.50}}{f_1} \quad (5.17)$$

$$u = u(L, A, D_h, \sum \xi, \lambda, \Delta p, p_t, c_{w0}, c_{wt}, M, l_0, l_t)$$

Ostale funkcijske povezave zajamemo z izrazi za emisijo posameznih polutantov, v katerih so vsebovane funkcije, ki izražajo odvisnost od gostote prometa, kvalitete zgorevanja v motorjih, naklona in nadmorske višine cestišča, hitrosti vožnje, leta otvoritve predora, dopustnih koncentracij posameznih polutantov, itd." (Modic, 2004, str. 21-22)

Skupna potrebna količina zraka je po modificirani enačbi 4.18:

$$Z = \sum_n \left[\left(Q_{CO} \frac{278}{k_{COdop}} + Q_{NOx} \frac{278}{k_{NOxdop}} \right) + Q_d \frac{278}{10^6 k_{Ddop}} \right] \quad (m^3 \cdot s^{-1}) \quad (5.18)$$

V izrazih za Z_u in Z so vsebovane vse pomembne funkcije, ki vplivajo na dogajanja v predoru. Oba izraza imata enako dimenzijo. Če želimo dobiti kriterialno (brezdimenzijsko) število, uvedemo razmerje, ki definira posamezne medsebojne odvisnosti:

$$M_{od} = \frac{Z_u}{Z} \quad (5.19)$$

Kriterialno število M_{od} , je razmerje med količino zraka, ki vstopa v predor (Z_u) in skupno potrebno količino svežega zraka (Z), za zagotavljanje še dopustnih koncentracij v predoru. Ima lahko različne vrednosti in različne pomene. Tako je:

$$M_{od} = 1$$

V tem primeru je količina zraka, ki vstopa v predor, enaka minimalni količini zraka, potrebni za vzdrževanje koncentracije v dopustnih mejah. To je idealen primer, kajti večja vstopajoča

količina povzroča večje upore in s tem večjo porabo energije za pogon vozil, manjša količina vstopajočega zraka pa zahteva dodatno prisilno dovajanje zraka, in s tem tudi dodatno porabo energije za prisilno prezračevanje.

$$M_{od} > 1$$

Vstopajoča količina zraka je večja od potrebne. Zato zadošča naravno prezračevanje, vendar pa se z naraščanjem M_{od} večajo upori, in s tem se poveča poraba energije za pogon vozil.

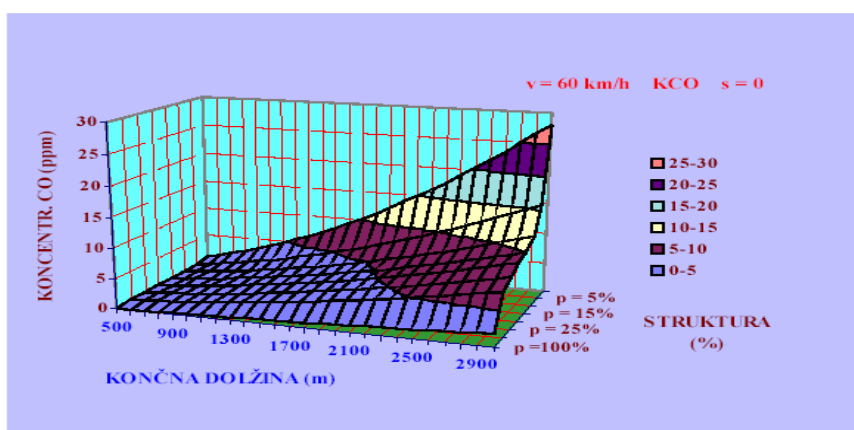
$$M_{od} < 1$$

Naravno prezračevanje ne zadošča, potrebno je prisilno prezračevanje, kar močno poveča porabo energije za ventilatorjev, potrebnih za prezračevanje. (Modic, 2004)

S pomočjo kriterialnega števila lahko izračunamo tudi maksimalno končno dolžino predora, kjer naravno prezračevanje še zadošča. To je pri $M_{od} = 1$, kjer so koncentracije največ enake dovoljenim.

$$L_{Mod} = \frac{Z_u}{Z_{lkm} \cdot M_{od}} = \frac{Z_u}{Z_{lkm}} \quad (5.20)$$

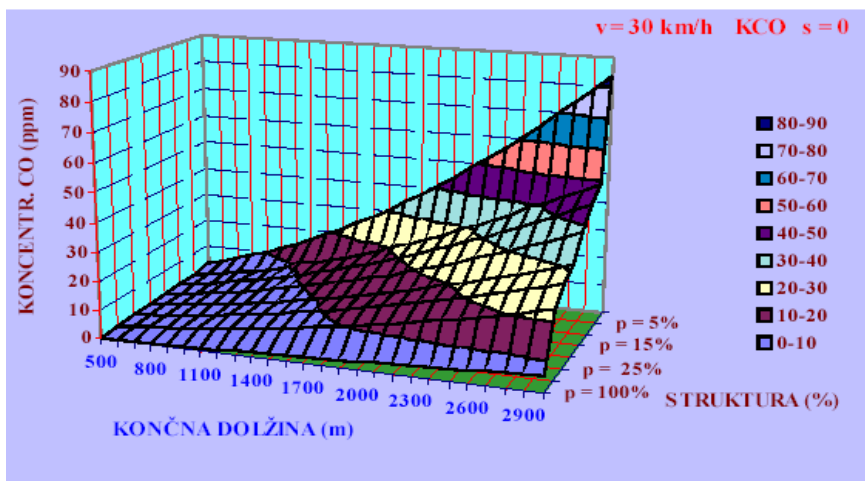
Ker se s končno dolžino predora spreminja tudi hitrost zraka, je potrebna iteracija. Zato, in pa zaradi kompliciranosti vseh enačb, ter različnih medsebojnih funkcijskih odvisnosti, je za celoten izračun najprimernejša uporaba računalniških programov (enodimenzijski, CFD, ipd.).



Slika 5.1: Koncentracije CO, 60 km/h (povzeto po Modic, 2004)

Fig. 5.1: Concentrations of CO, 60 kmph (resumed from Modic, 2004)

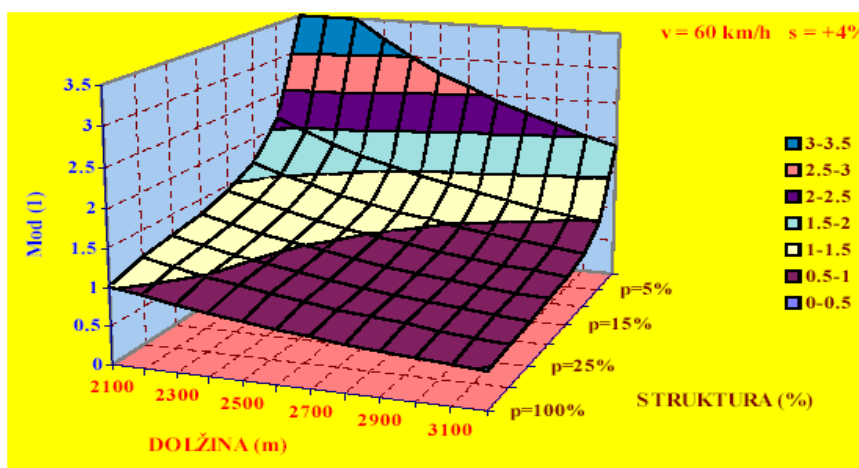
"Na sliki 5.1 je prikazano polje koncentracij ogljikovega monoksida pri dolžinah predora od 500 m do 3000 m, pri hitrosti vožnje 60 km/h, v odvisnosti od deleža tovornih vozil pri različnih dolžinah predora, v odvisnosti od strukture prometa p_t , $s = 0$ ($k_{CO_{dop}} = 100$ ppm).



Slika 5.2: Koncentracije CO, 30 km/h (povzeto po Modic, 2004)

Fig. 5.2: Concentrations of CO, 30 kmph (resumed from Modic, 2004)

Na sliki 5.2 je prikazano polje koncentracij ogljikovega monoksida pri dolžinah predora od 500 m do 3000 m, pri hitrosti vožnje 30 km/h, v odvisnosti od deleža tovornih vozil pri različnih dolžinah predora, v odvisnosti od strukture prometa p_t , $s = 0$ ($k_{CO_{dop}} = 100$ ppm).



Slika 5.3: Kriterialno število M_{od} (povzeto po Modic, 2004)

Fig. 5.3: Criterion number M_{od} (resumed from Modic, 2004)

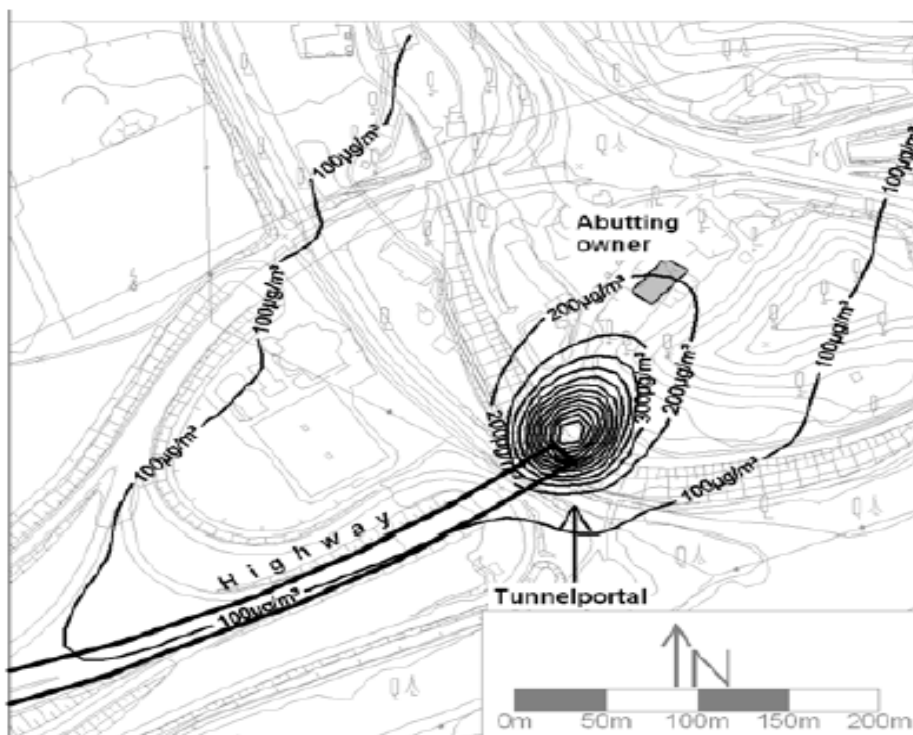
$$M_{max} = 750h^{-1}, v=60 \text{ km/h}, s=+4\%$$

"Možna so seveda tudi drugačna številčna razmerja, pa tudi drugačne funkcijske povezave. V vsakem primeru pa je prikazana metoda primerna za hitro analizo stanja v predoru, seveda pa bi bilo potrebno izdelati tudi ostale variante posameznih primerov. Za točno analizo pa je vsekakor bolj primerna uporaba v ta namen izdelanega računalniškega programa." (Modic, 2004, str. 23-24)

6 NAČRTOVANJE PREZRAČEVANJA PREDORA NA OSNOVI SIMULACIJ KAKOVOSTI ZRAKA

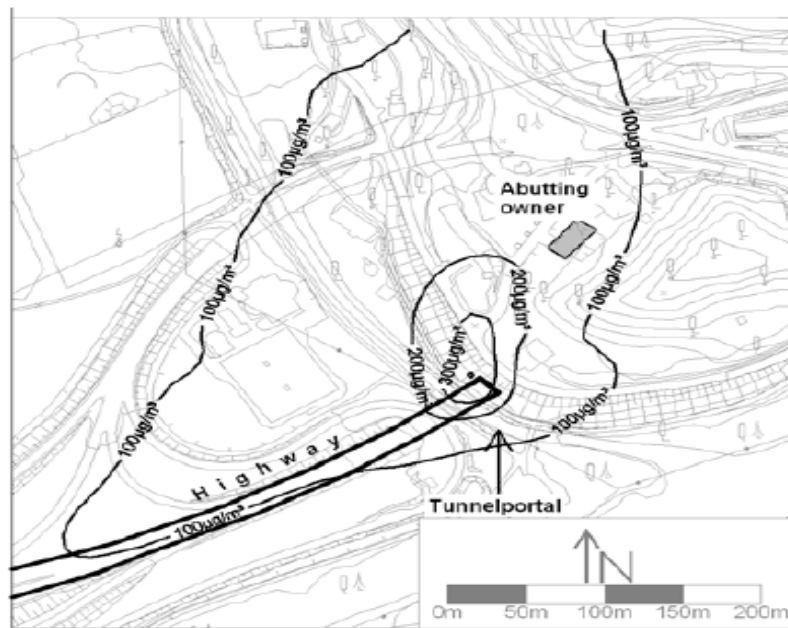
Za izračun vrednosti koncentracije NO_2 , se upošteva evropska mejna urna vrednost $200\mu\text{g}/\text{m}^3$. Za doseganje predpisane vrednosti je potrebno dokazati, katera prezračevalna hitrost je potrebna za doseg standardov za kakovost zunanjega zraka. Kot je bilo ugotovljeno, so bile najnižje vrednosti koncentracij v okoliškem zraku dosežene pri izpustu skozi vertikalni jašek. (Dix in sod., 2006)

Najvišja koncentracija pri izpustu skozi vertikalni jašek, je posledica vseh atmosferskih pogojev.



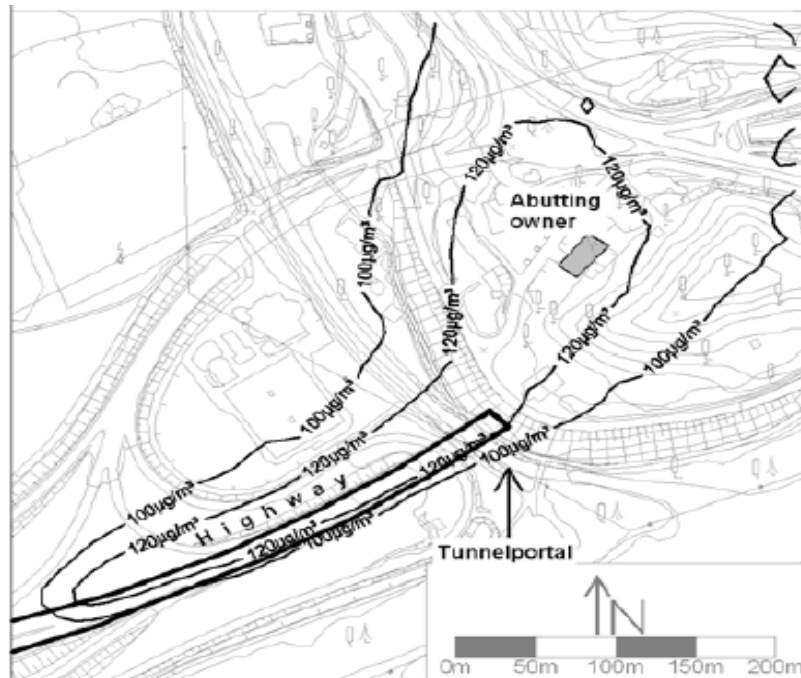
Slika 6.1: Izračunane NO_2 koncentracije v bližini predora za majhne hitrosti pri vzdolžnem prezračevanju (1 m/s) (povzeto po Dix in sod., 2000)

Fig. 6.1: Calculated NO_2 concentrations nearby the tunnel for small velocities (1 mps) longitudinal ventilation (resumed by Dix in sod., 2000)



Slika 6.2: Izračunane NO₂ koncentracije v bližini predora za velike hitrosti pri vzdolžnem prezračevanju (5 m/s) (povzeto po Dix in sod., 2000)

Fig. 6.2: Calculated NO₂ concentrations nearby the tunnel for high velocities (5 mps) longitudinal ventilation (resumed by Dix in sod., 2000)



Slika 6.3: Izračunane NO₂ koncentracije v bližini predora pri izpustu skozi 10 metrov visok jašek (5 m/s) (povzeto po Dix in sod., 2000)

Fig. 6.3: Calculated NO₂ concentrations nearby the tunnel for high velocities (5 mps) through shaft (resumed by Dix in sod., 2000)

Pri načrtovanju prezračevanja v predoru je potrebno:

- predvideti vzdržljive in energetsko varčne naprave
- predvideti je potrebno obremenitve okolja z onesnaženjem iz predora
- upoštevati vse protipožarne ukrepe v primeru prometne nesreče in določiti stopnjo tveganja
- izračunati količino dima in čas zapolnjenja cevi z dimom
- izračunati potreben čas za evakuacijo
- izračunati količino svežega zraka
- izračunati hitrost, tlak in količino zraka v glavnem predoru
- izračunati moči ventilatorjev
- izračunati koncentracije CO in drugih snovi, ki nastanejo pri požaru ter drugih potrebnih parametrov. (APTA, 2003)

6.1 Napoved gostote razpršenih koncentracij polutantov v zraku izven predora

Gostota razpršenosti pri vetrovnih pogojih se lahko izračuna z enačbo za oblak dima. Hitrost vetra je lahko enake hitrosti, ki je bila uporabljena v modelu ekvivalenta energije za razpršitev.

Območje razpršitve je lahko določeno na enak način, kot je določena metoda, uporabljena na glavnih cestah.

Napoved pri šibkih vetrovih je lahko izračunana iz enačb za sunke vetra. Lokacija in vir dima sovpadata z začetnim območje razpršitve. Razpršitev polutantov v zraku izven predora in blizu portalov je povzročena z vetrom iz predora. Pri šibkem vetru se dimni plini vozil na cesti izven predora premikajo s pomočjo vetra iz predora v isti smeri. Zato je potrebno pri računanju upoštevati naslednjo proceduro:

- vzemimo, da pline, ki nastanejo izven predora veter iz predora prenese na lokacijo, kjer se njegova hitrost zniža na 1m/s, vir nastanka plinov se pomika v isti smeri
- pojav, kjer izpušni plini vozil nastanejo in ostanejo v območju vzdolž ceste
- procedura velja za vse vire dima na razdalji od portala, kjer je hitrost vetra iz predora manj kot 1 m/s.

6.2 Izpušni plini na izhodu iz predora

Metoda je empirična in temelji na meritvah disperzije sledi elementov izven vhodov v predor in modelu atmosfere razpršenosti, ki je prilagojen razpršenosti na osnovni stopnji. (Dix in sod., 2006)

Onesnaženost zraka, ki nastane v predoru, je definirana kot dve fazi: faza curka in faza dima. V prvi fazi je pomembna hitrost, v drugi fazi pa vremenski pogoji (hitrost zunanjega vetra). Prehod iz faze curka v fazo dima je zelo kompliciran. (Dix in sod., 2006)



Faza curka in faza dima (Povzeto po Draft PIARC, 2006, str. 64))

"Nomogrami so diagrami, primerni za osnovno določanje, če razpršenost polutantov iz predora predstavlja onesnaženje. Uporabljajo se za CO in NO₂. Pri računanju NO₂ se upošteva 60 µg/m³, pri čemer NO iz predora reagira z ozonom O₃ in nastane NO₂." (Draft PIARC, 2006, str. 64)

"Nomogramov se ne more uporabiti pri izračunu dnevne povprečne koncentracije trdnih delcev PM₁₀." (Draft PIARC, 2006, str. 64)

"Kot pravilo za določanje je upoštevan NO₂ na vhodih v predor." (Draft PIARC, 2006, str. 64)

7 ODGOVORA NA HIPOTEZI

Hipoteza 1: kvaliteto zraka v predorih je potrebno načrtovati in kontrolirati!

Emisije motornih vozil potencialno lahko ogrozijo zdravje ljudi. Glavna naloga za zmanjšanje emisij vozil je minimiziranje vplivov na zdravje.

V zadnjih dvajsetih letih, je bila količina večine polutantov, ki so nastali v razvitih deželah, drastično znižanih, predvsem zaradi standardov o emisijah, ki nastanejo pri delovanju motorjev vozil, oz. zaradi velikosti izpustov vozil preko dovoljene koncentracije.

Koncentracije zračnih polutantov so določene z emisijskimi stopnjami in učinkovitostjo prezračevalnega sistema v predoru, z možnostjo izkoriščanja naravnega prezračevanja, oz. disperzije določene količine delce na različne lokacije. Razprševanje emisij, oz. njenih posameznih komponent, je možna z ustreznim načrtovanjem predora, izvajanjem prezračevanja, pridobljeno prakso. Končna uspešnost razprševanja zraka iz predora je pri načrtovanju razprševanja omejena s potencialom atmosfere v okolici predora in posledice vpliva kvalitete zunanjega zraka na odveden zrak iz predora.

Večina emisij motorjev z notranjim zgorevanjem se pojavi pri tleh ali blizu tal in najslabši pogoji stanja so povezani s stabilno atmosfero in s šibkim vetrom. Izjema so le emisije v območju najvišjih ventilatorjev in izpustih skozi "dimnik".

Največje so vrednosti emisij, ko so vetrovi zmerni in je mešanje dima pri tleh dovolj intenzivno. Pri emisijah blizu tal je inverzija popolnoma realna.

Naseljena področja se v večini primerov nahajajo na območju šibkega vetra in kjer ponavadi stabilni pogoji vztrajajo zelo dolgo. Če ta obdobja sovpadajo s časom koničnih emisij iz prometa, je potrebno stanje pred načrtovanjem prezračevalnih naprav še bolj natančno analizirati, kot v vetrovnem in nestabilnem območju.

Potrditve ustreznega načrtovanja, kjer se poleg konfiguracije terena upoštevajo tudi vsi meteorološki kazalci, pokažejo meritve posameznih komponent polutantov. Na osnovi pridobljenih podatkov, se lahko spreminja režim obratovanja predorov (npr. spreminjanje hitrosti ventilatorjev, prometne signalizacije, ipd.).

Hipoteza 2: Emisije škodljivih snovi so večje v daljših predorih in imajo podoben vpliv na urbana območja, kot območja z zelo gostim prometom!

Cestno omrežje pomembno vpliva na degradacijo okolja. Ena izmed dražjih, a v večini primerov dobrih rešitev je gradnja (cestnih) predorov. Njihov osnovni namen je v hitri in kratki povezavi cestnih odsekov, ki so med seboj ločeni zaradi naravnih preprek in s tem posledično zmanjšanje koncentracij ob vpadnicah in glavnih cestah. So pa predori viri onesnaženja v okolici na izstopu (portali), kar je še posebej problematično v naseljenem, oz. urbanem okolju.

Podobno je na vseh mestnih vpadnicah, kjer se dnevno, še posebej ob konicah promet zelo zgosti, kar je glavni povzročitelj emisij škodljivih snovi v najbolj urbanih predelih. To dokazujejo različne prometne študije za obdobje naslednjih dvajsetih let, katerih skupni kazalec kaže na povečevanje števila vozil, s tem pa na vedno večje emisije škodljivih snovi.

Za vse predore je značilno to, da so v njih emisije dimnih plinov, nastalih v motorjih z notranjim zgorevanjem, skoncentrirane, kar pomeni, da tako v cevi, kot na izstopu iz cevi velikokrat zelo presegajo mejne in dopustne vrednosti, kar je še posebej problematično, če je v bližini večje naselje.

Pozitivne lastnosti pri doseganju kvalitete zraka so izražene, če so predori primerno oblikovani in so pravilno prostorsko umeščeni, pri čemer predvsem v urbanem okolju prerazporedijo emisije iz prometa. Tako so novejši predori zgrajeni predvsem in samo z namenom disperzije koncentracij. Vsi cestni predori vsebujejo in prerazporejajo emisije iz prometa. Na zelo obremenjenih cestah, so vrednosti na grobo 5 do 10 krat višje za NO_x in CO in 2 do 3 krat višje za PM₁₀.

Različni predstavniki oblasti, organizacij in prebivalcev, nenehno opozarjajo na naraščanje problemov pri zagotavljanju kakovosti zraka pri dolgih predorih v urbanih področjih z zelo gostim prometom.

Nujno potreben je torej ustrezen prikaz vpliva na okolje v vseh okoliščinah, to pa se lahko zagotovi samo s stalnimi meritvami emisij škodljivih snovi.

8 ZAKLJUČKI

V nalogi so prikazane dejanske mesečne meritve ogljikovega monoksida (CO), izvedene v predoru Trojane. Podatki so za mesec marec, julij, oktober in december 2007.

Ugotovljeno je bilo, da mejna koncentracija CO = 100 ppm, ni bila presežena v nobenem mesecu, je pa v jesensko - zimskem času koncentracija CO večja. Ravno tako se koncentracija CO poveča v času jutranje in popoldanske prometne konice, v času pred prazniki in v času turistične sezone. Zaradi gostejšega prometa, se hitrosti v predoru znižajo, koncentracija pa se poveča. Vidljivost se v času gostejšega prometa zmanjša.

V nalogi so prikazane tudi mesečne meritve vetra v predoru Trojane. Podatki so za mesec marec, julij, oktober in december 2007. Pri večji hitrosti zraka se dim zaradi mešanja z zrakom hitreje ohlaja in manj dviga ter s tem poslabša vidljivost. Pri vzdolžnih prezračevalnih sistemih ob normalnem obratovanju hitrost zraka ne sme presegati 8 m/s. Za nadzor hitrosti zraka in kontrolo delovanja prezračevalnega sistema morajo biti v vsakem prezračevanem odseku nameščene merilne naprave. Ugotovljeno je bil, da je hitrost 8 m/s največkrat presežena v popoldanskem času, v času prometnih konic in tiste dneve, ko so bile vremenske spremembe izrazitejše.

Pridobljeni podatki kažejo tudi na to, da je v času močnejšega vetra v predoru manj CO, pri čemer je v predoru boljša vidljivost, v času šibkega vetra pa se koncentracija CO močno poveča, poslabša pa se vidljivost. Gre za vrednosti v času popoldanske konice.

S programom TUNEL in IDA, izračunamo koncentracije za CO, NO_x in izpušne pline na koncu predora Trojane in ugotovimo, da z naraščanjem deleža tovornih vozil, koncentracija CO pada, narašča pa koncentracija NO_x.

Velika prednost uporabe kriterialnega števila je, da potrebujemo le en graf za analiziranje okoliščin v predoru, slaba pa ta, da ne vidimo posameznih koncentracij. Največjo nevarnost predstavlja koncentracija dima. Koncentracija presega kritično vrednost pri deležu tovornih

vozil 20%, pri dolžini predora 2000 m, ostale vrednosti pa so pod dopustnimi vrednostmi. Kritična vrednost števila je 0,99, to pomeni, da je najmanj ena koncentracija nad dopustno mejo. Vse koncentracije so izračunane pri hitrosti vozil 60 km/h.

Če gostota prometa ne presega 750 vozil na uro in je hitrost prometa višja od 30 km/h, so koncentracije polutantov pod dopustno mejo za predore z dolžino do 3000 m. V tem primeru naklon ceste ni pomemben. Če gostota prometa presega 750 vozil na uro in je naklon ceste +4%, je omejitev naravnega prezračevanja že pri dolžini, manjši od 3000 metrov, vendar ne pod 2500 metrov. To pa seveda ne pomeni, da v primeru naravnega prezračevanja mehansko prezračevanje ni potrebno.

Če govorimo o predoru z dvosmernim prometom, potrebujemo pri isti dolžini 30 ventilatorjev z močjo približno 30 x 30 kW, oz. 21600 kWh na dan. Pokaže se prednost predorov z enosmernim prometom pred predori z dvosmernim prometom. Prihranek energije je očiten. V primeru požara je možnost rešitve skozi drugi predor, kjer mora biti dosežen nadtlak. Zato potrebujemo mehansko opremo.

S stališča varnosti, porabe energije in možnosti izhoda v sili, v primeru požara, je najboljša rešitev predor z enosmernim prometom. Redčenje koncentracij škodljivih ali nevarnih snovi na dopustne nivoje v predorih zahtevajo prezračevanje, ki je lahko zagotovljena z naravnimi sredstvi, z batnim efektom, povzročenim s prometom ali s strojno opremo. Naravno prezračevani in s prometom povzročeni sistemi, veljajo predvsem za relativno kratke predore, majhno gostoto prometa in za enosmeren promet. Dolgi in močno obremenjeni predori, ali predori z dvosmernim prometom naj bi imeli strojno (mehansko) prezračevanje.

Vsi motorji z notranjim zgorevanjem proizvajajo izpušne pline, ki vsebujejo strupene sestavine in dim. V prevoznih predorih so uporabniki izpostavljeni škodljivim snovem, količina le teh pa naj ne bi presegala dopustnega nivoja. Dopustni nivo za CO, NOx in koncentracije dima so definirane z matematičnimi metodami, ki določajo ustrezno stopnjo razredčene koncentracije škodljivih in nevarnih onesnaževalcev.

Količina delcev PM10 predstavlja 5-6% nacionalnih emisij, kot posledica uporabe dieselskih motorjev v gospodarskih vozilih. Manjši delci nastanejo pri zgorevanju, večji pa so posledica obrabe gum in obrabe vozišča. Količina delcev, ki nastanejo zaradi obrabe zavor, je skoraj zanemarljiva.

Z uporabo katalizatorjev pri vozilih na bencin, so se emisije NO_x-ov močno znižale. Kljub temu promet še vedno prispeva velik delež NO_x-ov v zrak. 70 % vseh NO_x-ov prispevajo dieselska vozila, pri čemer ima dieselski motor le 5 % vseh osebnih vozil. Z večanjem števila dieselskih osebnih vozil se bo emisija NO_x-ov samo povečevala. Podobno je tudi v ostalih zahodnoevropskih državah. Uvedba emisijskih standardov, kot sta Euro 4 in Euro 5, za težka gospodarska vozila (obvezna uvedba od 2006 do 2009 v Evropi), bo količinsko precej znižala emisije NO_x-ov.

Pomembna značilnost pri prezračevanju predorov so velike količine zraka, ki so potrebne za vzdrževanje koncentracij škodljivih snovi na dopustnem nivoju, pa tudi velike geometrijske dimenzije, ter medsebojna povezanost velikega števila posameznih parametrov, ki vplivajo na razmere v predoru. Glavni namen analize stanja v predoru je ugotavljanje največje dolžine, pri kateri koncentracija škodljivih snovi ne preseže dopustnih vrednosti, ne da bi pri tem porabljali dodatno energijo za prezračevanje. Razen tega pa ta spoznanja tudi koristno uporabljamo pri načrtovanju požarne varnosti.

Iz analize hitrosti, koncentracij škodljivih snovi, ter ostalih parametrov lahko ugotovimo, da zahteva analiza stanja v predoru vrsto podatkov in računskih postopkov. Dogajanja v predoru so odvisna od velikega števila parametrov, ki so povezani med seboj. Zato je primerno izdelati kriterialno število in računalniški program, s pomočjo katerega je možna analiza vseh parametrov, ki so pomembni za razmere v predoru. Ker pa obstajajo med njimi določene povezave, jih lahko povežemo tako, da dobimo polja posameznih veličin.

Izdelana je tudi splošena diferencialna enačba, s pomočjo katere je možno analizirati razmere v predoru, ne glede na način in smer prometnih tokov, nato pa jo je možno aplicirati za posamezne razmere. To pomeni generalizacijo izkustvenih in splošnih enačb za gibanje zraka, kriterialno število pa predstavlja izviren kriterij za univerzalno analizo stanja na koncu

predora, ker v sebi združuje vse, za analizo stanja relevantne parametre. Prikazani izračuni in njihove grafične interpretacije ter primerjave z znanimi metodami in izračuni kažejo, da so razvite enačbe in izdelan računalniški program primerna osnova za kontrolo hitrosti, s tem pa tudi za ugotavljanje možnosti naravnega prezračevanja. Pri manjši gostoti prometa in pri hitrosti vožnje nad 30 km/h so koncentracije škodljivih snovi do končne dolžine predora 3000 m pod dovoljenimi. Pri tem vzpon cestišča ni odločilen. Šele pri veliki gostoti prometa ($M_{\max} > 1000 \text{ h}^{-1}$) in pri močnih vzponih se meja naravnega prezračevanja pomakne nekoliko pod končno dolžino 3000 m. Vendar pa se s faktorjem, ki upošteva leto otvoritve predora, ta vrednost spet pomakne preko meje 3000 m.

Rezultati izračunov so preverjeni tudi eksperimentalno. Kljub nesimetričnemu hitrostnemu polju, ki nastaja v predorih z enosmernim prometom predvsem takrat, ko poteka promet samo po enem voznem pasu, lahko ugotovimo nad pričakovanji dobro skladnost med računskimi in eksperimentalnimi izsledki.

Kakovost zraka bi morala biti eden izmed mejnih pogojev pri načrtovanju cestnega omrežja in predorov. Emisije iz predorov vplivajo na kakovost zraka na relativno kratkih razdaljah od točke razprševanja na portalih. Vpliv emisij s cest zajema širše območje. Predori so torej del cestnega omrežja in jih preučujemo skupaj s cestami.

Pri določanju, kateri standardi za kakovost zraka so zahtevani, je potrebno ločiti med področji različne rabe. Na najbolj občutljivih delih tega spektra so občutljiva področja, ki so namenjene intenzivni rabi ljudi, medtem ko so za območja z manj intenzivno rabo ljudi nižji kriteriji za kakovost zraka še dopustni.

Zelo pogosto ceste in portali predorov predstavljajo izvor visokih lokalnih koncentracij, včasih nad dovoljenimi koncentracijami. Ta pojav je v različnih državah obravnavan različno.

Glede na izvor koncentracije, večje razdalje od cest ali predorov pomenijo boljšo kakovost zraka na bolj občutljivih območjih. Načrtovanje avtocestnega kroga izven mesta, z namenom vodenja prometa mimo centrov, pomeni boljšo kakovost zraka znotraj mesta.

Na drugi strani dobra asfaltna prevleka nove ali stare ceste pomeni boljšo kakovost zraka (manjše trenje, manj delcev v zraku, boljše odvodnjavanje, ipd.).

Razprševanje emisij s cest, iz predorov skozi portale in vertikalne jaške, mora biti raziskan v glede na meteorološke pogoje. Močan veter, ki povzroča močne turbulence, pomaga razpršiti polutante, razprševanje v območjih z visokimi zgradbami, gorami ali gozdovi pa je lahko zelo šibko.

Pri načrtovanju je odločilen izračun izpušnih emisij v predoru. Maksimalne pričakovane emisije na enoto časa, so pomembni vhodni podatki za načrtovanje prezračevalnega sistema v predoru.

Glavni vir onesnaženja zraka v alpskih dolinah predstavlja težji tovorni promet. Gibanje zračnih mas, obogatenih s škodljivimi snovmi, še dodatno otežujejo topografske značilnosti dolin, ki so v zimskem in nočnem času slabše prezračene, kot v poletnem času in podnevi.

Tudi hrupne obremenitve vplivajo na poslabšanje položaja zaradi refleksije zvoka na gorskih pobočjih. Visokogorske doline so veliko bolj občutljive kot ravninski predeli.

9 POVZETEK

Varnost in zdravje uporabnikov predorov je odvisna od koncentracije ogljikovega monoksida (CO), dušikovih oksidov (NO_x), dima in saj, različnih delcev (PM_x), policikličnih aromatskih ogljikovodikov (PAH), benzena (C₆H₆), žveplovega dioksida (SO₂), svinca (Pb), fotokemičnega smoga (ozon je komponenta).

Dušikovi oksidi imajo pomembno vlogo pri pojavih onesnaženosti zraka, kot so zakisljevanje, evtrofikacija in fotokemični smog. Glavni vir dušikovih oksidov v urbanih območjih je promet. Pomemben vpliv na količino dušikovih oksidov ima ozon.

Količine skupnih emisij nemetanskih hlapnih ogljikovodikov (NMVOC), so v Sloveniji izračunane po metodologiji CORINAIR.

Policiklični aromatični ogljikovodiki nastajajo zaradi nepopolnega zgorevanja organskih materialov. Pri vdihavanju se absorbirajo v pljučih, vendar se takoj prebavijo. Vdihovanje povzroča raka na pljučih, imunotoksičnost, genotoksičnost, rakotvornost. Nastajanje PAH in atmosfersko odlaganje na žita, sadje in zelenjavo ima za posledico, da je hrana glavni vir izpostavljanja človeka policikličnim aromatskim ogljikovodikom.

Benzen je brezbarvna tekočina. Največji vir emisij benzena v zraku so motorji z notranjim zgorevanjem, izgube zaradi izparevanja pri ravnanju, distribuciji, skladiščenju bencina.

Ozon je sekundarni polutant in ni emitiran direktno. Nastaja v atmosferi iz različnih predhodnih komponent: NO_x, fotokemično reaktivne organske sestavine, reaktivni ogljikovodiki, reaktivne organske spojine, nemetanski ogljikovodiki, ogljikovodiki in hlapljive organske snovi. Nadzor ozona zahteva strategije za nadzor predhodnih sestavin in mora prikazati posledice za dovzetnost zunanji izpostavljenosti ozonu. Glavna težava se kaže v zmanjševanju funkcije pljuč in poslabšanje bolezni pljuč do točke, ko začne naraščati smrtnost.

Del delcev, ki so navzoči v zraku, nastane kot posledica neposrednih emisij (primarni delci), drugi pa je posledica različnih procesov v atmosferi (sekundarni delci). Sestava delcev v okolju in v cestnih predorih je zelo različna, kot tudi njihov izvor. Poleg delcev, ki se v zrak izločijo z izpušnimi plini, obstajajo tudi delci, ki nastanejo pri obrabi vozišča, delci kremenca, delci avtomobilskih gum, delci zavor, kovinski delci spojev na vozilih, ipd.. Na osnovi emisije škodljivih delcev določimo ustrezno količino zraka, ki je potrebna za vzdrževanje dopustnih koncentracij.

Leteči delci nastanejo zaradi interakcije gume vozila in cestne površine, podobno nastanejo delci pri zaviranju vozil. Zavora so iz zelo različnih materialov, od kovin, mineralov, keramike do umetnih kompozitov. Veliko vozil je še vedno opremljeno z zavorami, ki vsebujejo azbest. Obraba zavor je bolj pomembna od obrabe gum.

Vrednosti ne smejo presegati s standardi določenih maksimalnih dovoljenih vrednosti. To dosežemo z ustrezno količino dovedenega svežega zraka, ki ga lahko dovajamo prisilno, s pomočjo ventilatorjev ali pa naravno, s pomočjo razlike tlakov med obema stranema hriba, ter deloma z gibanjem vozil. Zato gradimo predvsem predore z enosmernim prometom.

Predor nadomesti cesto ali nova cesta s predorom prevzame glavno prometa ostalih mest. To povečuje dvom kako upravičiti in pridobiti podporo za nove projekte, ki lokalno zelo onesnažujejo, v širši okolici pa precej manj, kot ceste.

Predori predstavljajo zelo majhen del cestnega omrežja, zato je njihova korist pri izboljševanju kvalitete okoliškega zraka omejena. Število zdravstvenih težav, ki so posledica onesnaževanja okolice z avtomobilskimi izpuhi, narašča. Ključ do uspeha je zmanjšanje onesnaževanja z avtomobilskimi izpuhi v okolici in v mestih. Pozitivne lastnosti predorov so dosežene, če so primerno oblikovani in pravilno prostorsko umeščeni, pri čemer predvsem v urbanem okolju prerazporejajo emisije iz prometa. Tako so novejši predori zgrajeni predvsem in samo z namenom disperzije koncentracij. Kritične mejne vrednosti za kakovost zraka v predorih, so definirane v predpisih PIARC, kakor tudi v navodilih za načrtovanje obratovanja in prezračevanja predorov. Na zelo obremenjenih odprtih cestah, so vrednosti na grobo 5 do 10 krat višje za NO_x in CO in 2 do 3 krat višje za PM_{10} .

V vseh cestnih predorih je prezračevanje potrebno zaradi odstranjevanja onesnaženih delcev, ki nastajajo kot proizvod motorjev vozil pri normalnem obratovanju. Prezračevanje je povzročeno z naravnimi pogoji, z gibanjem vozil, pri čemer gre za naraščanje tlaka v cevi, zato je pomembno izenačevanje tlakov, npr. z vmesnimi vertikalnimi jaški, pri čemer se učinek "batnega efekta" zmanjša. S tem se zmanjša tudi upor, pozitivna posledica pa je manjša poraba pogonskih goriv. Prezračevanje je povzročeno tudi z mehansko opremo. Način prezračevanja mora torej biti pravilno izbran, da lahko zagotovimo ustrezen nadzor nad različnimi plini.

S prezračevanjem v normalnih pogojih, redčimo koncentracijo koncentracije škodljivih snovi, v primeru požara pa nadzorujemo dim. Pri tem moramo upoštevati dolžino predora, njegov prerez in naklon, njegovo okolico, gostoto prometa, smer prometa (enosmerni, dvosmerni), sestava prometa, in investicijski stroški. Naravno prezračevanje zadošča pri kratkih predorih do dolžine 200 m pri dvosmernem prometu, oziroma do dolžine od 2000 do 2500 m pri enosmernem prometu. V ostalih primerih je potrebno prisilno prezračevanje. Pri enosmernem prometu poteka naravno prezračevanje s pomočjo razlike tlakov med obema stranema, oz. povzroča gibanje zraka. Pri načrtovanju je odločilen izračun izpušnih emisij v predoru. Maksimalne pričakovane emisije na enoto časa, so pomembni vhodni podatki za načrtovanje prezračevalnega sistema v predoru.

Pri pol prečnem prezračevanju vpihujemo svež zrak s pomočjo zračnega kanala, nameščenega po celotni dolžini predora. Ta sistem se uporablja za nekoliko daljše predore. Skozi predor se pojavlja relativno močan zračni tok.

Matematični model je izdelan kot originalno univerzalno orodje za analizo dogajanja v predoru. Z njim prikažemo medsebojne odvisnosti opazovanih parametrov na koncu predora. V jesensko - zimskem času je koncentracija CO večja. Ravno tako se koncentracija CO

poveča v času jutranje in popoldanske prometne konice, v času pred prazniki in v času turistične sezone. Zaradi gostejšega prometa, se hitrosti v predoru znižajo, koncentracija pa se poveča. Vidljivost se v času gostejšega prometa zmanjša. Pri večji hitrosti zraka se dim zaradi mešanja z zrakom hitreje ohlaja in manj dviga ter s tem poslabša vidnost. Pri vzdolžnih prezračevalnih sistemih ob normalnem obratovanju hitrost zraka ne sme presegati 8 m/s. Za nadzor hitrosti zraka in kontrolo delovanja prezračevalnega sistema morajo biti v vsakem prezračevanem odseku nameščene merilne naprave. Ugotovimo lahko, da je hitrost 8 m/s največkrat presežena v popoldanskem času, v času prometnih konic in tiste dneve, ko so bile vremenske spremembe izrazitejše. Opazimo lahko, da je v času močnejšega vetra v predoru manj CO, pri čemer je v predoru boljša vidljivost, v času šibkega vetra pa se koncentracija CO močno poveča, poslabša pa se vidljivost. Glavni vzrok velikim koncentracijam ogljikovega monoksida CO in hlapnih organskih snovi VOC, pa tudi koncentracij dušikovih oksidov NO_x, so nestacionarni pogoji zgorevanja in lokalne temperaturne razlike v zgorovalnem prostoru.

Na avtocestah so hitrosti vožnje višje, zato se velik del moči motorja porablja za premagovanje zračnega upora, ki narašča s kvadratom hitrosti, moč motorja, potrebna za njegovo premagovanje pa s tretjo potenco hitrosti. Zato se z večjo hitrostjo povečata poraba goriva in onesnaževanje. To je zelo izrazito pri ekstremnih hitrostih. V zadnjih letih so avtomobili na bencinski motor opremljeni s katalizatorji. Po prehodu izpušnih plinov skozi katalizator se koncentracija CO, VOC in NO_x zaradi med seboj povezanih reakcij oksidacije in redukcije močno zmanjša, vendar mora katalizator imeti ustrezno visoko temperaturo. Tega problema na avtocestah praktično ni. Koncentracija omenjenih snovi, pa tudi dimnih plinov, prihajajočih iz izpušnih cevi dieselskih motorjev, se redči po naravni poti, pri tem se okolje onesnažuje.

Kriterialno število je razmerje med količino zraka, ki vstopa v predor in skupno potrebno količino svežega zraka, za zagotavljanje še dopustnih koncentracij v predoru. Ima lahko različne vrednosti in različne pomene.

Nadzor nad emitiranim zrakom iz predora s tehniko razprševanja je daleč najbolj popularen. Velika večina vseh predorov na svetu se zanaša na razprševanje emisije skozi portale. Zato da bi zagotovili primerno kakovost zraka neposredno pred predori, bi bili verjetno potrebni izpusti preko vertikalnih jaškov. Pri načrtovanju predorov so uporabljena znana matematična orodja z namenom določevanja vpliva onesnaževanja in potrebnih izboljšav predora in/ali prezračevanja.

Razprševanje emisij s cest, iz predorov skozi portale in vertikalne jaške, mora biti raziskan glede na meteorološke pogoje. Močan veter, ki povzroča močne turbulence, pomaga razpršiti polutante, razprševanje v območjih z visokimi zgradbami, gorami ali gozdovi pa je lahko zelo šibko.

10 SUMMARY

Safety and health of tunnel users depends on concentration of carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_x), smokes and soot, different particles (PM_x), polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), benzenes (C₆H₆), sulphur dioxide (SO₂), lead (Pb), photochemical smog (ozone is component part).

Nitrogen oxides have important submission at phenomena of air pollution, sour, eutrofikation and photochemical reactions. Main source of nitrogen oxides in urban regions is traffic. Important impact on amount of nitrogen oxides has ozone.

In Slovenia amounts of common emissions of no methane volatile hydrocarbons (NMVOC) are calculated with methodology of CORINAIR.

Polycyclic aromatic hydrocarbons result because of incomplete combustion of organic materials. They are absorbed by inhalation in the lungs; however they are digested at once. Inhaling is causing cancers on lungs, immune toxic, gene toxic, cancriods. Occurring considers PAH and atmospheric disposal consequence per corns, fruit and vegetable, food is polycyclic aromatic hydrocarbons' main source of person emphasizing.

Benzene is colorless liquid. Engines with internal combustion are largest source of emissions of benzene in mid air, than losses because of evaporating at treatment, distributions and storage of petrol.

Ozone is secondary pollutant and is not emitted directly. It is occurred from different preliminary component parts in atmosphere: NO_x, photochemical jet organic ingredients, jet hydrocarbons, jet organic compounds, no methane hydrocarbons, hydrocarbons and volatile organic substances. Control of ozone demands strategies for control of preliminary ingredients, which must show consequences for susceptibility to outside exposure to ozone. Main problem is being showed in reducing of lungs function and aggravating of lungs disease to point, when mortality rate starts to increase.

Part of particles, which are present in the air, occurs as consequence of direct emissions (primary particles), other particles are consequence of different processes in atmosphere (secondary particles). Composition of particles in environment is very different in road tunnels, also their origin. Beside particles which come to air with exhaust gases, there are also particles that are occurred at wear out of highway, particles of flint, particles of tires, particles of brakes, metallic particles of junctions of vehicles, etc. Suitable amount of air is appointed on base of emission of harmful particles, that is needed to maintenance of admissible concentrations requires.

Flying particles occur because of interaction of vehicle rubber and road surface, particles at braking of vehicles occur similarly. Brakes are made from very different materials, metals, minerals, earthenware to artificial composites. Many vehicles are still equipped with brakes that contain asbestos. Wear out of brakes is more important since wear out of rubber.

Values may not surpass certain maximum values permitted with standards. We achieve this with suitable amount of driven fresh air that can be brought forced, with the help of fans or naturally, with the help of pressures difference between both sides of hill, and partly with movement driven. That is why we are building tunnels with one-way traffic.

Tunnel replaces road or new road with tunnel takes over main body of traffic of others towns. This increases doubt some to justify and to gain support for new projects that locally very pollute, in wider surroundings a lot less than roads.

Tunnels are presenting tiny part of road network, so their benefit at improving of quality of surrounding air is limited. Number of health problems, which are consequenced by pollution of surroundings with car exhausts, is increasing. Key to success is reduction of pollution with car exhausts near and in towns. Positive characteristics of tunnels are achieved, if they are formed properly and placed correctly spatially, where above all in urban environment dispose emissions from traffic. So tunnels are newer built above all and only with intention of dispersion of concentrations. Critical boundary values for quality of air in tunnels are defined of PIARC regulations, like in instructions for planning of operation and ventilations of tunnels. On very charged open roads, is value brutally 5 to 10 times higher for NO_x and CO and 2 to 3 times higher for PM_{10} .

Ventilation is needed to remove polluted particles from road tunnels that are occurred as product of engines over normal operation. Ventilation is caused from natural conditions, with movement of the vehicles, than the pressure in pipe is increasing. It is very important to equalize pressures, e.g. with intermediate vertical shafts, where the piston effect is reduced. Also the air resistance is reduced; positive consequence is smaller consumption of driving fuels. Ventilation is caused also with mechanical equipment. The way of ventilation must be chosen correctly, that we can ensure suitable control above different gases.

In normal conditions, the concentration of harmful substances is reduced with ventilation; in case of fire the smoke is supervised. The length of tunnels must be considered, section and inclination, surroundings, density of traffic, direction of traffic (one-way, two-way), composition of traffic and investment costs. Natural ventilation is enough for short tunnels with length of 200m for two-way traffic, or for length from 2000 to 2500m of one-way traffic. In other cases the forced ventilation is needed. Natural ventilation with the help of pressure difference between both sides goes on at one-way traffic, or causes movement of air. Calculation of exhaust emissions in tunnel is the most important over planning. Maximum expected emissions on unit of time are important entry data for planning of ventilation system in tunnel.

With the air channel the fresh air is blown over semi transverse ventilation, installed round entire length of tunnel. This system is being used for a bit longer tunnels. Relatively strong airflow occurs via tunnel.

Mathematical model is made as universally tool for analysis for happening in tunnel. It shows the mutual dependences of watched parameters at the end of tunnel are shown with it. In

autumnally - winter time is concentration of the CO larger. Concentration of CO increases in time of matutinally and afternoon rush hour, in time of holidays and in time of tourist season. Because of denser traffic, speeds in tunnel are reduced, concentration increases. Visibility reduces in time of denser traffic. Because of higher air speed and mixing it with, smoke becomes colder and is lifting less and visibility is bad. Longitudinal ventilation systems at normal operation speed of air may not surpass 8 m/sec. For speed control of air and control of activity of ventilation system measuring device must be installed in every aired section. We can find out that speed 8 m/sec is most often surpassed in afternoon time, in time of rush hours and those days, when weather changes more prominent. We can notice that less CO is in time of stronger wind in tunnel, visibility in tunnel is better, but when concentration of CO increases strongly in time of weak wind, visibility gets worse. Main cause to large concentrations of carbon monoxide CO and of volatile organic substances VOC, also concentrations of nitrogen oxides NO_x, is unstable conditions of combustion and local temperature difference in combustion place

On highways the speeds of ride are higher, that is why large share of strength of engine is being used up for defeating of air resistance, which is increasing with square of speed, strength of engine, is increasing with second potency of speed. That is why fuel consumption and pollution increase with higher speed. This is very prominent at extreme speeds. In last years cars on petrol engine are equipped with catalyts. When exhaust gases go through catalyts, concentration of CO, VOC and NO_x because of reactions of oxidation and reduction, reduce strongly, however catalyts must have suitably high temperature. This is, practically, no problem on highways. Concentration of mentioned substances, also of flue gases, coming from exhaust pipes of diesel engines, is reduced on natural way; environment is being polluted at this time.

Criteria number is relationship between amount of air, that is entering in the tunnel and commonly necessary amount fresh air, for assuring still admissible concentrations in tunnel. It can have different values and different meanings.

The most popular control above emitted air from tunnel is with technology of spraying. The majority of all tunnels in world is on spraying of emission through portals. That is why the suitable quality of air directly before tunnels would ensure, the ellipses through vertical shafts would be probably necessary. At planning of tunnels are used known mathematical tools with intention of choosing of pollution impact and necessary improvements of tunnel and/or of ventilation.

Spraying of emissions from roads, from tunnels through portals and vertical shafts, must be looked into in considering meteorological conditions. Strong wind helps to spray pollutants, with strong turbulences. Spraying in surroundings of high buildings, mountains or forests, is very weak.

11 VIRI IN LITERATURA

Uporabljeni viri

Agencija RS za okolje. 2007. Končane meritve delcev onesnaženosti zraka PM₁₀ v Sloveniji. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor: str. 1-2.

Miclea., P, Verma, A. 2003. Underground station layout and functional criteria. V: Current concepts and fire-life safety requirements. San Jose California, APTA Rail Transit Conference: str. 3-8.

DARS - OC Vransko. 2008, Flowsic 200 – naprava za merjenje hitrosti toka zraka. Reute Nemčija, SICK AG Umweltmesstechnik: str. 1-3.

DARS - OC Vransko. 2008, Vicotec 410 – naprava za opazovanje motnosti zraka v predorih. Reute Nemčija, SICK AG Umweltmesstechnik: str. 4-16, 13-14.

Dix, A., Huijben, H., Sandman, T., Sturm, P. 2006. A guide to optimising the air Quality impact upon the environment. V: Draft PIARC report. Version 2.6. Road Tunnels: str. 4-13, 17-22, 43-53, 55-68.

Evropska direktiva o minimalnih varnostnih zahtevah za predore v vseevropskem cestnem omrežju 2004/54/EC ES. 2004. Bruselj, EU: 23 str..

Faganelli, J. 1999. Osnove varstva okolja. Izbrana poglavja predavanj univerzitetnega študija tehnologije prometa. Portorož, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za promet in pomorstvo: 122 str..

Lenz, H.P., Pischinger, R.. 2000. Beeinflussungsmoeglichkeiten des motorisirten Starssenverkehrs auf die CO₂ Emissionen. Graz, Wien, Technische Univerzitaet Graz:, Technische Univerzitaet Wien: str. 1-13, 16-20.

Leonidas, N. 2003. Road vehicle tyre & brake wear, & road surface wear, Activities 070700-070800. Thessaloniki Greece, Aristotle University Thessaloniki, Lab of Applied Thermodynamics: 25 str..

Čiščenje izpuha brez ali z dodatkom. 2006. Št. 5/31, maj & junij. Ljubljana, Revija Mehanik in voznik: str. 22-23.

Modic, J. 2003. Air velocity and concentration of noxious substances in a naturally ventilated tunnel. Tunneling and underground space technology, Sciencedirect. [Print. ed.], Letn. 18, št. 4: str. 405-410.

Modic, J. 2003. Carbon monoxide and COHb concentration in blood in various circumstances. Energy and building, Sciencedirect. [Print. ed.]. Letn. 35, št. 9: str. 903-907

Modic, J. 2004. Obratovanje cestnih predorov s poudarkom na požarni varnosti. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo: 44 str..

MOP – ARSO. 2004. Količine skupne emisije žveplovega dioksida (SO₂) v Sloveniji, izračunane po metodologiji CORINAIR. Kazalci okolja 2003. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor.

MOP – ARSO. 2006. Kazalci okolja 2005. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor: str. 95-103, 183-205.

MOP – ARSO. 2006. Količine skupne emisije dušikovih oksidov (NO_x) so v Sloveniji izračunane po metodologiji CORINAIR. Kazalci okolja 2005. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor.

MOP – ARSO. 2006. Količine skupnih emisij nemetanskih hlapnih ogljikovodikov (NMVOC), izračunane po metodologiji CORINAIR. Kazalci okolja 2005. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor.

Road Association PIARC. 2004. Natural ventilation, Road Tunnels Operation (C5). V: Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation, Road Tunnels. Paris France, PIARC: str. 31-39.

Planinšek, A, Rode, B. 1995. Ocena ARSO o koncentraciji onesnaženosti zraka zaradi prometa na izhodih predorov na trasi avtocestnega odseka Vransko - Blagovica. Ljubljana, MOP Hidrometeorološki zavod RS: str. 1-6.

Planinšek, A. 1999. Mnenje o vplivu emisij zaradi prometa iz predora Dekani na AC Klanec - Srmin na okolico. Ljubljana, MOP – Hidrometeorološki zavod RS: str. 1-2.

Rakovec, J. 1978. Onesnaženje zraka od linijskega vira, dvo in trodimenzionalni pristop. Razprave - Papers, letnik 22, št. 1. Ljubljana, Društvo meteorologov Slovenije: str. 5-9.

Uradni list Republike Slovenije. 2006. Uredba o tehničnih normativih in pogojih za projektiranje cestnih predorov v Republiki Sloveniji, 48/06. Ljubljana, Uradni list RS, str. 5216 – 5218.

Zakonodaja

Evropska direktiva o minimalnih varnostnih zahtevah za predore v vseevropskem cestnem omrežju
2004/54/EC ES,

Pravilnik o monitoringu kakovosti zunanjega zraka
UL RS, št. 36/07,

Uredba o mejnih, opozorilnih in kritičnih imisijskih koncentracijah škodljivih snovi v zraku
UL RS, št. 73/94, 51/98, 46/00

Uredba o tehničnih normativih in pogojih za projektiranje cestnih predorov v Republiki Sloveniji
UL RS, št. 48/06

Uredba o ukrepih za ohranjanje in izboljšanje onesnaženosti zunanjega zraka
UL RS, št. 52/02 (krovna uredba)

Uredba o žveplovem dioksidu, dušikovih oksidih, delcih in svincu v zunanjem zraku

UL RS, št. 52/02 (uredba A)

Uredba o benzenu in ogljikovem monoksidu v zunanjem zraku

UL RS, št. 52/02 (uredba B)

Uredba o ozonu v zunanjem zraku

UL RS, št. 8/03 (uredba C)

Sklep o določitvi območij in stopnji onesnaženosti zaradi žveplovega dioksida, dušikovih oksidov, delcev, svinca, benzena, ogljikovega monoksida in ozona v zunanjem zraku

UL RS, št. 72/03

Zakon o javnih cestah UL RS, št. 33/06

Zakon o graditvi objektov ZGO – 1- UPB, UL RS, št. 102/04, 126/07

Zakon o urejanju prostora ZUreP, UL RS, št. 110/02

Zakon o varstvu okolja ZVO-1-UPB1, UL RS, št. 39/2006

Ostali viri

A review of emission treatment technologies, systems & applications. 2004. Road tunnel applications, child & associates. Report: str. 15-21, 23-25.

Analiza hrupa in emisije škodljivih snovi na gotthardski prometni osi. 2002. Der Tages Anzeiger. Gesellschaft für ökologische Forschung e.V.: 1 str..

Modic, J. 2002. Študija prezračevanja in požarne varnosti cestnega predora Sozina, projekt prezračevanja in protipožarnih ukrepov Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo: 30f.

IDA Road Tunnel Ventilation and Fire Simulation Software. 2000. Elektronski vir. Stockholm Sweden, Equa: Cobiss.si-id 3894911.

Kraut, B. 2002. Strojniški priročnik. Trinajsta slovenska izdaja, predelana, 2. natis. Ljubljana, Littera picta: 817 str.

Lukan, B. 2006. Kakovost zunanjega zraka zaradi prometa. 8. slovenski kongres o cestah in prometu, Portorož 25. - 27. oktober. Zbornik referatov. Ljubljana-Portorož, DRC: str. 20-28.

Lynx d.o.o.. 2006. Poraba naftnih proizvodov v letu 2007. Ljubljana, www.energetika.net.

Medved, S. 2004. Obnovljivi viri energije. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo.

Pucher, K. 2000. Sicherheit in Tunnelanlagen – Feuer im Mont Blanc und Tauern Tunnel. Ljubljana, UJMA: str. 209-214.

Klima Celje d.d.. 2004. Oprema predorov Dekani in Kastelec. Celje, <http://www.klima-celje.si/slo/aktualno6.htm>