

# Proračun koncentracije eksplozivnih plinova u kanalizacijskom tunelu *Stupe*

Davor Bojanić

## Ključne riječi

kanalizacija,  
eksplozivni plinovi,  
metan,  
sumporovodik,  
umjetna ventilacija,  
prirodna ventilacija

## Key words

sewerage,  
explosive fumes,  
methane,  
hydrogen sulfide,  
artificial ventilation,  
natural ventilation

## Mots clés

égouts,  
gaz explosifs,  
méthane,  
hydrogène sulfuré,  
ventilation artificielle,  
ventilation naturelle

## Ключевые слова

канализация,  
взрывчатые газы,  
метан,  
сероводород,  
искусственная  
вентиляция,  
природная вентиляция

## Schlüsselworte

Abwasserleitung,  
explosive Gase,  
Metan,  
Schwefelwasserstoff,  
künstliche Ventilation,  
natürliche Ventilation

D. Bojanić

Izvorni znanstveni rad

## Proračun koncentracija eksplozivnih plinova u kanalizacijskom tunelu *Stupe*

Prikazani su rezultati matematičkog modeliranja strujanja zraka i sadržaja eksplozivnih plinova u hidrotehničkom kanalizacijskom tunelu *Stupe* u Splitu. Modeliranje je provedeno radi procjene ugroženosti tunela od eksplozivnih i zapaljivih plinova. Prikazani su rezultati proračuna stacionarnog strujanja pri radu ventilatora te prirodnoj ventilaciji. Istaknuto je da se na temelju provedenih istraživanja i analiza može zaključiti da nema opasnosti od pojave plinova u tunelu.

D. Bojanić

Original scientific paper

## Calculating concentration of explosive fumes in the *Stupe* sewerage tunnel

Results obtained by mathematical modeling of the air flow and content of explosive fumes in the *Stupe* sewerage tunnel in Split, are presented. The modeling was performed in order to estimate exposure of this tunnel to the action of explosive and inflammable gases. Stationary flow calculation results, obtained during fan-assisted ventilation and during natural ventilation, are presented. It is emphasized that the modeling and analyses conducted in this research show that there is no gas hazard in this sewerage tunnel.

D. Bojanić

Ouvrage scientifique original

## Calcul de la concentration des gaz explosifs dans le tunnel de *Stupe*

Les résultats de la modélisation mathématique du passage d'air et du contenu des gaz explosifs dans le tunnel d'évacuation des eaux usées de *Stupe* à Split, sont présentés. La modélisation a été faite afin d'estimer la possibilité de présence des gaz explosifs et inflammables dans ce tunnel. Les résultats de calcul d'écoulement stationnaire, au cours d'opération de ventilateur et au cours de la ventilation naturelle, sont présentés. Il est souligné que les recherches et les analyses faites au cours de cette modélisation permettent de conclure qu'il n'y a aucun danger de la présence des gaz dans le tunnel hydraulique.

Д. Боянич

Оригинальная научная работа

## Расчёт концентраций взрывчатых газов в канализационном туннеле *Ступэ*

В работе показаны результаты математического моделирования течения воздуха и содержания взрывчатых газов в гидротехническом канализационном туннеле *Ступэ* в Сплите. Моделирование проведено ради оценки опасности туннеля от взрывчатых и воспламеняемых газов. Показаны результаты расчёта стационарного течения при работе вентиляторов, а также при природном вентилировании. Подчёркнуто, что на основании проведённых исследований и анализов можно заключить, что нет опасности от появления газов в туннеле.

D. Bojanić

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

## Berechnung der Konzentration von explosiven Gasen im Abwassertunnel *Stupe*

Dargestellt sind die Ergebnisse der mathematischen Modellierung der Luftströmung und des Inhalts von explosiven Gasen im hydrotechnischen Abwassertunnel *Stupe* in Split. Die Modellierung wurde durchgeführt zwecks der Abschätzung der Gefährdung des Tunnels durch die explosiven und entzündbaren Gase. Dargestellt sind die Berechnungsergebnisse für die stationäre Strömung während dem Einsatz des Ventilators und bei natürlicher Ventilation. Es wird hervorgehoben dass man auf Grund der durchgeführten Forschungen und Analysen schliessen kann dass im Hinblick auf das Vorkommen von explosiven Gasen im Tunnel keine Gefahr besteht.

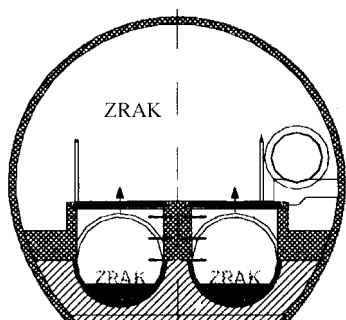
Autor: Mr. sc. Davor Bojanić, dipl. ing. grad., Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Matice hrvatske 15, Split

## 1 Uvod

Određivanje maksimalnih koncentracija eksplozivnih plinova u kanalizacijskim cijevima i hidrotehničkim kanalizacijskim objektima, predstavlja značajan problem projektantima kanalizacijskih sustava u praksi. Nakon nekoliko slučajeva eksplozija plinova u kanalizacijskim cijevima problematika proračuna sadržaja eksplozivnih plinova u kanalizacijskim sustavima, postala je veoma važna.

U slučaju nepoznavanja realnih vrijednosti koncentracija zapaljivih i eksplozivnih plinova, često se pribjegava ocjeni da je moguća pojava eksplozivne atmosfere, što za sobom povlači posebnu, protueksplozivnu (S) izvedbu elektrostrojarske opreme, čime se značajno povećava vrijednost investicije.

U ovome radu opisani su rezultati proračuna koncentracija eksplozivnih plinova u kanalizacijskom tunelu *Stupe*. Proračun se temelji na rezultatima istražnih radova provedenih na nekoliko lokacija postojećega kanalizacijskog sustava grada Splita, literaturnim podacima, Glavnom projektu hidrotehničkog tunela *Stupe* (slika 1.) i izvedbenom projektu ventilacije tunela. Tijekom istražnih radova ispitivao se sadržaj amonijaka, sulfata, sulfida, klorida, kisika i totalnoga organskog ugljika u otpadnoj kanalizacijskoj vodi.



Slika 1. Poprečni presjek tunela i cijevi

Osnovni cilj matematičkog modeliranja bio je odrediti maksimalne koncentracije eksplozivnih plinova u zraku u slobodnom profilu tunela i u cijevima iznad površine vode, u različitim uvjetima eksploatacije.

Da bi se moglo provesti matematičko modeliranje, bilo je potrebno sljedeće:

- Odrediti ukupne količine sumpora u otpadnoj vodi, koji će, ako se sav veže u sumporovodik, stvoriti određenu maksimalnu količinu sumporovodika u nekom vremenskom razdoblju.
- Mjerenjem ukupne količine organskog ugljika izračunati maksimalnu količinu metana, uz pretpostavku da se sav organski ugljik veže u metan, u određenom vremenskom razdoblju.

- Mjerenjem koncentracije amonijaka u otpadnoj kanalizacijskoj vodi i usporedbom te koncentracije sa topivosti amonijaka u vodi odrediti količinu amonijaka koji se može izlučiti iz vode.
- Mjerenjem koncentracije otopljenog kisika u otpadnoj kanalizacijskoj vodi procijeniti stupanj aktivnosti bakterija koje stvaraju metan i sumporovodik.

## 2 Analiza rezultata istražnih radova

Od svih mjerenja na nekoliko lokacija postojećega kanalizacijskog sustava Splita, odabrani su najnepovoljniji rezultati sadržaja amonijaka, sulfata, sulfida, klorida, kisika i totalnoga organskog ugljika.

- *Sulfati*: Najveća je koncentracija sulfata 109 mg/l na poziciji Pothodnik (kolektor koji prikuplja otpadne vode velikog dijela Splita). Koncentracija sumporovodika koji se može izdvojiti iz otpadne kanalizacijske vode:

$$c_{H_2S} = c_{SO_4} \cdot \frac{\text{molekularna masa } H_2S}{\text{molekularna masa } SO_4} = 109 \cdot \frac{18}{80} = 24.525 \text{ mg/l}$$

- *Amonijak*: Maksimalna koncentracija amonijaka izmjerena je na postaji Katalinića brig i iznosi 43,2 mg/l. Topivost amonijaka u vodi jest 531 mg/l. Amonijak se neće izlučivati iz vode jer je topivost amonijaka u vodi mnogo veća od izmjerene koncentracije.
- *Metan*: Maksimalna koncentracija totalnoga organskog ugljika (TOC) izmjerena na poziciji Pothodnik bila je od 190,9 mg/l. Koncentracija metana koji se može izdvojiti iz otpadne kanalizacijske vode jest:

$$c_{CH_4} = TOC \cdot \frac{\text{molekularna masa } CH_4}{\text{atomska masa C}} = 190.9 \cdot \frac{16}{12} = 254.5 \text{ mg/l}$$

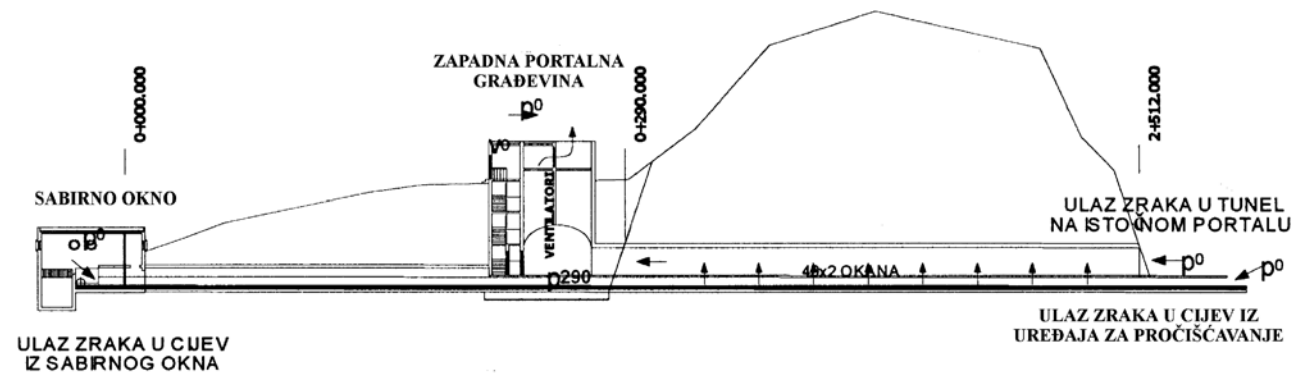
*Kisik*: Mjerenje koncentracije otopljenog kisika u otpadnoj kanalizacijskoj vodi izvršeno je 12. travnja 2001. na dvije lokacije - Katalinića brig i Pothodnik, Izmjerene su koncentracije 5,1 mg/l i 6,37 mg/l.

- *BPK5*: Na poziciji Katalinića brig, kao mjerodavnoj postaji (srednji je protok oko 900 l/s), tijekom 2000. izmjerena najveća vrijednost za petodnevnu biološku potrošnju kisika (BPK5) bila je 173,4 mg/l.

## 3 Opis matematičkog modela

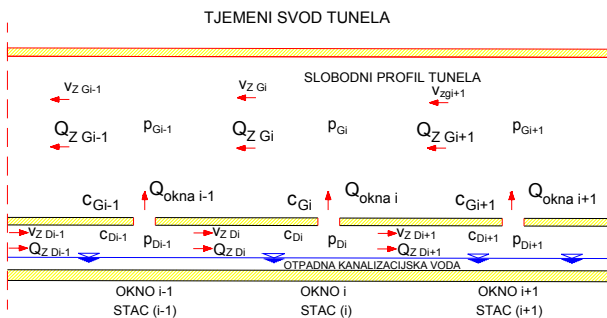
Na slici 2. shematski je prikazan uzdužni profil od sabirnog okna do izlaznog portala tunela *Stupe*, odnosno do početka uređaja za pročišćavanje.

Na slici 3. shematski su prikazani hidraulički elementi zračnog toka oko okna *i* na kanalizacijskim cijevima.



Slika 2. Shematski uzdužni presjek

Nepoznate su vrijednosti tlakova u tunelu i u zračnom prostoru iznad površine vode u cijevima. Rješenjem sustava jednadžbi dobiveni se tlakovi u sustavu, iz kojih su izračunane brzine strujanja zraka u slobodnom profilu tunela i u zračnom prostoru iznad površine vode u cijevima, po svim dionicama između pojedinih okana u tunelu i u cijevima.



Slika 3. Hidraulički elementi oko okna i

Osnovne su pretpostavke matematičkog modela:

- koncentracije plinova metana i sumporovodika su male, pa se računa samo osnovni tok zraka u cijevima i u slobodnom profilu tunela,
- otpori strujanja zraka računaju se prema Moodyjev dijagramu s tim da je apsolutna hrapavost u cijevima 1 mm, a u profilu tunela 15 mm (stijanka tunela je od mlaznog betona),
- vrijeme potrebno za dovršenje procesa stvaranja metana određeno je prema (1). Uobičajeno je vrijeme truljenja u tankovima za skupljanje metana (potpuno anaerobni uvjeti) 30 dana na temperaturi od 27°C, a 120 dana na temperaturi od 8°C. S obzirom na to da je tijekom 2000., na postaji Katalinića brig izmjerena maksimalna temperatura od 22,8°C, usvojeno je vrijeme od 30 dana za potpuno stvaranje metana u anaerobnim uvjetima,
- vrijeme potrebno za dovršenje procesa stvaranja sumporovodika određeno je prema iskustvu (prof. dr. sc. Stanislav Tedeschi - revident kanalizacijskog sustava u projektu: *Glavni projekt kanalizacijskog*

*sustava Split-Solin*) u trajanju od 5 dana u anaerobnim uvjetima,

- u sabirnom oknu skupljaju se otpadne vode iz tri smjera (dva gravitacijska kanala i jedan tlačni cjevovod). Na mjestu spajanja tih triju tokava dolazi do izrazitog miješanja otpadnih voda sa zrakom u slapištu, čime se otpadna voda ozračuje, prema provedenim terenskim ispitivanjima postojećega kanalizacijskog sustava Splita, s najmanje 6 mg/l otopljenog kisika,
- u aerobnim uvjetima nema stvaranja sumporovodika i metana jer kisik otopljen u vodi uništava bakterije koje proizvode sumporovodik i metan. Ispitivanjima na postojećem kanalizacijskom sustavu ustanovljena je koncentracija otopljenog kisika od 5,1 do 6,37 mg/l. Usvaja se da koncentracija otopljenog kisika od 6 mg/l onemogućava proces stvaranja plinova sumporovodika i metana, a da je intenzitet stvaranja tih plinova maksimalan pri koncentraciji otopljenog kisika od 0 mg/l. Pri koncentracijama otopljenog kisika između ovih dviju vrijednosti, intenzitet je linearno proporcionalan deficitu otopljenog kisika u odnosu prema koncentraciji od 6 mg/l,
- srednji sušni protok u tunelu jest 0,313 m<sup>3</sup>/s. Normalna je dubina 0,269 m, a normalna brzina 0,823 m/s. Vrijeme putovanja otpadne vode od sabirnog okna do uređaja za pročišćavanje (kraj tunela *Stupe*) je 3439 sekundi,
- potrošnja kisika iz vode proporcionalna je vremenu putovanja otpadne vode od sabirnog okna do pozicije na kojoj se računa produkcija plinova iz vode. Za vrijeme putovanja otpadne vode od sabirnog okna do uređaja za pročišćavanje (L = 2830 m, T = 3439 s), potrošnja kisika jest:

$$\frac{BPK5 \cdot T}{3600 \cdot 24 \cdot 5} = \frac{173.4 \cdot 3439}{3600 \cdot 24 \cdot 5} = 1.3804 \text{ mg/l},$$

- masa otpadne kanalizacijske vode u jednoj cijevi iznosi:  $M = 2830 \cdot 0.1895 \cdot 1000 = 536285 \text{ kg}$ .

- produkcija sumporovodika u jednoj cijevi po m<sup>3</sup> u anaerobnim uvjetima iznosi (uz teoretsku pretpostavku da se sav sumpor veže u sumporovodik) jest:

$$C_{1H_2S} = \frac{536825(kg) \cdot 24.525(mg/kg)}{2830(m^3) \cdot 3600(s) \cdot 24(h) \cdot 5(dani)} = 0.0108 \text{ mg / s / m}^3,$$

- produkcija metana u jednoj cijevi po m<sup>3</sup> u anaerobnim uvjetima (uz teoretsku pretpostavku da se sav organski ugljik veže u metan) iznosi:

$$C_{1CH_4} = \frac{536825(kg) \cdot 254.5(mg/kg)}{2830(m^3) \cdot 3600(s) \cdot 24(h) \cdot 30(dani)} = 0.01861 \text{ mg / s / m}^3,$$

- pretpostavlja se da kroz slobodni profil cijevi iznad površine vode iz sabirnog okna *i* iz uređaja za pročišćavanje ulazi čisti zrak. Čisti zrak također ulazi i kroz ulazna rešetkasta vrata na istočnoj strani tunela.

Jednadžba strujanja zraka u cijevi između profila *i-1* i *i* (slika 3.) jest:

$$p_{Di} = p_{Di-1} - \lambda_{Di-1,i} \cdot \frac{l_{i-1,i}}{4 \cdot RD} \cdot \frac{v_{ZDi}^2}{2} \cdot \rho_Z,$$

gdje je:

$\lambda_{Di-1,i}$  - koeficijent trenja zraka u cijevi između profila *i-1* i *i*, prema Moodyjevu dijagramu,

$l_{i-1,i}$  - dužina dionice od okna *i-1* do okna *i* =  $stac(i) - stac(i-1)$

$v_{ZDi}$  - brzina strujanja zraka u cijevi između profila *i-1* i *i*,

$RD$  - hidraulički radijus zraka u cijevi iznad površine vode,

$\rho_Z$  - gustoća zraka = 1,2 kg/m<sup>3</sup>.

$p_{Di}$  - tlak zraka u cijevi iznad površine vode na oknu *i*.

Koncentracija metana u zraku u cijevi kod okna *i* iznosi:

$$c_{DiCH_4} = c_{Di-1CH_4} + \frac{m_{i-1,iCH_4}}{Q_{ZDi}} = c_{Di-1CH_4} + C_{1CH_4} \cdot \frac{l_{i-1,i}}{v_{ZDi} \cdot A_{ZD}} \cdot \frac{1.3804}{6.0} \cdot \left( \frac{stac(i)}{2830} + \frac{stac(i-1)}{2830} \right) \cdot \frac{1}{2},$$

gdje je:

$c_{DiCH_4}$  - koncentracija metana u zraku u cijevi u oknu *i*,

$m_{i-1,iCH_4}$  - produkcija mase metana od okna *i-1* do okna *i*,

$A_{ZD}$  - površina presjeka zraka iznad površine vode u jednoj cijevi = 0,9415 m<sup>2</sup>,

Koncentracija sumporovodika u zraku u cijevi kod okna *i* jest:

$$c_{DiH_2S} = c_{Di-1H_2S} + \frac{m_{i-1,iH_2S}}{Q_{ZDi}} = c_{Di-1H_2S} + C_{1H_2S} \cdot \frac{l_{i-1,i}}{v_{ZDi} \cdot A_{ZD}} \cdot \frac{1.3804}{6.0} \cdot \left( \frac{stac(i)}{2830} + \frac{stac(i-1)}{2830} \right) \cdot \frac{1}{2},$$

gdje je:

$c_{DiH_2S}$  - koncentracija sumporovodika u zraku u cijevi u oknu *i*,

$m_{i-1,iH_2S}$  - produkcija mase sumporovodika od okna *i-1* do okna *i*.

Jednadžba strujanja zraka u slobodnom profilu tunela između profila *i+1* i *i* jest:

$$p_{Gi} = p_{Gi+1} - \lambda_{Gi+1,i} \cdot \frac{l_{i+1,i}}{4 \cdot RG} \cdot \frac{v_{ZGi+1}^2}{2} \cdot \rho_Z - 0.05 \cdot \frac{v_{ZGi}^2}{2} \cdot \rho_Z$$

gdje je:

$\lambda_{Gi+1,i}$  - koeficijent trenja zraka u slobodnom profilu tunela između profila *i+1* i *i*,

$v_{ZGi}$  - brzina strujanja zraka u slobodnom profilu tunela između profila *i-1* i *i*,

$RG$  - hidraulički radijus zraka u slobodnom profilu tunela,

$p_{Gi}$  - tlak zraka u slobodnom profilu tunela na oknu *i*,

zadnji član u jednadžbi je gubitak energije zbog bočnog dotoka iz kanalizacijskih cijevi kroz okna.

Protok zraka u slobodnom je profilu tunela između profila *i-1* i *i*:

$$Q_{ZGi} = Q_{ZGi+1} + 2 \cdot Q_{OKNA i} \\ Q_{OKNA i} = N_{OTV} \cdot D_{OTV}^2 \cdot \pi/4 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_{Di} - p_{Gi})}{\rho_Z}} \cdot \varepsilon,$$

gdje je:

$N_{OTV}$  - broj otvora na svakom oknu,

$D_{OTV}$  - promjer otvora na oknima,

$\varepsilon$  - koeficijent kontrakcije mlaza zraka = 0,6.

Koncentracija metana u zraku u slobodnom profilu tunela kod okna *i* jest:

$$c_{GiCH_4} = \frac{c_{Gi+1CH_4} \cdot Q_{ZGi+1} + 2 \cdot Q_{OKNA i} \cdot c_{DiCH_4}}{Q_{ZGi}},$$

gdje je:

$c_{Gi+1CH_4}$  - koncentracija metana u zraku u tunelu uzvodno od okna  $i$ ,

$c_{GiCH_4}$  - koncentracija metana u zraku u tunelu nizvodno od okna  $i$ ,

Koncentracija sumporovodika u zraku u tunelu kod okna  $i$  jest:

$$c_{GiH_2S} = \frac{c_{Gi+1H_2S} \cdot Q_{ZGi+1} + 2 \cdot Q_{OKNAi} \cdot c_{DiH_2S}}{Q_{ZGi}},$$

gdje je:

$c_{Gi+1H_2S}$  - koncentracija sumporovodika u zraku u tunelu uzvodno od okna  $i$ ,

$c_{GiH_2S}$  - koncentracija sumporovodika u zraku u tunelu nizvodno od okna  $i$ .

Rubni su uvjeti sljedeći:

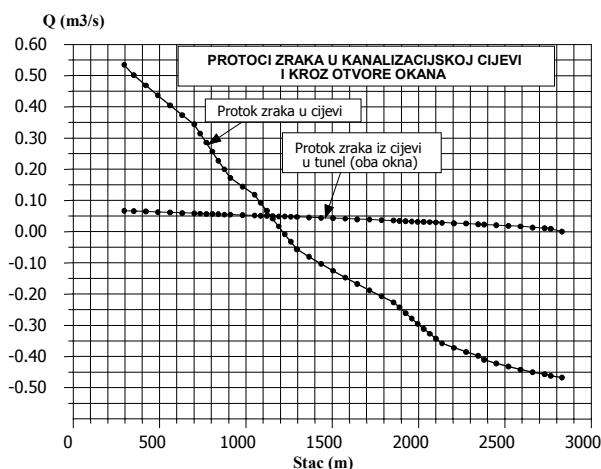
- Tlak zraka ispod ventilatora ( $p_{290}$ ) u zapadnoj portalnoj građevini određuje se prema izvedbenom projektu ventilacije. Taj tlak ( $p_{290}$ ) je manji od atmosferskog 17,8% u odnosu prema ukupnim gubicima energije od istočnog ulaza u tunel do izlaza na zapadnoj portalnoj građevini. Za veličinu gubitka energije na strujanje kroz ventilator, kada ventilatori ne rade, procijenjena je vrijednost od 2 brzinske visine na profilu ventilatora, tj. na mjestu prolaza zraka kroz sam ventilator.
- Tlak zraka na istočnom je ulazu u tunel atmosferski, osim u slučaju puhanja juga kada se stvara dinamički nadtlak.
- Tlak zraka na ulazu u cijev u sabirnom oknu kao i na izlazu iz cijevi kod uređaja za pročišćavanje je atmosferski.
- Kod prirodne je ventilacije tlak zraka na vrhu zapadne portalne građevine za jednu brzinsku visinu manji od atmosferskog.
- Zrak je čist na ulazu u cijevi u sabirnom oknu i na istočnom ulazu u tunel, tj. koncentracije svih plinova na tim lokacijama su nula.

## 4 Rezultati modeliranja

### 4.1 Rad dva ventilatora

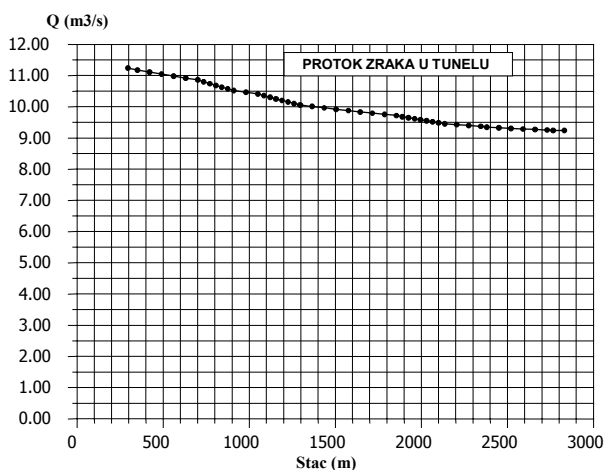
Predviđena je ugradnja dvaju ventilatora snage po 2,5 kW, u posebnoj prostoriji zapadne portalne građevine. Ventilatori su usisni, s mogućnošću kontinuirane promjene broja okretaja. Na slikama 4. do 8. prikazani su rezultati modeliranja istodobnog rada dvaju ventilatora.

Kroz svaku kanalizijsku cijev u sabirnom oknu ulazi po 540 l/s, a s istočne strane po 460 l/s zraka, odnosno ukupno oko 2 m<sup>3</sup>/s na obje strane i na obje cijevi (slika 4.).



Slika 4. Protoci zraka u kanalizijskoj cijevi i kroz otvore okana

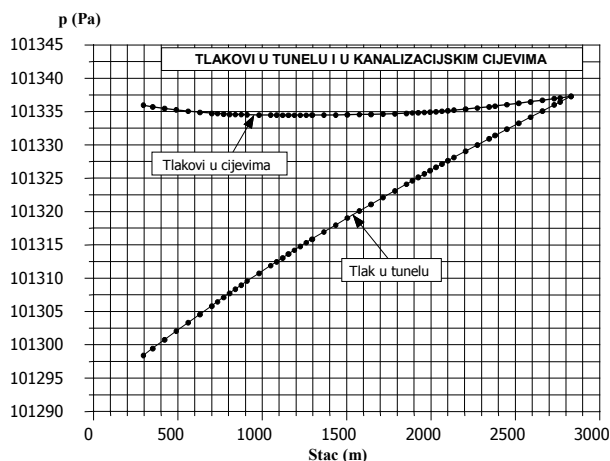
Slika 5. prikazuje protok zraka u tunelu na svakom pojedinom oknu. U tunelu ima ukupno 49 okana na svakoj cijevi. Svako okno ima 10 ventilacijskih otvora promjera po 3 cm. Povećanje protoka zraka u slobodnom profilu tunela od istočnog portala prema zapadnoj strani posljedica je dotoka zraka kroz otvore na kanalizijskim cijevima. Na istočnom je portalu protok zraka oko 9,2 m<sup>3</sup>/s i postupno se povećava duž tunela na otprilike 11,2 m<sup>3</sup>/s na zapadnoj portalnoj građevini. Za potpunu izmjenu zraka u tunelu potrebno je 0,57 sati.



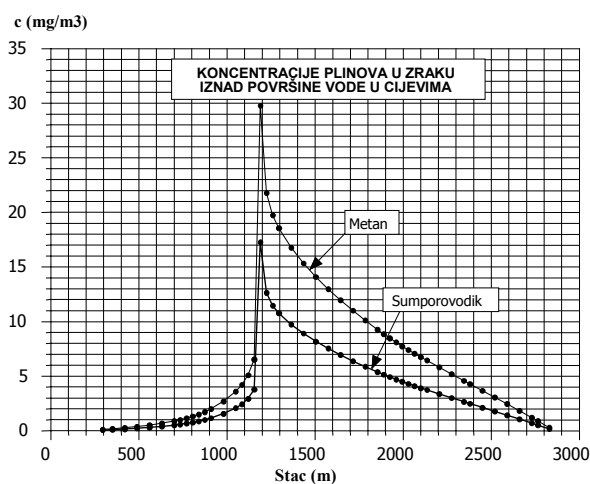
Slika 5. Protok zraka u tunelu

Tlak zraka u cijevima veći je nego u tunelu pa se javlja istjecanje zraka iz cijevi u tunel kroz otvore na oknima (slika 6.).

Najveće je koncentracije metana i sumporovodika u zraku u cijevima duž tunela (slika 7.) postižu se na stac. 1+200.00, i to od 30 mg/m<sup>3</sup> (metan) i 17 mg/m<sup>3</sup> (sumporovodik).

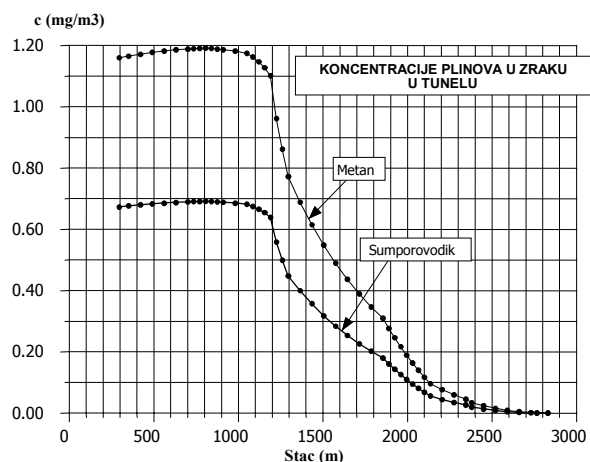


Slika 6. Tlakovi u tunelu u kanalizacionjskim cijevima



Slika 7. Koncentracije plinova u zraku iznad površine vode u cijevima

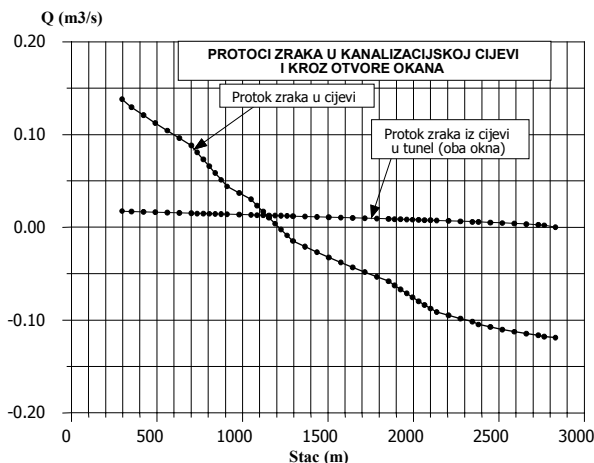
Najveća koncentracija metana i sumporovodika u zraku u slobodnom profilu tunela iznosi oko 1,2 mg/m<sup>3</sup> za metan, odnosno 0,7 mg/m<sup>3</sup> za sumporovodik (slika 8.).



Slika 8. Koncentracije plinova u zraku u tunelu

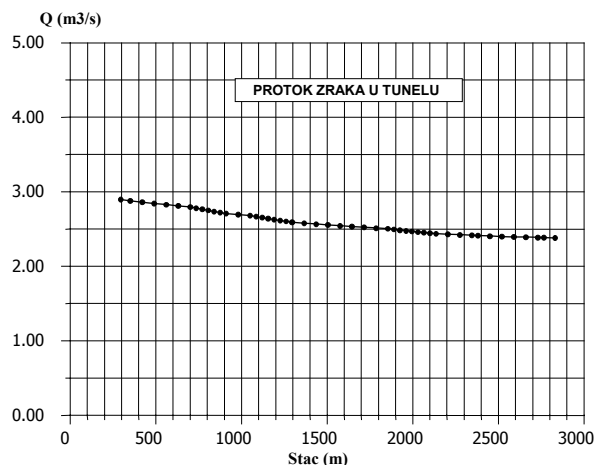
#### 4.2 Prirodna ventilacija

Na slikama 9. do 13. prikazani su rezultati modeliranja prirodne ventilacije pri brzini strujanja zraka u slobodnoj atmosferi od 5 m/s iz smjerova koji ne stvaraju dinamički nadtlak na istočnoj strani tunela.



Slika 9. Protoci zraka u kanalizacionjskoj cijevi i kroz otvore okana

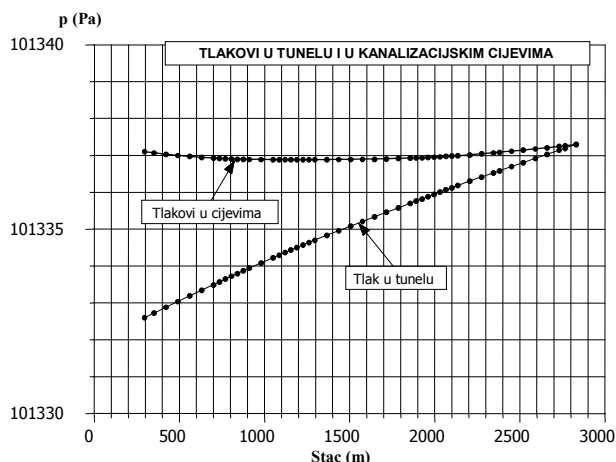
Kroz svaku kanalizacionjsku cijev u sabirnom oknu na zapadnoj strani ulazi po 130 l/s zraka, a s istočne strane ulazi po 120 l/s zraka, odnosno ukupno oko 500 l/s na obje strane i na obje cijevi (slika 9.).



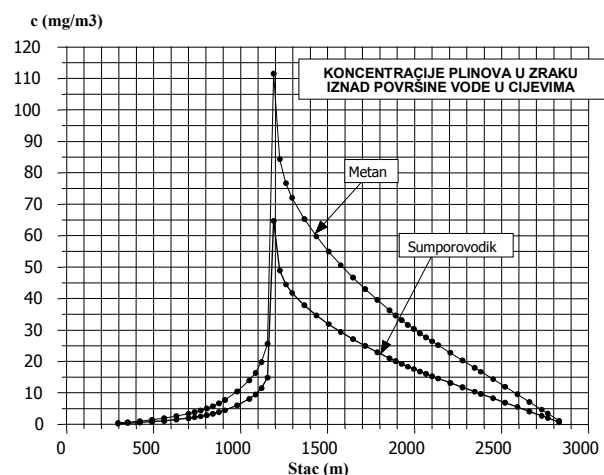
Slika 10. Protok zraka u tunelu

Slika 10. prikazuje protok zraka u tunelu na svakom pojedinom oknu. Na istočnom je portalu protok zraka oko 2,35 m<sup>3</sup>/s, te se postupno povećava duž tunela na oko 2,85 m<sup>3</sup>/s na zapadnoj portalnoj građevini. Za potpunu izmjenu zraka u tunelu potrebno je 2,2 sata.

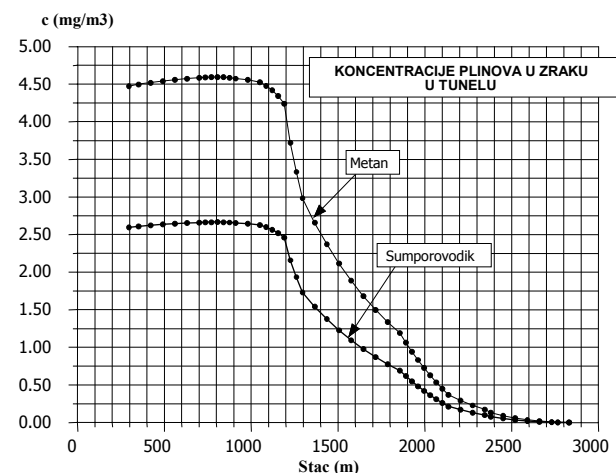
Raspored tlakova u zraku, u cijevima i u tunelu, prikazan je na slici 11. Na slici 12. su koncentracije metana i sumporovodika u zraku, u cijevima i duž tunela, a na slici 13. koncentracije metana i sumporovodika u zraku u tunelu.



Slika 11. Tlakovi u tunelu i u kanalizacionjskim cijevima



Slika 12. Koncentracije plinova u zraku iznad površine vode u cijevima



Slika 13. Koncentracije plinova u zraku u tunelu.

## 5 Dopuštene koncentracije metana i sumporovodika u zraku

Prema (5) u slobodnom profilu tunela i u cijevima kanalizacionjskog sustava mogu se pojaviti različiti plinovi u anaerobnim i aerobnim uvjetima. Pri anaerobnoj razgradnji organskih tvari u kanalizacionjskim kanalima izdvajaju se plinovi od kojih su najopasniji ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>) i u manjim količinama amonijak (NH<sub>3</sub>). Metan je zapaljiv, eksplozivan i otrovan za ljude. Intenzitet izdvajanja plinova u kanalizacionjskoj mreži raste što je kanal manji, što je temperatura vode veća, što je brzina tečenja manja, što je protok manji te što je slabija ventilacija kod dugačkih kanala.

U otpadnoj se vodi anaerobnom bakterijskom razgradnjom (anaerobni sumporni mikroorganizmi) rastvaraju organski sumporni spojevi (npr. bjelančevine). Razvoj sumporovodika (H<sub>2</sub>S) počinje u otpadnoj vodi u kojoj je potrošen prvobitni kisik. Dokle god otpadna voda ostaje svježja, ne stvara se sumporovodik. Kod kućne otpadne vode, u anaerobnim uvjetima, truljenje započinje nakon više sati. Kod povišene temperature otpadne vode, te kod kanala napunjenih muljem i kod kanala s velikom količinom organskih tvari koje lako trule, u slučaju pojave anaerobnih uvjeta, stvaranje sumporovodika može započeti već nakon 1-2 sata. Sumporovodik ima jak, neugodan miris (miriše na pokvarena jaja). Zapaljiv je i vrlo otrovan. Iz sumporovodika nastaje sumporna kiselina koja je štetna za beton.

Prema (2) maksimalna dopuštena koncentracija sumporovodika na radnome je mjestu za 8-satni radni dan 20 ppm (= 0,028 mg/l = 28 mg/m<sup>3</sup>). Prema (3) maksimalna dopuštena koncentracija sumporovodika na radnom mjestu za 8-satni radni dan jest 7 ppm = 10 mg/m<sup>3</sup>, a za atmosferu naselja 0,008 mg/m<sup>3</sup>. Prema (3) maksimalna je dopuštena koncentracija metana na radnome mjestu 300 mg/m<sup>3</sup>, a amonijaka 25 ppm = 18 mg/m<sup>3</sup>, dok je za atmosferu naselja 0,2 mg/m<sup>3</sup>. Prema (4) maksimalna je dopuštena koncentracija sumporovodika na radnome mjestu iznosi 20 ppm = 28 mg/m<sup>3</sup>, a amonijaka 100 ppm = 71 mg/m<sup>3</sup>.

Izlaganje ljudi atmosferi koja sadrži sumporovodik u koncentraciji od 200 ppm = 280 mg/m<sup>3</sup> u trajanju dužem od 1 minute izaziva teško trovanje.

Prema (7) maksimalna dopuštena koncentracija sumporovodika na radnome je mjestu 7 ppm = 10 mg/m<sup>3</sup>, a amonijaka 50 ppm = 35 mg/m<sup>3</sup>. Prema (8), za atmosferu naselja, granična je vrijednost koncentracije sumporovodika 0,002 mg/m<sup>3</sup>, amonijaka 0,070 mg/m<sup>3</sup>, a merkaptana 0,001 mg/m<sup>3</sup>.

Granice eksplozivnih mješavina pojedinih plinova sa zrakom jesu:

- sumporovodik 66186-708032 ( $\text{mg/m}^3$ )
- metan 35840-114688 ( $\text{mg/m}^3$ )
- amonijak 115650-215880 ( $\text{mg/m}^3$ ).

Na temelju izvršenih proračuna, usvojeni su sljedeći kriteriji za rad ventilatora u tunelu:

- uključivanje ventilatora pri koncentraciji sumporovodika od  $10 \text{ mg/m}^3$  ili metana od  $20 \text{ mg/m}^3$ ,
- isključivanje ventilatora pri koncentraciji sumporovodika od  $1 \text{ mg/m}^3$  ili metana od  $1.5 \text{ mg/m}^3$ .

Mimo ovih uvjeta, predviđeno je uključivanje ventilatora minimalno jednom na tjedan.

## 6 Mogućnost razvoja plinova u tunelu *Stupe*

### *Metan*

Eventualna pojava metana iz područja gradskog odlagališta smeća *Karepovac* isključena je izborom lokacije tunela (9). U području lokacije *Karepovca* projektirana je devijacija trase tunela prema jugu otprilike 165 m, kako bi se izbjeglo nepovoljno djelovanje procjednih voda na tunel. Zbog postojanja povoljno orijentiranih slojeva lapora, isključena je mogućnost dotoka zagađenih procjednih voda iz područja odlagališta smeća *Karepovac*, a time i metana otopljenog u vodi.

Postoji mogućnost pojave malih koncentracija metana iz kanalizacijskog sustava. Matematičkim je modelom dokazano da je prirodno ventiliranje, pri brzini vjetera u atmosferi od samo  $1 \text{ m/s}$ , dovoljno da osigura koncentracije metana u tunelu na razini približno 1500 puta manjoj od eksplozivne koncentracije. U Splitu, je vrijeme tišine (bez vjetera) prosječno samo 2,9% vremena, a prosječna je godišnja brzina vjetera  $4,1 \text{ m/s}$ . Bilo koji vjetar stvara podtlak na zapadnoj portalnoj građevini, a jugo i istočnjak stvaraju dinamički nadtlak na istočnom portalu. Eksplozivna koncentracija metana u tunelu bez ventiliranja i bez ikakvog vjetera postigla bi se za 2,47 godina.

### *Sumporovodik*

Proračunom je dokazano da je prirodno ventiliranje pri brzini vjetera u atmosferi od samo  $1 \text{ m/s}$ , dovoljno da osigura koncentracije sumporovodika u tunelu na razini približno 4000 puta manjoj od eksplozivne. Eksplozivna koncentracija sumporovodika u tunelu bez ventiliranja i bez ikakvog vjetera, postigla bi se za 7,85 godina.

Radi zaštite od pojave plinova i ustajalosti zraka u vlažnom prostoru, predviđena je prisilna ventilacija koja

za 35 minuta rada obaju ventilatora može izmijeniti cijeli volumen zraka u tunelu. Zbog postojanja prirodne ventilacije, realno je očekivati da će se ventilatori rijetko uključivati u pogon.

## 7 Zaključak

Na osnovi izvršenih proračuna, standarda, literature i rezultata istražnih radova na kanalizacijskom sustavu grada Splita, može se zaključiti da nema opasnosti od pojave plinova u koncentracijama koje bi bile opasne za zdravlje, koje bi bile zapaljive ili bi izazvale eksploziju. Prirodno zračenje tunela zbog njegove orijentacije istok-zapad, položaj zapadne portalne građevine koja djeluje kao dimnjak i projektirani ventilacijski sustav pružaju potpunu sigurnost. Čak u slučaju da ventilatori ne rade, prirodna izmjena zraka otklanja bilo kakvu opasnost od eksplozivnih koncentracija plinova.

Na temelju izvršenih proračuna zaključuje se da u tunelu, ni u kakvim uvjetima, ne može nastati eksplozivna atmosfera te da sukladno tome nije potrebna protueksplozivna (S) izvedba elektrostrojarske opreme u tunelu niti u pripadajućim zgradama. Oprema u tunelu mora biti zaštićena od vlage.

Tablica 1. Pregled rezultata modeliranja.

Varijanta	Koncentracije u zraku u cijevima [ $\text{mg/m}^3$ ]		Koncentracije u zraku u tunelu [ $\text{mg/m}^3$ ]	
	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> S	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> S
Rad dva ventilatora	30	17	1,2	0,7
Rad jednog ventilatora	35	20	1,4	0,8
Prirodna ventilacija $v_0 = 10 \text{ m/s}$	57	33	2,25	1,6
Prirodna ventilacija $v_0 = 5 \text{ m/s}$	112	65	4,6	2,7
Prirodna ventilacija $v_0 = 1 \text{ m/s}$	570	330	24,5	14
Prirodna ventilacija, jugo $v_0 = 10 \text{ m/s}$	40	23	1,6	0,9

U tablici 1. dan je pregled rezultata modeliranja. Dozvoljene su koncentracije za osamsatni rad  $300 \text{ mg/m}^3$  za metan i  $10 \text{ mg/m}^3$  za sumporovodik. Donje su granice eksplozivnih koncentracija  $35840 \text{ mg/m}^3$  za metan i  $66186 \text{ mg/m}^3$  za sumporovodik.

## LITERATURA

[1] *Studija postupaka prečišćavanja industrijskih otpadnih voda u svjetlu literaturnih podataka*, Istraživačko razvojni centar za termotehniku i nuklearnu tehniku (ITEN), Sarajevo, 1968.

[2] Lautric, R.: *Der Abwasserkanal, Handbuch für Planung, Ausführung und Betrieb*, Paul Parey, Hamburg, 1976.



- [3] Stojanović, O.; Stojanović, N.; Kosanović, Đ.: *Štetne i opasne materije*, Rad, Beograd 1984.
- [4] Radošević, N.: *Priručnik za kemičare i tehnologe*, Tehnička knjiga, Beograd 1962.
- [5] Margeta, J.: *Kanalizacija naselja*, Split, 1998.
- [6] *Hidrotehnički tunel Stupe i sabirno okno sa pripadajućom infrastrukturom*, Glavni projekt, Građevinski fakultet Split, Split, 1999.
- [7] *Standard iz područja zaštite na radu*, H.R.N. Z. BO. 001/VIII-1971.; Maksimalno dopuštene koncentracije štetnih plinova, para i aerosola u atmosferi radnih prostorija i radilišta.
- [8] *Uredba o preporučenim i graničnim vrijednostima kakvoće zraka*, N.N. 101/96.
- [9] Bahun, S.: *Mišljenje o porijeklu podzemnih voda i njihovom utjecaju na izvedbu tunela*, Geološko-paleontološki zavod Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, Zagreb, 1999.
- [10] Bojanić, D.; Studija: *Analiza koncentracije plinova u zraku u tunelu Stupe*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 2001.
-