

# POŽARI IN POŽARNA VARNOST V CESTNIH PREDORIH

## Fires and Fire Life Safety in Road Tunnels

John R. Day\* UDK 624.19:614.841

### Povzetek

Po zadnjih tragičnih požarih v predoru Mont Blanc in turskem predoru je vprašanje varnosti v predorih ponovno vzbudilo pozornost. Postavlja pa se vprašanje, kako varne predore je možno in smiselno narediti. Potovanje skozi predor vključuje, tako kot še marsikaj v življenju, določeno tveganje in ga ni mogoče narediti popolnoma varnega. Z dobrimi načrtovalnimi pristopi, zanesljivo opremo, učinkovitim vzdrževanjem in rednimi vajami je seveda varnost predorov možno izboljšati.

Članek obravnava osnovna načela in merila za oblikovanje zasilnih prezračevalnih sistemov v eno- in dvocevni predorih ter dejavnike, ki jih je treba upoštevati pri njihovem načrtovanju. Predstavljene so tudi nekatere varnostne izboljšave, ki jih je možno vključiti v načrtovanje in obratovanje predorov. V članku bom pojasnil, zakaj požarna varnost ni nekaj, kar je možno predoru dodati. Upoštevati jo je treba že pri njegovem načrtovanju, nato pa za njo skrbeti ves čas obratovanja predora.

### Abstract

Following the recent tragic fires in the Mont Blanc and Tauern Tunnels, security in tunnels has acquired renewed importance. But just how safely can/should tunnels be made? Travelling through a tunnel, like many other things in life, carries a certain amount of risk and cannot be made totally safe. However their intrinsic safety can be improved with good design concepts, reliable equipment, effective maintenance and regular training exercises.

The fundamental aspects and criteria for designing emergency ventilation systems for both single and twin-tube tunnels are described and the factors that influence design are discussed. Some of the safety improvements that can be achieved in the design and operation of tunnel are presented. The article demonstrates that fire life safety is not something that can be added to a tunnel; it has to be included in the design from the outset and continued throughout the tunnel's operational life.

## Uvod

Stalno zmanjševanje emisij iz vozil v deželah, ki so sprejele stroge predpise o emisijah škodljivih snovi, je omogočilo gradnjo daljših predorov, ki jih pri normalnem obratovanju ni treba mehansko prezračevati. Zasilen prezračevalni sistem za primer požara je postal predmet načrtovanja predorov.

Po kratkem opisu obnašanja ognja in dima v predorih bom predstavil tipične sisteme za prezračevanje predorov med običajnim obratovanjem in v sili, osnovne koncepte požarne varnosti ter nekatere aktivne in pasivne ukrepe, s katerimi je možno izboljšati varnost v predorih. V članku so opisani primeri izbruha požarov v predorih z enosmernim in dvo-smernim prometom in načini, kako je možno udejaniti koncepte požarne varnosti. Predstavljena je tudi kratka zgodovina požarne varnosti v cestnih predorih, obravnavani pa so tudi pristopi, ki jih je treba sprejeti za zagotovitev varnosti.

## Obnašanje dima v predorih

Ponavadi se predpostavlja, da med gorenjem nastane dovolj toplote, da se dim dviga (1). To prav gotovo velja za lahko ponovljive ogljikovodikove požarne teste z bencinskimi bazeni. Vroč dim se dviga in razširja vzdolž stropa predora, se ohlaja zaradi oddajanja toplote predoru in mešanja z zrakom, ki se giblje proti ognju pod plastjo dima (slika 1a).

Na določeni razdalji od požara se dim dovolj ohladi, da se plast ne dviga več, zato se lahko meša z zrakom pod njo ter zapolni celoten presek predora. V bližini mesta požara se sorazmerno dolgo časa ohrani območje precej čistega zraka pod dimno plastjo, dokler se zrak, ki potuje proti ognju, ne nasiti z dimom (slika 1b).

Kadar obstaja samo majhen vzdolžni tok zraka ali pa ga sploh ni in ima predor vzdolžni gradient, ki je manjši od petih odstotkov, se dim enakomerno širi na obe strani ognja. Pri majhnem vzdolžnem zračnem toku se vroč dim še vedno dviga in oblikuje plast pod stropom predora, vendar pa se več dima giblje od požara v smeri zračnega toka kakor pa v nasprotno smer in pri tem ostaja v stropnem delu pre-

dora (slika 1c). Pojav je znan kot protitočno plastenje dima. Pri večjem pretoku zraka vzdolž predora se posedanje zraka zmanjša in nad kritičnim pretokom zraka se ves dim širi od mesta požara samo v smeri zračnega toka (slika 1č). Dim se meša z zračnim tokom; celoten presek dela predora nad požarom v smeri zračnega toka se napolni z dimom, ki se ne zadržuje več samo v plasti pod stropom predora.

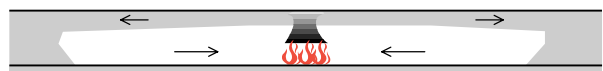
a) takoj po izbruhu požara v predoru brez vzdolžnega zračnega toka

a) shortly after start of fire with no longitudinal airflow



b) 5 do 10 minut po izbruhu požara v predoru brez vzdolžnega zračnega toka

b) 5 to 10 minutes after start of fire, no longitudinal airflow



c) pri majhnem vzdolžnem zračnem toku (približno 1 do 1,5 m/s)

c) small longitudinal airflow (ca. 1 to 1.5 m/s)



č) pri vzdolžnem zračnem toku nad kritičnim pretokom

č) longitudinal airflow greater than the critical velocity



Slika 1. Razvoj dima pri požaru v predoru  
Figure 1. Smoke development in a tunnel fire

\* B. Tech (Hons), AMRAeS, Electrowatt Engineering Ltd., Zürich

Kritični pretok je funkcija velikosti požara in geometrije predora. Ocenimo ga s pomočjo Heseldenovih enačb (2).

Preizkusi v predoru Memorial Tunnel so pokazali (3), da je vzdolžno prezračevanje eno od najbolj učinkovitih sredstev za nadzorovanje razširjanja dima ter da vzdolžno od velikega požara, pri katerem ni protitočnega plastenja dima, pod plastjo dima ni sloja čistega zraka. Celoten presek je napolnjen z dimom.

Viri požarov in njihova moč so odvisni od prometa v predoru in tveganja, ki je povezano s prometom, zato se razlikujejo od požara do požara. V Švici, na primer, se sme gorivo razvažati po cesti samo lokalno, vse prevoze na dolge razdalje pa morajo opraviti po železnici. Zaradi tega je pri njih le redko treba upoštevati 50/100 MW bencinskega požara, ki je pogosta zahteva pri načrtovanju predorov v drugih deželah. Pri načrtovanju večine predorov lahko upoštevajo veliko manjše požare, običajno z močjo 12 do 20 MW.

## Predorski prezračevalni sistemi

### Kratki predori

Večina predorov je kratkih in pri normalnem delovanju ne potrebujejo mehanskega prezračevanja. Zračni tok, ki ga ustvarjajo gibajoča se vozila, je namreč dovolj velik za samoprezračevanje predora v normalnih okoliščinah. Ali potrebujejo tudi zasilno prezračevanje? V kratkih predorih bo ob izbruhu požara pri dvosmernem prometu vedno vzdolžni zračni tok, vendar pa bo manjši od kritičnega pretoka. Pri enosmernem prometu je lahko vzdolžni tok tudi večji od kritičnega pretoka, vendar pa bo prenehal obstajati, ko bodo vozila zapustila predor. V prvem primeru bo plast dima ostala pod stropom predora, dokler se dim ne bo ohladil pod dvižno temperaturo, kar se običajno zgodi na razdalji 400 do 700 m, odvisno od moči požara in drugih dejavnikov (1). V drugem primeru pa na začetku ne bo toplotne stratifikacije, vendar bo dim potoval v varni smeri proti izhodnemu portalu. V obeh primerih je predor, ki še ne potrebuje zasilnega prezračevanja, enako dolg: 400 do 700 m. Naravna toplotna stratifikacija dima na tej razdalji deluje kot samoregulirani odvod dima iz predora pri portalih. Nekatere organizacije so predpisale največjo dovoljeno dolžino za predore brez zasilnega prezračevalnega sistema, v nekaterih državah pa je to prepuščeno presoji posameznih načrtovalcev ali lastnikov.

### Dolgi predori

V dolgih predorih obstajata dva osnovna načina rednega prezračevanja: vzdolžno prezračevanje in prečno ali povratno polprečno prezračevanje.

Vzdolžni prezračevalni sistemi (slika 2 a) potiskajo svež zrak od enega portala vzdolž predora (kjer se meša z izpušti iz vozil) do izhodnega portala. Turbinski ventilatorji, ki so pod stropom predora, ojačajo naravni vzdolžni pretok zraka, ki ga ustvarjajo vozila med vožnjo skozi predor. Pri prečnem tipu prezračevalnih sistemov (slika 2 b) se svež zrak dovaja, postan pa odstranjuje vzdolž celotne dolžine predora skozi jaške, ki so ločeni od prometnega dela predora.

Vzdolžni prezračevalni sistemi s turbinskimi ventilatorji in vmesnimi jaški za izmenjavo zraka v daljših predorih so običajni v dvocevnih predorih in krajših enocevni predorih z dvosmernim prometom, medtem ko se pri daljših enocevni predorih pogosto odločijo za prečne ali polprečne prezračevalne sisteme.

## Zasilni prezračevalni sistemi

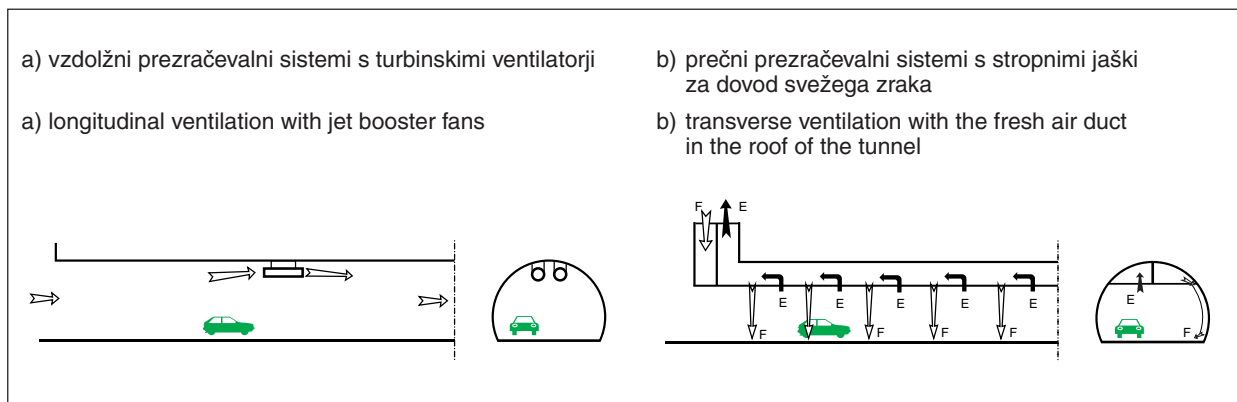
Obstajata dva pristopa. Prvi temelji na tem, da je možno širjenje dima nadzorovati s pomočjo vzdolžnega zračnega toka. To je najcenejši pristop. V določenih okoliščinah je to preprosta in zelo dobra rešitev. Slabost tega pristopa pa je, da dim ostaja v predoru. Pri drugem pristopu se dim odstranjuje iz predora v namensko zgrajen odvodni jašek skozi odprte, ki so lahko odprte stalno (kot pri običajnih prečnih ali polprečnih prezračevalnih sistemih), odprte glede na lokalno temperaturo zraka (ni priporočljivo) ali pa se odpirajo na daljavo. V evropskih državah trenutno uporabljajo zadnji pristop z daljinskim odpiranjem loput. Z odpiranjem loput v bližini požara se doseže koncentracija izhodnega toka in omeji razdalja, do katere se dim razširja vzdolž predora. Stroški izgradnje, vzdrževanja in obratovanja sistema za odvajanje dima z loputami so seveda veliko večji kot pri sistemih za nadzorovanje dima, vendar pa zagotavljajo bistveno večjo varnost ujetim v požaru.

## Varnostne zasnove

V najugodnejših okoliščinah potrebujejo gasilci in reševalci le nekaj minut po sprožitvi alarma, da pridejo na mesto požara v predoru, ki je v urbanem okolju. Pogostokrat pa prispejo na mesto požara šele, ko ogenj ne dogori ali so ujetniki v požaru že umrli. Zaradi tega mora biti predor načrtovan tako, da je obseg požara čimmanjši in da so tistim, ki so ujeti v predoru, na voljo oprema in možne poti za samoreševanje.

Glavni namen prezračevalnih sistemov in drugih varnostnih naprav v predorih mora biti zagotovitev varnega zatočišča tistim, ki so ujeti v požaru ter zagotovitev proste in varne poti za beg do varnega zatočišča.

Drugi cilj pa je zagotovitev dostopa reševalnemu osebju, opremi in vozilom do mesta požara in zmanjšanje škode v predoru in njegovih napravah.



Slika 2. Vrste prezračevalnih sistemov v cestnih predorih  
Figure 2. Types of road tunnel ventilation systems

## Varnost v predorih

Požar v predoru je za ljudi veliko nevarnejši od podobno velikih požarov v stavbah ali na prostem. Razlikujejo se lahko tudi kemične snovi ali sproščajo škodljivi plini. Požari niso edina nevarnost v predorih.

Varnostni ukrepi v predorih so osredotočeni predvsem na varovanje življenj, vključujejo pa tudi ukrepe za zmanjševanje škode v njih. Nekateri varnostni ukrepi, ki zvečujejo požarno varnost ljudi, lahko povečajo škodo v predoru, drugi pa zagotavljajo večjo varnost tistim, ki so ujeti v predoru, in hkrati zmanjšujejo tudi intenziteto požara in/ali škodo v predoru. V vseh primerih mora biti osnovna skrb namenjena varovanju človeških življenj, četudi se zaradi ukrepov za doseganje tega cilja škoda v predoru zveča.

Varnost v predorih se zveča z veliko aktivnimi in pasivnimi ukrepi. Med najbolj učinkovitimi in stroškovno ugodnimi so nekateri pasivni ukrepi, ki ne zahtevajo avtomatskih ali ročnih posegov in jih lahko upoštevamo že pri načrtovanju predora. Med tovrstne ukrepe spadajo:

- primeren odtočni sistem in prečni profil, s katerima se zmanjša površina, ki jo ima polita tekočina na voljo za gorjenje
- zmogljivosti, ki omogočajo ljudem, ujetim v predoru, beg na varno
- oprema, ki prenese visoke temperature
- izbira primerne materiala za vozno površino.

Aktivni ukrepi vključujejo avtomatske in ročne posege ter telefonske sisteme za klic v sili, ročne gasilne aparate, zasilno razsvetljavo, videonadzorne sisteme, sisteme za odkrivanje požara (čeprav jih v nekaterih deželah ne zahtevajo) in krizne programe za sisteme za upravljanje prezračevalnih sistemov in prometa. Požarne oblasti v nekaterih državah zahtevajo vodne pršilnike ali poplavne sisteme, vendar pa jih PIARC (4) ne priporoča kot požarno-varnostne sisteme. Najbolj učinkoviti aktivni ukrepi so seveda vzdrževanje opreme, pripravljeni postopki za ukrepanje v sili ter redno usposabljanje in vaje, s katerimi se zagotavlja, da so vsi udeleženci seznanjeni s svojimi vlogami, nalogami in odgovornostmi v primeru nesreče.

## Zasilni prezračevalni sistemi za dvosmerne predore z enosmernim prometom

Ko med normalnim potekom prometa v predoru izbruhne požar, se vozila, ki so nad mestom požara, odpeljejo iz predora. Vozila, ki peljejo proti požaru, so ujeta, vendar pa so na tisti strani požara, kjer je svež zrak. Ob nastanku nesreče je vzdolžni zračni tok skozi predor skoraj zanesljivo večji od kritičnega pretoka, zato na začetku odpihne dim stran od ujetih vozil. Sčasoma pa se vzdolžni tok zmanjša, zato vedno več dima, ki nastaja med požarom, prodira nazaj čez ujeta vozila.

## Kako udejaniti varnostna načela?

Najboljše zatočišče za ljudi v ujetih vozilih in pristop za gasilce ter reševalce je druga cev predora. Za zagotovitev varne poti je treba takoj po sprožitvi alarma ustaviti promet ob vstopu v drugo cev. Vmesne povezave med cevmi, ki so enakomerno porazdeljene po dolžini predora, omogočajo dostopne poti do zatočišča. Edini problem, ki ga je treba rešiti, je, da naredimo pot do druge cevi kar najbolj varno, to je brezdimno.

Vzdolžni tok, ki preprečuje razširjanje dima nazaj čez ujeta vozila, lahko ustvarimo s: turbinskimi ventilatorji, ki pihajo v smeri prometa (najlažji način), asimetričnim prečnim pre-

zračevanjem (z večjim odvodnim tokom na protitočni strani požara in večjim dotokom svežega zraka nad mestom požara v smeri toka) ali z odvajanjem dima skozi odprtine dimnega jaška nad mestom požarom v smeri toka.

Če hočemo zmanjšati število vozil, ki so ujeta v predoru, moramo takoj po sprožitvi alarma ustaviti promet ob vstopu v cev, v kateri se je zgodila nesreča. Vse prometne signale v cevi, v kateri je izbruhnil požar, je treba med vhodnim portalom in mestom požara sočasno preklopiti v položaj STOP in tako zadržati vozila, ki so že v predoru, čim dlje od mesta požara.

Ena od pomanjkljivosti vzdolžnih prezračevalnih sistemov za nadzorovanje dima je, da lahko dim izhaja iz predora samo pri izhodnem portalu ali skozi najbližji prezračevalni jašek. Vse njegove slabosti se pokažejo, če požar izbruhne med prometno gnečo v predoru. Prezračevalni sistem lahko uporabimo, če dim pihava čez stoječa vozila nad mestom požara. Verjetnost nastanka tovrstne situacije se povečuje, ko prometna obremenitev preseže zmogljivost vozniških pasov. Najpogostejša je v mestnih predorih. To je eden od razlogov za uporabo prečnih prezračevalnih sistemov in/ali sistemov za odvajanje dima v tovrstnih predorih.

## Zasilni prezračevalni sistemi za predore z dvosmernim prometom

Vozila, ki se v obeh smereh peljejo proti ognju, so ujeta. Tista, ki so v posameznih smereh za požarom, se odpeljejo iz predora na varno, če ni prometnega zamaška v eni ali drugi smeri. Dim je v plasti nad ujetimi vozili na obeh straneh ognja. Če je v trenutku nastanka nesreče obstajal vzdolžni prezračevalni tok, bo več dima potisnjena na eno stran ognja kot na drugo.

## Kako udejaniti koncepte varnosti?

Območje sorazmerno čistega zraka pod plastjo dima je treba ohraniti čim dlje časa in tako ljudem, ki so ujeti na obeh straneh ognja, omogočiti pobeg skozi zasilne izhode na prosto, skozi prečne povezave v vzporedni pomožni predor ali v posebej zgrajene reševalne prostore (v predorih, ki so precej oddaljeni od ravnega terena).

Očitne smeri za vzdolžno usmerjanje dima ni. Dim bo vedno potiskalo čez vozila, ki so ujeta v predoru. Pri tovrstnih predorih je zato treba iz njih čim hitreje odstraniti dim in mu ne dovoliti, da bi se v njih ohladil. To lahko dosežemo z: odstranjevanjem skozi stropne odprtine vzdolž celotnega predora (standardni prečni ali reverzibilni polprečni prezračevalni sistemi) ali z odstranjevanjem v dimne jaške skozi odprte lopute v bližini mesta požara.

V obeh primerih je najboljša izbira simetrična porazdelitev dima, to je brez vzdolžnega zračnega toka. Dostopa za gasilska in reševalna vozila ter osebje ne bo mogoče zagotoviti (če ne obstaja paralelni pomožni predor), dokler ne bodo vsa vozila, ki so ujeta v požaru, zapustila predor, zato je samoreševanje edina realna možnost.

## Ali so predori varni?

Požari v predorih niso redki. V večjih cestnih predorih jih je več na leto, vendar so običajno manjši in hitro ugasnejo (pogosto precej pred prihodom gasilcev in reševalcev). Žrtev ni, škoda v predoru pa je le manjša. Včasih, vendar na srečo le redko, pa so požari tudi večji in imajo usodne posledice (preglednica).

Po trku v predoru izbruhne požar le redko, toda večina večjih požarov, ki so jih zanelile nevarne snovi, je izbruhnila prav po trku. Zanimivo je, da število smrtnih žrtev požarov v predorih ni povezano z dolžino predora, zato zahteve, da

mora biti v daljših predorih sorazmerno več varnostnih ukrepov, niso nujno upravičene.

## Kako zagotoviti varnost?

Varnost lahko zagotovijo samo ljudje: načrtovalci predorov in njegovih sistemov, lastniki in tisti, ki skrbijo za obratovanje, ter njegovi uporabniki.

V veliko državah so sprejeli navodila ali zahteve za načrtovanje predorov, s katerimi želijo zagotoviti ustrezno raven varnosti v predorih. Veliko zahtev je skupnih, vendar pa obstajajo tudi bistvene razlike. Pri vseh zahtevah so upoštevali lokalna pravila in predpise, tveganje in prakso, zato predstavljajo celovit sklop in so specifične za določeno državo in njeno kulturo. Država naj bi prevzela zahteve druge države samo po njihovi celoviti presoji, ki mora zagotoviti, da bodo v obeh državah veljale enake osnove. Tako na primer nekatere države dovoljujejo ali zahtevajo vgradnjo določene opreme, ki jo je treba redno vzdrževati. Prevzem tovrstne zahteve bi bil brez vsake vrednosti v državi, v kateri se ni možno zanesti na vzdrževanje. Kadar se en del navodil prevzema od ene države, drugi del pa od druge, obstaja možnost, da bodo nekateri vidiki varnosti urejeni na različne načine ali celo zanemarjeni.

Na spodnji sliki je predstavljen poskus povezave nekaterih vidikov varnosti, ki jih je treba upoštevati pri načrtovanju predorov in njihovih sistemov, in vidikov varnosti, ki se nanašajo na delovanje predora in služb za ukrepanje v sili.

Najpomembnejša pa je zavest, da učinkovita požarna varnost ni odvisna od konstrukcije predora – ne glede na kakovost načrtovanja predora in njegovih sistemov – temveč predvsem od ljudi:

- tistih, ki skrbijo za obratovanje, vzdrževanje in preverjanje varnostnih sistemov
- tistih, ki vodijo usposabljanje in vaje služb za pomoč in reševanje ter zagotavljajo, da so načrti za ukrepanje v sili uspešni
- tistih, ki sprejemajo in uveljavljajo predpise ter zagotavljajo, da se načela požarne varnosti spoštujejo pri načrtovanju predora in nato tudi med njegovim obratovanjem.

Na žalost pa imajo načrtovalci in lastniki predorov le malo vpliva na tisto, kar je verjetno največja grožnja varnosti v predoru – na obnašanje njegovih uporabnikov. Nesreči v predoru Mont Blanc in turskem predoru sta jasno pokazali, da se vozniki ne zavedajo tveganosti vožnje skozi predor in da imajo slabe vozne navade (vozijo s premajhno varnostno razdaljo) ter da v primeru nesreče ne vedo, kaj storiti. Švicarske oblasti so spoznale to pomanjkljivost in hitro vključile vajo iz vožnje po predoru v izpit za nove voznike motornih vozil. Hkrati z uvedbo tega ukrepa so z akcijo poskušale informirati – in upajmo tudi izobraziti – stare voznike.

## Sklep

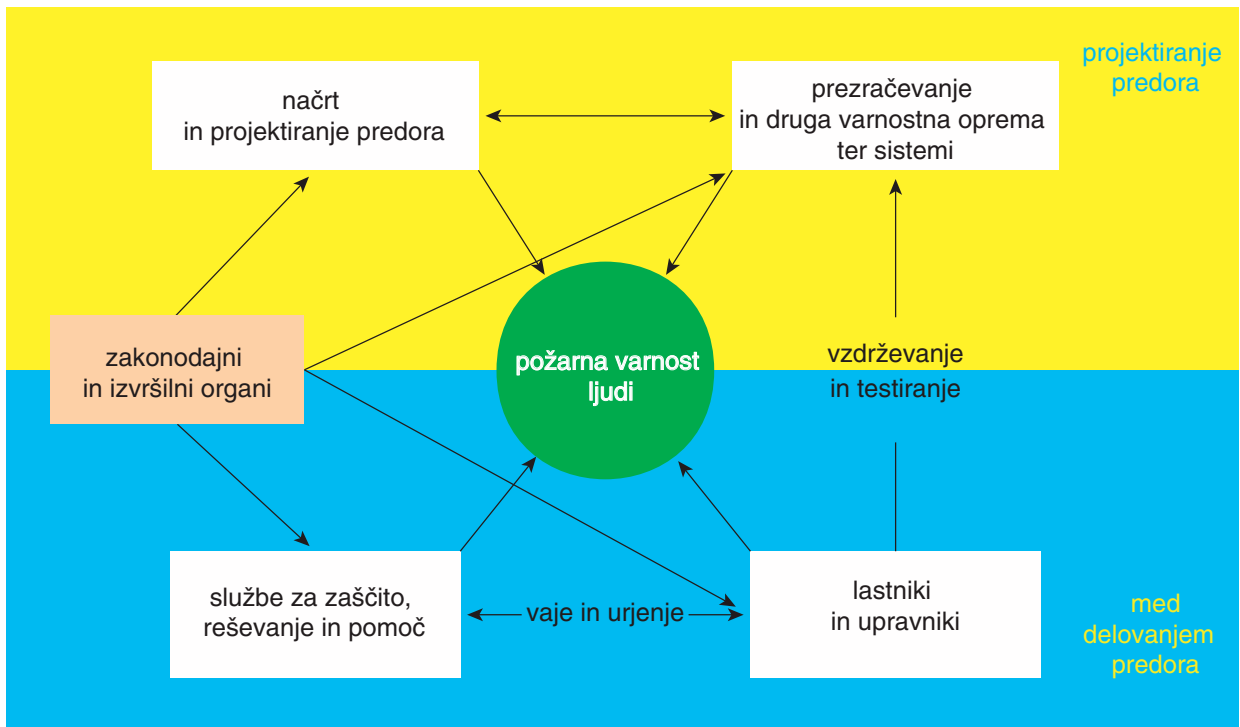
Načrtovalci predorov bi se morali zavedati, da sta zasnova in konstrukcija predora ob požaru ali drugih nesrečah tesno povezani z njegovo varnostjo. Prezračevanje in vsi drugi vidiki požarne varnosti niso enosmerni in jih ni možno pozneje »dodati«. Vključeni morajo biti že v zasnovi in načrtovanju predora.

Lastniki predorov in tisti, ki skrbijo za njihovo obratovanje, se morajo zavedati, da bodo varnostni sistemi in naprave v njihovem predoru, ne glede na kakovost, delovali zadovoljivo samo, če bo odgovorno osebje ustrezno motivirano in usposobljeno. Dejstvo, da je večina požarov v predorih majhnih, ne more biti izgovor za brezskrbnost in predpostavljjanje, da »v mojem predoru ne bo nikoli izbruhnil večji požar«.

V cestnih predorih po celem svetu umre zaradi požarov v njih enako številu ljudi kot jih v nekaj dneh umre samo na britanskih cestah. Skrb vzbuja podatek, da se je v zadnjih letih povečalo število požarov v predorih s smrtnimi žrtvami. Je to posledica povečanega števila predorov, povečanja prometa, neprimerne vedenja voznikov ali pa nezadostnih naložb v opremo in ljudi? Samo upamo lahko, da smo se ob tragedijah v predoru Mont Blanc in turskem predoru (ki sta zahtevali več kot polovico vseh smrtnih žrtev in ju lahko opredelimo kot katastrofi) česa naučili. Od vseh, ki sodelujejo pri načrtovanju in obratovanju cestnih predorov, kakor tudi od uporabnikov predorov pa moramo zahtevati večjo varnostno kulturo.

**Preglednica. Požari v cestnih predorih z usodnimi posledicami**  
**Table. Fatal road tunnel fires**

leto	predor	dolžina	število smrtnih žrtev	nevarne snovi
1978	Velsen, Nizozemska	770 m	5	
1979	Nihonzaka, Japonska	2.045 m	7	trk, eter
1980	Kajiwara, Japonska	740 m	1	trk, barve
1982	Caldecott, Oakland, ZDA	1.028 m	7	trk, benzen
1983	Pecorile, Savone, Italija	600 m	8	
1986	L'Arme, Nice, Francija	1.105 m	3	
1987	Gumefens, Bern, Švica	340 m	2	
1993	Serra a Ripoli, Italija	442 m	4	
1994	Huguenot, Južna Afrika	3.914 m	1	
1995	Pfander, Avstrija	6.719 m	3	
1996	Isola delle Femmine, Italija	148 m	5	trk, lahko gorivo
1999	Mont Blanc, Francija/Italija	11.600 m	39	
1999	turski predor, Avstrija	6.400 m	12	trk, barve/laki
<b>skupno število smrtnih žrtev</b>			<b>97</b>	



Slika 3. Poskus povezave nekaterih vidikov varnosti, ki jih je treba upoštevati pri načrtovanju predorov  
 Figure 3. Attempt to link some aspects of fire safety in tunnel design

## Literatura

1. PIARC, Technical Committee on Road Tunnels Report, Permanent International Association of Road Congresses Report No. 5, XVIIIth World Road Congress, Brussels, 13–19 September 1987.
2. Heselden, A. J. M., Studies of Fire and Smoke Behaviour relevant to Tunnels, Proc. 2nd Int. Symp. Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, Paper J1, 1976.
3. Bendelius, A., Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Programme; Proceedings of Seminar Smoke and Critical Velocity in Tunnels' London, UK, 2 April 1996, Independent Technical Conferences Ltd., ISBN 0 9520083 3 5
4. Fire and Smoke Control in Tunnels, Permanent International Association of Road Congresses Committee Report 05.05.B, 1999, ISBN 2 84060 064 1
5. Road Tunnels, Permanent International Association of Road Congresses Committee Report 20.05.B, XXth World Road Congress, Montreal, 1995, ISBN 2 84060 015 3