SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

ANALIZA MJERA ZA PREVENCIJU KATASTROFALNOG POŽARA U CESTOVNIM TUNELIMA

Doktorska disertacija

Aleksandar Regent

Rijeka, 2011.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

ANALIZA MJERA ZA PREVENCIJU KATASTROFALNOG POŽARA U CESTOVNIM TUNELIMA

Doktorska disertacija

Aleksandar Regent

Mentor: red. prof. dr. sc. Bernard Franković, dipl. ing. str.
Komentor: red. prof. dr. sc. Vladimir Medica, dipl. ing. str.

Rijeka, 2011.

Sveučilište u Rijeci
TEHNIČKI FAKULTET
-Fakultetsko vijeće-
Klasa: 602-04/07-02/5
Ur. br.: 2170-57-43-07-18
Rijeka, 21. prosinca 2007.

Fakultetsko vijeće Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, na svojoj 5. (5.) sjednici u akad. god. 2007./08./09./10., održanoj 21. prosinca 2007. donijelo je sljedeću

O D L U K U

Sukladno izvješću Stručnog povjerenstva, u sastavu: red. prof. Bernard Franković, red. prof. Vladimir Medica, red. prof. Vlatka Dubravka Bjegović (Građevinski fakultet -Zg.), utvrđuje se da pristupnik ***mr. sc. Aleksandar Regent, dipl. ing. strojarstva*** ispunjava Zakonom propisane uvjete za prijavu i izradu doktorske disertacije naslovljene: *"Analiza mjera za prevenciju katastrofalnog požara u cestovnim tunelima."*

Mentorom se imenuje red. prof. dr. sc. Bernarda Frankovića, a komentorom red. prof. Vladimira Medicu.

Dekan

Red. prof. dr. sc. Tonči Mikac, dipl. ing.

Dostaviti:
1. Mr. sc. Aleksandar Regent
2. Mentor, red. prof. dr. sc. Bernard Franković
3. Komentor,red. prof. dr. sc. Vladimir Medica
4. Služba studentske evidencije, ovdje
5. Pismohrana FV, ovdje

S ljubavlju posvećeno Ančici i Petri, …… za sve ono vrijeme i pažnju koje sam im uskratio radeći.

Sažetak

U radu je napravljen pregled dosadašnjih istraživanja i testiranja tunelskih požara, većih akcidenata koji su se dogodili tijekom posljednjih 60 godina, europskih projekata usmjerenih prema povećanju razine sigurnosti od požara u tunelima, te uspoređeni zahtjevi međunarodno priznatih i nekih važnijih nacionalnih standarda i preporuka o sigurnosti tunela. Analizirani su mogući opasni događaji u cestovnim tunelima i različiti scenariji događanja, a posebna pažnja posvećena je interakciji između tih događaja i tradicionalnih metoda odgovora na njih, uz naglasak na istraživanje požarnih događaja. Dokazano je da je tradicionalnim pristupom, bez primjene stacionarnog sustava za gašenje/supresiju/kontrolu požara, u pravilu nemoguće spriječiti razvoj požara prema katastrofalnom scenariju ako postoje odgovarajući uvjeti za takav razvoj. Također je dokazano da vatrogasne postrojbe koje su nadležne za gašenje pojedinih tunela redovito na raspolaganju imaju nedovoljne količine vode i pjenila za uspješan odgovor na veći požar po dolasku na požarište. U osnovnim crtama prikazan je prijedlog stacionarnog sustava s pjenom za gašenje/supresiju/kontrolu požara u tunelu, te prijedlog novog požarnog testa za međusobnu usporedbu svih vrsta stacionarnih sustava. Ovaj prijedlog može poslužiti kao baza za izradu standardne procedure za testiranje primjenjivosti i učinkovitosti pojedinih stacionarnih sustava za gašenje/supresiju/kontrolu požara. Takva standardna procedura predstavljala bi alat uz čiju bi se pomoć mogle jasno eksperimentalno utvrditi i međusobno usporediti mogućnosti sustava raspršene vode, pjene i vodene magle pri reprezentativnim požarnim scenarijima. U tom smislu predloženo je da se na europskoj razini potakne daljnji razvoj istraživanja, posebno eksperimentalnih, koja bi dovela do razvoja sigurnosno optimalnih, a ekonomski prihvatljivih rješenja za sprječavanje i/ili ublažavanje najvećeg broja potencijalno katastrofalnih akcidentnih situacija.

Abstract

In this thesis a review of past research and test experiments with tunnel fires, of major accidents which have happened during the past 60 years, European projects directed towards improving the level of fire safety in road tunnels, comparison of internationally recognized and some major national standards and recommendations on tunnel fire safety have been presented. Dangerous accidents and various risk event scenarios in road tunnels have been analysed, with the particular attention being devoted to the interaction between these events and traditional response methods. Main subject of research have been fire accidents. It has been proven that with traditional approach only, without the application of a stationary system capable of fire extinguishment/suppression/control, it is generally hardly possible to prevent the development of fire towards a catastrophic scenario if favourable conditions leading to such a development prevail at the accident site. The other conclusion which is deemed to have be proven is the fact that fire services in charge of fire protection of the majority of tunnels mainly do not have adequate quantities of water and foam concentrate available at the accident site, which would enable them to successfully tackle a major fire upon their arrival. Outlines of a fixed foam firefighting system in a tunnel as well as the outline of a new standard testing procedure for comparing the characteristics of various types of FFFS have been presented. This proposal could be used as a basis for the development of standard procedure for testing of the applicability and efficiency of various stationary systems for fire extinguishment/suppression/control. Such a standard procedure is expected to become a

valuable tool capable of providing experimental evaluation and comparison of the capabilities of waterspray, foam and watermist systems at the representative fire scenarios. It has been proposed that further research work, mainly experimental, should be initiated and encouraged on the European level, which would open the way to development of the optimal safety and financially acceptable solutions for preventing and/or resolving the majority of potentially catastrophic accident events.

Predgovor

Problematika tunelskih požara zainteresirala me je neposredno nakon katastrofalnih požara koji su se godine 1999. dogodili u tunelima Mt Blanc i Tauern. Kao čovjeku tehničke i požarne struke, nikako mi nije bilo prihvatljivo da u požaru život izgube deseci ljudi i nastanu direktne štete koje se mjere desecima, pa i stotinama miliona Eura, da vrlo vrijedni i nužno potrebni infrastrukturni objekti kao što su veliki tuneli ostanu izvan uporabe mjesecima, a da je pritom sve bilo normalno i da nitko nije odgovoran za propuste. Na temelju izvještaja i radova koji su tada bili objavljeni, zaključio sam da je bez stacionarnog sustava za gašenje/supresiju/kontrolu praktički nemoguće spriječiti razvoj požara prema katastrofalnom ishodu, ako za takav razvoj postoje povoljni uvjeti na požarištu. Ne znajući za japanska iskustva sa sprinkler sustavima, o tome sam objavio 2 članka u stručnoj literaturi, godine 2000. u Hrvatskoj i godine 2001. u Sloveniji, u kojima sam tehničkim argumentima osporio sve „rezervacije“ i odbojnost „tunelske zajednice“ prema ugradnji stacionarnih sustava za gašenje požara, koje su u to doba zagovarale najznačajnije svjetske organizacije u zaštiti od požara tunela: američka NFPA National Fire Protection Association i svjetski PIARC, Permanent International Association of Road Congresses. Uvjeren da će katastrofalni požar u tunelu praktički uvijek uključivati izgaranje zapaljivih tekućina, predložio sam ugradnju deluge sustava s pjenom, smatrajući ga optimalnim za ispunjavanje sigurnosnih zahtjeva u najvećem broju slučajeva.

Godine 2007., kada sam odlučio napraviti još jedan korak u znanstvenom napredovanju, sjetio sam se, nakon jednog PIARC kongresa održanog u Zagrebu, da bi pitanje zaštite od požara u cestovnim tunelima mogla biti prikladna tema, te prijavio disertaciju pod naslovom *Analiza mjera za sprječavanje katastrofalnog požara u cestovnim tunelima*. Na tom je kongresu još uvijek bila vrlo zastupljena teza o neprikladnosti i neprimjerenosti stacionarnih sustava za gašenje u cestovnim tunelima, pa sam prijavljenu temu disertacije shvatio i kao osobni izazov. Posljednjih se nekoliko godina situacija znatno promijenila, te se stručna „tunelska javnost“ dobrim dijelom počela priklanjati ideji o prednostima stacionarnih sustava, mada je europski trend pretežno usmjeren prema relativno novoj ideji uporabe vodene magle, a ne prema (vjerojatno) jednostavnijem i učinkovitijem sustavu raspršene vode ili pjene. Uspoređivanjem podataka s različitih testova i požarnih akcidenata došao sam do zaključka da neki od možda najutjecajnijih svjetskih požarnih testova nisu bili izvedeni potpuno objektivno, da su neka istraživanja izvedena nepotrebno, jer je već na prvi pogled iskusnom stručnjaku iz požarne struke trebalo biti jasno da neće dati praktične rezultate, da mnoga mjerenja s testova nije moguće međusobno usporediti i da će kruti zahtjevi nove europske direktive o sigurnosti tunela vjerojatno dovesti do ogromnih troškova koji će dati suboptimalne rezultata u sigurnosti ako se ništa ne promijeni. Ovdje treba istaknuti izrazitu multidisciplinarnost problema zaštite od požara u tunelu, koja se ponekad rezultira činjenicom da optimalna rješenja iz perspektive jedne struke ne moraju biti optimalna za tunel kao cjelinu.

Iako je u prijedlogu teme disertacije i u izvješću Stručnog povjerenstva bilo predviđeno da u okviru disertacije bude napravljen matematički model i eksperimentalna analiza katastrofalnog požara u cestovnom tunelu, to nije bilo moguće izvesti. Razlozi za to su izrazito stohastička priroda požara u poluzatvorenom prostoru tunela i nepostojanje prikladnog numeričkog modela za analizu interakcije između takvog požara i sustava za gašenje, kao i ogromnih troškova eksperimenata koje bi trebalo izvesti u pravom mjerilu budući da eksperimenti tunela koji uključuju gašenje požara u znatno umanjenom mjerilu ne

daju rezultate primjenjive za praksu. Stoga su zaključci izvedeni metodom analize svih dostupnih dosad izvedenih i publiciranih eksperimenata, te njihovom usporedbom sa stvarnim požarnim akcidentima koji su se dogodili u prošlosti. Temeljem tih zaključaka, u radu je u osnovnim crtama prezentiran stacionarni sustav za gašenje požara pjenom, koji po uvjerenju autora predstavlja optimalan odgovor na tražene zahtjeve sigurnosti, a isto tako i prijedlog općenitog požarnog testa za tunelske stacionarne sustave, koji bi se mogao iskoristiti za razvoj odgovarajućeg standarda za međusobnu usporedbu njihove učinkovitosti.

Zahvaljujem se mentoru, red. prof. dr. sc. Bernardu Franković, prije svega na neprestanom ohrabrivanju i poticanju moga rada i na mnogobrojnim korisnim primjedbama kojima mi je pomogao tijekom proteklih godina, kao i komentoru red. prof. dr. sc. Vladimiru Medici na iznimno detaljnom pregledu rada i korisnim sugestijama za poboljšanje njegove kvalitete. Članovima Povjerenstva za ocjenu disertacije, red. prof. dr. sc. Zmagoslavu Prelec, red. prof. dr. sc. Dubravki Bjegović (Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu) i izv. prof. dr. sc. Ivanu Polajnar (Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani) zahvaljujem se na vremenu koje su posvetili pregledu ovoga rada te na komentarima, sugestijama i uputama koje su osjetno doprinijele povećanju njegove kvalitete u završnoj fazi izrade.

Posebno se zahvaljujem mojoj dragoj supruzi Ančici, koja je s beskrajnim strpljenjem uredila tekst, slike, dijagrame i popis literature te s puno truda i pažnje ispravila mnogobrojne greške koje su mi se potkrale prilikom pisanja teksta.

Struktura doktorske disertacije

Ova disertacija podijeljena je na devet poglavlja s naslovima: *Uvod; Dosadašnja situacija u istraživanju tunelskih požara i ciljevi istraživanja; Europski projekti, Europska direktiva i usporedba s ostalim relevantnim standardima i preporukama; Opasni događaji u tunelima; Scenariji događanja; Utjecaj tehničkih mjera na rizične scenarije; Scenariji za vatrogasnu službu u slučaju akcidenta u tunelu; Rasprava i komentari; Zaključak.*

U *uvodnom poglavlju* objašnjeno je zbog čega cestovni tuneli predstavljaju bitan sastavni dio prometne infrastrukture. Veliki akcidenti u tunelima mogu uzrokovati poremećaj prometa na važnim nacionalnim i internacionalnim pravcima koji mogu potrajati mjesecima, pa čak i godinama, izazivajući ekonomske štete koje mogu dosegnuti milione, pa čak i milijarde Eura ako se u obzir uzmu svi nastali troškovi. U suvremenom društvu, unatoč političkom opredjeljenju prema ekološki prihvatljivijim alternativnim metodama transporta, kao što su npr. željeznički ili vodeni promet, stvarni podaci tijekom posljednjih desetljeća pokazuju da je cestovni promet u Europi postao apsolutno dominantan. Ipak, važnost cestovnih tunela nije ograničena samo na ekonomske pokazatelje. Razlozi gradnje nekog tunela mogu u zagađenim područjima uključivati i ekološke razloge, ili pak potrebu za povećanjem transportnog kapaciteta cestovne infrastrukture u zagušenim gradskim središtima. Da bi se ilustrirala važnost pronalaženja rješenja za bolje upravljanje tunelskim požarima u budućnosti, sastavljena je tablica s bitnim detaljima 33 najvažnija požarna akcidenta u cestovnim tunelima. Tu je istaknuta činjenica dobro poznata „tunelskoj zajednici": praktički ne postoji veliki požar tunela u kojem nije bio uključen jedan ili više HGV, odnosno u kojem nije došlo da izlijevanja znatne količine zapaljivih tekućina.

U drugom poglavlju, *Dosadašnja situacija u istraživanju tunelskih požara i ciljevi istraživanja,* prikazani su najvažniji eksperimenti izvedeni u cilju boljeg razumijevanja fenomena tunelskih požara i njihovi rezultati: počevši od Ofenegg (1965), preko Zwenberg, PWRI Japan, EUREKA Firetun, MTFVTP USA, 2nd Benelux tunela i Runehamar (2003). Neki od rezultata su kritički razmotreni, sa zaključkom da interpretacija rezultata pojedinih eksperimenata od strane autora eksperimenta nije uvijek bila do kraja znanstveno utemeljena. Ukratko su prezentirani eksperimenti gašenja/supresije izvedeni u Japanu između 1963-1985. godine. Ovi eksperimenti predstavljali su naime osnovu za uvođenje stacionarnih sustava za gašenje u dugim cestovnim tunelima Japana počevši od 1963. godine, što je rezultiralo s više od 80 takvih sustava do godine 2000. Iako se umanjeni modeli mogu uspješno koristiti za rješavanje mnogih tehničkih problema, modeliranje gašenja požara u tunelima izgleda da ne daje dovoljno pouzdane rezultate primjenjive za praktične probleme. U ovom su poglavlju prikazani i glavni ciljevi ovog istraživačkog rada. Možda najinteresantniji prilog ove disertacije predstavlja otkrivanje i definiranje razlike između tradicionalnog „ventilacijskog pristupa" i novog „vatrogasnog pristupa" u svrhu što boljeg upravljanja rizicima pri tunelskim požarima.

Treće poglavlje, *Europski projekti, Europska direktiva i usporedba s ostalim relevantnim standardima i preporukama,* započinje s činjenicom da je transeuropska cestovna mreža iznimno važna za europsko društvo, no da su se najteži tunelski požari u nedavnoj prošlosti dogodili upravo u Europi. To je bio razlog za iniciranja i izvođenje 8 europskih istraživačkih projekata posvećenih požarnoj sigurnosti u cestovnim tunelima tijekom protekle dekade. Jedan od rezultata tih projekata bilo je donošenje nove Direktive Europskog parlamenta i

Vijeća o minimalnim sigurnosnim zahtjevima za tunele u transeuropskoj cestovnoj mreži. Unatoč tome da su troškovi uvođenja ove EU Direktive procijenjeni na čak 2,6-6,3 milijarde Eura, neki od zahtjeva Direktive doimaju se kao suviše preskriptivni, što bi moglo rezultirati sub-optimalnim trošenjem raspoloživih sredstava. U opsežnoj tablici uspoređeni su minimalni sigurnosni zahtjevi EU Direktive, NFPA 502 standarda, PIARC preporuka i hrvatskog Pravilnika o minimalnim sigurnosnim zahtjevima za cestovne tunele. S posebnom pažnjom obrađeni su zahtjevi za hidrantsku mrežu, pa su prikazani, uspoređeni i kritički komentirani zahtjeva 8 različitih zemalja. Na sličan su način prikazani i uspoređeni zahtjevi jedina tri postojeća nacionalna dokumenta o stacionarnim vatrogasnim sustavima, pri čemu iskustva u Japanu imaju posebnu vrijednost. Zaključak da je svjetska „tunelska zajednica" tijekom mnogih godina bila usmjerena prema „ventilacijskom pristupu" potkrijepljen je činjenicom da su zahtjevi za vatrootpornošću tunelskih ventilatora u 6 prikazanih nacionalnih zahtjeva vrlo visoki, što je logična posljedica strategije sporog reagiranja na požar.

U četvrtom poglavlju, *Opasni događaji u tunelima,* konceptualno su prikazani opasni događaji (požar, ispuštanje toksičnih tvari, eksplozija). U suvremenoj analizi rizika korištenjem ALARP principa, svi se rizici dijele na tzv. zone beznačajnog, tolerantnog i netolerantnog rizika. Dok se beznačajni rizici normalno mogu zanemariti, a netolerantni rizici nikako ne mogu biti prihvatljivi, tolerantni rizici moraju se smanjiti na što nižu, ali razumno prihvatljivu razinu. Budući da su najveći rizici povezani s transportom opasnih tvari kroz tunele, najčešći rizični scenariji su „standardizirani" na međunarodnoj razini time što je odabrano i definirano 13 najvjerojatnijih reprezentativnih rizičnih scenarija. Na bazi ove klasifikacije, tuneli su podijeljeni u 5 kategorija rizičnosti prema rizičnosti transporta pojedinih tereta kojima je dozvoljen provoz kroz pojedine tunele.

U petom poglavlju, *Scenariji događanja,* detaljnije su analizirani opasni događaji (požar, ispuštanje toksičnih tvari, eksplozija). Najveća pažnja usmjerena je prema požarnim događajima. U uvjetima ventilacije i izgaranja u tunelu prikazane su moguće dosegljive snage požara (HRR) s različitim brzinama strujanja zraka i s različitim gorivima (krutim i tekućim). Analiziran je razvoj požara po pojedinim fazama, uključujući linearno, kvadratno i eksponencijalno modeliranje rasta. Prikazani su detalji svih primjenjivih standardnih projektnih požarnih krivulja, budući da se projekt mnogih požarno-sigurnosnih osobina tunela normalno bazira na nekoj od njih. Vjerojatno najutjecajniji parametar požara, toplinsko zračenje, jedan je od presudnih faktora u odnosu na uvjete izdržljivosti za korisnike tunela i za spasilačke službe. Ovaj parametar prikazan je s nekoliko točaka gledanja. Toplinska snaga uglavnom ovisi o vrsti i broju vozila koja izgaraju, dok pri požaru HGV odlučujući faktor za brzinu razvoja i za vršnu snagu požara postaje teret koji se prevozi. Stablo događanja jedan je od najkorisnijih alata pri procjeni rizika. Prikazan je po jedan primjer stabla događanja sa scenarijem prolivene lokve benzina i sa scenarijem ispuštanja propana. Vjerojatno najopasniji požarno-eksplozivni scenarij u tunelu čine BLEVE i VCE. Takav scenarij analiziran je temeljem općenito prihvaćenih empirijskih relacija, a njegova usporedba s jednim stvarnim BLEVE događajem ukazala je na mogućnost katastrofalnih posljedica u bilo kojem cestovnom tunelu. Učinak ispuštanja toksičnih tvari prikazan je u skladu s općenito prihvaćenim bazama podataka o toksičnosti. Pokazalo se da je razina rizika sa stanovišta normalnih korisnika tunela u ovom slučaju ekstremno visoka.

Šesto poglavlje, *Utjecaj tehničkih mjera na rizične scenarije,* bavi se međuovisnošću različitih tehničkih osobina instalacija u tunelu, snage požara i brzine rasta požara. Iako je klasični pristup upravljanju tunelskim požarima bio da se poveća brzina zraka u ventilaciji, kako bi se iz tunela uklonio dim i poboljšale šanse za preživljavanje korisnicima tunela,

posljednja istraživanja dokazala su da povećana brzina zraka sa sobom donosi i znatne negativne implikacije zbog mnogo bržeg razvoja požara. Jedan od najutjecajnijih faktora, koji dosad nije dobio dužnu pažnju, je relativni položaj točke paljenja u odnosu na glavnu masu gorućeg goriva i smjer strujanja zraka. Putem analize triju najtežih nedavnih tunelskih požara u Europi, ustanovljeno je da veliki požar može lako savladati čak i najbolji sustav ventilacije tunela. Ostali faktori koji utječu na širenje požara, posebice onog s tekućim gorivom, mogu biti širenje požara kroz kanalizacijski sustav i nagib površine kolnika. Scenariji rizika i vatrogasna strategija s krutim gorivom (klase A) i tekućim gorivom (klase B) mogu biti vrlo različiti. Dok je požar goriva klase A moguće ugasiti, supresirati ili kontrolirati primjenom čiste vode, požar zapaljive tekućine gotovo je nemoguće ugasiti bez primjene pjene. Opisani su različiti parametri primjene pjene i predložena je primjena AR film forming pjena, kao najfleksibilnijeg i najefikasnijeg medija u odnosu na polarne i nepolarne zapaljive tekućine. Tijekom posljednjih nekoliko godina porasla je popularnost stacionarnih sustava za gašenje/supresiju/kontrolu požara u Europi i u SAD. No dok su u Japanu i u Australiji zabilježena dobra iskustva s klasičnim sprinkler/deluge sustavima, europski tuneli uglavnom su se opremali sustavima vodene magle. Razlozi za ovo izgleda da su djelomice povezani i sa znatnim komercijalnim interesima većih dobavljača sustava i tehnologije vodene magle. Svaki od spomenutih sustava (sprinkler/raspršena voda, vodena magla) ima izvjesne prednosti i nedostatke, no nekoliko eksperimenata koji su nedavno izvedeni od strane neutralnih istraživača pokazali su znatne prednosti na strani klasičnog i jednostavnijeg sustava raspršene vode. Iako primjena pjene do sada nije doživjela posebnu popularnost, rezultati nekih od eksperimenata izvedenih u prošlosti ukazali su na iznimnu učinkovitost sustava raspršene pjene. Možda je najbolji dokaz učinkovitosti stacionarnih sustava za gašenje/supresiju/ kontrolu požara bio požarni akcident u tunelu Burnley u Melbourne godine 2007. Ovaj veliki akcident s nekoliko vozila u iznimno prometnom gradskom tunelu tijekom prometne „špice“ nije prerastao u katastrofu, već je zadržan unutar granica inicijalnog događaja bez ikakvih daljnjih žrtava. Ako se u tunel ne postavi nikakav stacionarni sustav, mobilni sustavi, koje koriste vatrogasci, ostaju prvo ali i posljednje sredstvo za rješavanje požara. Usporedba minimalnih zahtjeva za dovodom vode za različite požare vozila s protokom hidrantske vode koji traže propisi pokazala je da u slučaju požarnog akcidenta koji uključuje više HGV vatrogasci neće raspolagati dovoljnom količinom vode. Situacija s pjenilom je vrlo slična. Spora reakcija vatrogasne službe uzrokovana dugim pristupom do požara vjerojatno će još naglasiti negativan utjecaj ovih dviju činjenica.

U sedmom poglavlju, *Scenariji za vatrogasnu službu u slučaju akcidenta u tunelu*, analizirani su konceptualni scenariji djelovanja vatrogasne službe prema različitim gorivima. Tunelski požari u usporedbi sa standardnim strukturnim požarima traže znatno povećane napore od vatrogasne službe, a i stupanj ne/izvjesnosti uspjeha je povećan. U Hrvatskoj je problem pravovremenog dolaska vatrogasaca do tunelskog akcidenta djelomice riješen zapošljavanjem gotovo 200 profesionalnih vatrogasaca kod operatora tunela, stacioniranih uz portale tunela na domaćim autocestama. Iako je ovo rješenje bitno poboljšalo šanse za uspješno djelovanje u slučaju požara, ono je neizbježno dovelo i do znatnog povećanja operativnih troškova tunela. Ipak, veličina požara (*HRR*) koju prosječna vatrogasna postrojba može uspješno ugasiti se nije promijenila i ostaje između 20 i 30 MW.

U osmom poglavlju, *Rasprava i komentari*, raspravlja se o interakciji različitih sigurnosnih, napose požarno-sigurnosnih mjera, preventivnih i represivnih, uz isticanje činjenice da je trenutna akcija gašenja potencijalno velikog požara bitna ako se želi izbjeći tok događaja koji vodi prema katastrofi. Trenutna reakcija na požar može se ostvariti jedino putem FFFS, dok sljedeću najbolju opciju predstavlja vlastita vatrogasna postaja smještena u neposrednoj

blizini tunelskih portala. U drugome dijelu ovog poglavlja pod naslovom *Neke dileme i kritička promišljanja*, raspravlja se o nekoliko pitanja: o utjecaju eksperimenata u tunelima Ofenegg i Runehamar 2003. godine na daljnje shvaćanja požarnih događaja u „tunelskoj zajednici“, o požaru B klase i vatrogasnim medijima, o upitnim količinama pjenila u vatrogasnim vozilima i u stanicama za hitne slučajeve, o međusobnom odnosu između sustava sprinklera/raspršene vode i sustava vodene magle te o mogućnostima za uštede na troškovima tunelskih sigurnosnih sustava. Istaknuto je da bi relativna krutost i preskriptivna priroda Europske tunelske direktive mogli rezultirati prekomjernim troškovima primjene tih zahtjeva, ali sa suboptimalnim sigurnosnim poboljšanjima. U podpoglavlju pod nazivom *Konceptualni prijedlog FFFS*, u osnovnim je crtama prikazan stacionarni sustav pjene, koji autor smatra optimalnim za smanjenje vjerojatnosti katastrofalnog tunelskog požara na minimum. Posljednje podpoglavlje, *Konceptualni prijedlog požarnog testa FFFS sustava u tunelu*, prikazuje izgled žarišta i proceduru testiranja, čijom primjenom bi bilo moguće na objektivan način usporediti učinkovitost različitih FFFS u tunelu. Daljnji razvoj takvog testa predložen je u okviru europskog projekta COST IFER.

U *Zaključku* se ukratko sumira znanstveni doprinos ove disertacije te ističe da su potrebna daljnja eksperimentalna istraživanja FFFS za gašenje/supresiju/kontrolu požara, posebice takva koja će voditi prema praktičnim rezultatima koji će povećati razinu požarne sigurnosti cestovnih tunela, ali bez mogućih neproporcionalnih troškova za ljudsko društvo. Realne mogućnosti za daljnja istraživanja otvaraju se kroz europski projekt COST IFER.

Sadržaj

Sažetak		I
Predgovor		III
Struktura doktorske disertacije		V
Sadržaj		IX
1.	**Uvod**	1
2.	**Dosadašnja situacija u istraživanju tunelskih požara i ciljevi istraživanja**	11
2.1	Požarni eksperimenti u pravom mjerilu za bolje razumijevanja fenomena požara	12
2.2	Požarni eksperimenti u pravom mjerilu za procjenu učinkovitosti stacionarnih (sprinkler) sustava	28
2.3	Požarna ispitivanja tunelskih požara u umanjenom i u laboratorijskom mjerilu	29
2.4	Ciljevi i osnova istraživanja	31
3.	**Europski projekti, Europska direktiva i usporedba s ostalim relevantnim standardima i preporukama**	35
3.1	Europski projekti o sigurnosti tunela	35
3.2	Osnovni faktori sigurnosti i organizacije sigurnosti prema EU Direktivi	36
3.3	Usporedba zahtjeva EU Direktive, Pravilnika RH, NFPA 502 i PIARC	40
3.4	Neki nacionalni zahtjevi za sustave gašenja požara i otpornost opreme na toplinu	44
3.5	Iskustva s FFFS u Japanu	46
4.	**Opasni događaji u tunelima**	49
4.1	Procjenjivanje rizika i princip ALARP	51
4.2	Scenariji i vjerojatnost opasnih događaja	54
5.	**Scenariji događanja**	60
5.1	Požari u tunelima	60
5.1.1	Uvjeti ventilacije i izgaranja u tunelima	60
5.1.2	Razvoj požara u tunelu	66
5.1.3	Prijenos (širenje) požara	74
5.1.4	Utjecaj različitih načina ventilacije	76
5.1.5	Zračenje topline	80
5.1.6	Toplinska snaga požara u tunelu *(HRR)*	85
5.1.7	Utjecaj prometa i tereta na tunelski požar	88
5.1.8	Požar zapaljivih tekućina	91
5.2	Eksplozije zbog ispuštanja plina ili stvaranja para	92
5.2.1	BLEVE i VCE eksplozija	92
5.2.2	Opasnosti eksplozije oblaka para	95
5.3	Ispuštanje toksičnih tvari	100
6.	**Utjecaj tehničkih mjera na rizične scenarije**	103
6.1	*HRR* i ventilacija	103
6.2	Širenje požara kroz odvodne kanale (kanalizaciju)	108
6.3	Utjecaj nagiba kolnika	108
6.4	Gašenje/supresija požara zapaljivih krutina i tekućina	109
6.4.1	Neki rezultati ispitivanja na krutim tvarima (požar klase A)	110

6.4.2 Neki rezultati ispitivanja na zapaljivim tekućinama (požar klase B) – gašenje pjenom 114
6.4.3 Evaluacija i potvrđivanja podobnosti vatrogasnih pjena 117
6.5 Stacionarni sustavi za gašenje/supresiju (FFFS) 121
6.5.1 Slučaj tunela Burnley, Australija 137
6.5.2 Norme, standardi i preporuke za FFFS 139
6.6 Mobilni sustavi 142
6.7 Priručna vatrogasna oprema, osobna zaštitna oprema (OZO) i dodatna tehnička oprema 149

7. Scenariji za vatrogasnu službu u slučaju akcidenta u tunelu 152
7.1 Požarni scenariji s normalnim zapaljivim krutinama (ne opasnim) 154
7.2 Požarni scenariji s tekućim opasnim tvarima 155
7.3 Požarni scenariji sa zapaljivim plinovima 155
7.4 Požarni scenariji s toksičnim zapaljivim tvarima 156
7.5 Vatrogasna služba i djelovanje u tunelima 156

8. Rasprava i komentari 161
8.1 Uvodna razmatranja 161
8.2 Neke dileme i kritička promišljanja 165
8.3 Konceptualni prijedlog FFFS 173
8.4 Konceptualni prijedlog požarnog testa FFFS sustava u tunelu 178
8.4.1 Daljnji razvoj 182

9. Zaključak 183

Extended abstract 186
Preface 190
Literatura 192
Popis oznaka 213
Popis slika 215
Popis tablica 217
Prilozi 219
Rječnik manje poznatih termina u inženjerstvu sigurnosti i zaštite 221
Popis kratica 227
Životopis 229
Podaci o autoru i o doktorskoj disertaciji 231

1. Uvod

U današnjoj civilizaciji, tuneli su podzemne i/ili podvodne građevine koje olakšavaju i/ili skraćuju promet ljudi i/ili materijala između dviju geografskih točaka na Zemlji između kojih postoji neka prirodna ili umjetna zapreka, a uobičajeno se po funkciji dijele na:

- pješačke,
- cestovne,
- željezničke,
- metro (za gradsku podzemnu željeznicu), što su sve prometni tuneli u užem smislu, i
- ostale (rudarske, za transport vode, postavljanje cjevovoda, kabela i sl.).

Iako cestovni, željeznički i metro tuneli imaju znatne međusobne sličnosti, u ovome radu pažnja će biti usmjerena gotovo isključivo na cestovne tunele, dok će se oni ostali (željeznički i metro) spomenuti samo iznimno, ako su neki od njihovih parametara posebno zanimljivi za razmatranje cestovnih tunela ili prometnih tunela općenito. U skladu s naslovom disertacije, u radu će se obraditi mjere za prevenciju katastrofalnog požara u cestovnim tunelima, napose glede mogućnosti primjene stacionarnih sustava za gašenje/supresiju/kontrolu požara i analizirati granice mogućnosti intervencija vatrogasnih postrojbi.

U smislu propisa, normi i/ili tehničkih preporuka termin „cestovni tunel“ može u različitim dokumentima biti definiran na različite načine, koji su najčešće vezani s njegovom duljinom, poprečnim presjekom ili namjenom. Za svrhu ovoga rada, ovaj se termin definira na sljedeći način:

Cestovni tunel je umjetni zatvoren i nadsvođen prolaz, izgrađen uklanjanjem i/ili uvođenjem materijala, koji omogućava gibanje cestovnih motornih vozila putem koji je dulji od xx[1] *metara, kojima su ulaz i izlaz mogući jedino kroz portale građevine.*

Ako u tekstu nije posebno navedeno nešto drugo, cestovni će se tunel u pravilu navoditi samo riječju „tunel“. Tunel može prolaziti kroz planinu, ispod vode ili biti urbanog tipa. Široka gradnja i uporaba prometnih tunela započela je prije više od 150 godina, a njihove dimenzije, prvenstveno poprečni presjek i duljina, postaju protekom vremena i razvojem civilizacije, sve veće. Tuneli danas čine ključne dijelove nacionalne i međunarodne transportne mreže, posebno u planinskim područjima, npr. Laerdal u Norveškoj (24 510 m, 2000.) i St. Gotthard u Švicarskoj (16 918 m, 1980.). U gradnji tunela ne zaostaje niti Hrvatska, u kojoj je nakon već davno sagrađenog tunela Učka (5 062 m, 1981.) posljednjih godina sagrađeno još nekoliko dugačkih tunela, kao npr. Mala Kapela (5 821 m, 2005., druga cijev 5 780 m, 2009.) i Sv. Rok (5 678 m, 2003., druga cijev 5 670 m, 2009.)[2] [1]. Već prije nekoliko desetljeća započelo je korištenje tunela za spajanje vrlo udaljenih geografskih točaka ispod rijeka i mora, npr. Channel (Eurotunnel), Francuska/Velika Britanija (željeznički, 50 450 m, 1994.) i Seikan tunel Japan (željeznički, 53 850 m, 1988.), mada se općenito smatra da mostovi predstavljaju ekonomičniji način za povezivanje kopna iznad vode. Posljednjih godina, tuneli su se počeli koristiti i kao alternativa nadzemnim cestama u ekološki osjetljivim zonama, npr. Stonehenge [2], kao i za povećanje protočnosti gradskog prometa, npr. Central Artery/Tunnel

[1] Duljina xx ovisi o pojedinom dokumentu koji definira prometne tunele (propis, norma ili preporuka).
[2] Svi podaci o duljinama tunela su iz [1].

Project (Boston, 2007., najskuplji tunelski projekt u svijetu, popularno nazvan Big Dig, 14,6 milijardi USD) [3].

S gledišta suvremene ekonomije, Greenwood i sur. [4], tuneli su esencijalni elementi prometne infrastrukture, koji pružaju značajne uštede vremena i troškova u usporedbi sa sljedećom najboljom alternativom. Oni olakšavaju trgovinu i pridonose učinkovitom funkcioniranju internog tržišta, na koje utječu tako što:

- radnike približavaju njihovim radnim mjestima,
- trgovačka društva približavaju njihovim dobavljačima i tržištima proizvoda i usluga,
- trgovačkim društvima daju pristup širem tržištu rada.

Europska ekonomija danas je u značajnoj mjeri oslanja na održivom razvoju prometnog sustava. Ključni element toga sustava je transeuropska cestovna mreža[3] s nizom tunela, kao kapitalnim objektima cestovne infrastrukture. Sve veća se pažnja poklanja i tunelima u urbanim područjima, budući da je u gradskoj prometnoj infrastrukturi korištenje podzemnih građevina najčešće još jedini preostali koridor za proširenje rastućeg prometa. Uz nesumnjive prednosti denivelacije prometnih tokova i njihovog usmjeravanja kroz tunele, javlja se i niz problema vezanih uz sigurnost i zaštitu putnika te stabilnost i zaštitu same građevine i okolnih objekata. Važnost zaštite od požara posebno je izražena kod prometno visoko opterećenih gradskih tunela, Bjegović i sur. [5].

Povišenje stupnja sigurnosti tunela rezultira širokim rasponom benefita. Prema [4], požari i općenito veći akcidenti u tunelima izazivaju direktne troškove kroz nastalu štetu i zatvaranje, ali istodobno ugrožavaju ljudske zajednice i tržišta koja su vezana na tunele. Tunelski požari odsijecaju tvrtke od njihovih kupaca i dobavljača, radnike od njihovih poslova, a na alternativnim prometnim pravcima najčešće dolazi do gužvi, gubitka vremena i novca, povećanog zagađivanja okoliša, nezadovoljstva okolnog stanovništva i povećanog rizika od akcidenata. Povećanjem sigurnosti prometovanja tunelima, odnosno smanjivanjem rizika požara i drugih akcidenata u njima postižu se dvije vrste benefita, direktni i indirektni. Među direktne benefite mogu se svrstati:

- izbjegavanje povreda i gubitka života,
- izbjegavanje gubitaka u proizvodnji zbog povreda,
- izbjegavanje troška zbog oštećenja građevine i njene rekonstrukcije,
- izbjegavanje troška intervencijskih službi i medicinskih troškova,
- izbjegavanje dodatnog vremena putovanja uzrokovanog korištenjem alternativnih pravaca tijekom perioda zatvaranja i/ili smanjene funkcionalnosti tunela (npr. zatvaranja jedne trake),
- nema smanjivanja prihoda operatora tunela zbog zatvaranja,
- izbjegavanje znatnih ekonomskih poremećaja do kojih može doći zbog zatvaranja tunela,
- smanjenje premije osiguranja.

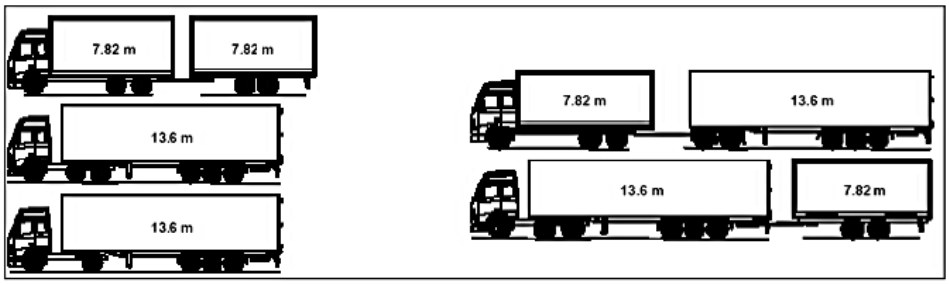
Indirektne ili sekundarne posljedice više sigurnosti mogu također imati značajan društveni i ekonomski učinak. Tako npr.:

- predodžba javnosti o smanjenom riziku može povećati promet kroz tunele i potaknuti ekonomsku aktivnost, jer će se koristiti kraći i efikasniji pravci kroz tunele,
- smanjit će se zagađivanje okoliša (emisije CO_2 i ostalih polutanata) i potrošnja goriva.

[3] Trans-European Road Network, često skraćeno u TERN.

Požari u tunelima privukli su tijekom posljednja dvaju desetljeća posebnu pozornost javnosti i znanstvenika zbog nekoliko katastrofalnih požara u Europi, u kojima je smrtno stradao relativno veliki broj ljudi. Nakon ovih požara, koji su osim žrtava prouzrokovali velike direktne i indirektne materijalne štete, tuneli su ostajali zatvoreni mjesecima, pa čak i godinama (Mt Blanc). U tablici 1.1 prikazani su samo najinteresantniji požari, dok se potpuna lista može naći u referencama. Pored velikih troškova popravka, rekonstrukcije i unapređenja sigurnosti prometa u tim tunelima, još su se veći troškovi pojavili zbog dugotrajnog skretanja prometa s uobičajenih optimalnih ruta i kao izostanak prihoda operatora. Iako je frekvencija požara u tunelima relativno niska, pa Haack tako npr. za tunel St. Gotthard u Švicarskoj, kao jednog od tipičnih predstavnika transalpskih tunela, navodi prosječnu frekvenciju od 4 požara na 10^8 prevezenih kilometara [6], apsolutna sigurnost ne postoji[4] [7].

Zbog čestog spominjanja termina HGV u daljnjem tekstu i zbog izbjegavanja potrebe da se pojam tipičnog HGV objašnjava na pojedinačnim slučajevima, u ovom su odlomku priložene osnovne informacije o HGV. Geometrijske dimenzije teretnih vozila u Europi regulirane su EU Direktivom 96/53/EC, koja daje maksimalne dozvoljene dimenzije, što se primjenjuje i na vozila koja se koriste u nacionalnom prometu. Najveća dozvoljena duljina iznosi 18,75 m, a najveća dozvoljena širina je 2,55 m (2,60 m za vozila-hladnjače). Ograničenja visine (4,0 m) i mase (44 t) za međunarodni promet ne odnose se na nacionalni promet.
Neke zemlje (npr. Švedska i Finska) izuzete su od primjene ove direktive, pa dozvoljavaju da teretna vozila s prikolicama imaju maksimalnu duljinu do 25,25 m i visinu do 4,50 m. Tipične kombinacije teretnih vozila i vozila s prikolicama prikazane su na slikama 1.1 i 1.2 uključujući i ona mase do 44 t i duljine do 18,75 m (dozvoljena u cijeloj EU), odnosno mase do 60 t i duljine do 25,25 m (dozvoljena samo u nekim zemljama EU). Tipični HGV duljine 16,60 m, s unutarnjim tovarnim prostorom širine 2,45 m i visine 2,50-3,00 m ima kapacitet od najviše 34 Euro-palete.



Slika 1.1. Tipične kombinacije HGV s i bez prikolica u Švedskoj i Finskoj

Slika 1.2. Tipični HGV kakav se koristi u cijeloj Europi. Gornja ploha i obje bočne strane tereta pokrivene su ceradom

[4] "Absolute safety in any sphere of human endeavour is impossible and it would be imprudent not to take account of the possibility of a major accident, however remote" [7].

Tablica 1.1. Značajni požari u cestovnim tunelima [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14][5]

Datum	Tunel, duljina	Lokacija	Vozilo gdje je požar započeo	Vjerojatni uzrok požara	Trajanje	Posljedice za		
						Ljude	Vozila	Građevinu i instalacije
1949.05.13	Holland, 2550 m	New York, USA	1 HGV[6] s teretom od 11 t CS_2	Teret pao s kamiona, eksplozija	4 h	66 ozlijeđenih (dim)	10 HGV, 13 automobila	Ozbiljna oštećenja 200 m
1974.01.23	Mt Blanc, 11600 m	Francuska/Italija	1 HGV	Požar motora	15 min	1 ozlijeđeni		
1978.08.11	Velsen, 770 m	Velsen, Nizozemska	2 HGV, 4 automobila	Sudar, prednji-stražnji kraj	1 h 20 min	5 mrtvih, 5 ozlijeđenih	4 HGV, 2 automobila	Ozbiljna oštećenja 30 m
1979.07.11	Nihonzaka, 2045 m	Shitzuoka, Japan	4 HGV, 2 automobila	Sudar, prednji-stražnji kraj	159 h	7 mrtvih, 2 ozlijeđenih	127 HGV, 46 automobila	Ozbiljna oštećenja 1100 m
1980.04.17	Kajiwara, 740 m	Japan	1 kamion (4 t) s 3600 L boja	Udar u bočni zid i prevrtanje	1 h 20 min	1 mrtav	1 kamion, 4 t; 1 kamion 10 t	Oštećenja 280 m
1980.07.15	Sakai, 459 m	Japan	1 HGV	Sudar	3 h	5 mrtvih, 5 ozlijeđenih	10 vozila	
1982.04.07	Caldecott, 1028 m	Oakland, USA	1 automobil, 1 bus, 1 tanker s 33000 L benzina	Sudar, prednji-stražnji kraj	2 h 40 min	7 mrtvih, 2 ozlijeđenih	3 HGV, 1 autobus, 4 automobila	Ozbiljna oštećenja 580 m
1982.11.02	Salang, 2600 m	Afganistan	Autocisterna s benzinom	Vojni konvoj		176-više stotina ?	Mnogo	
1983	Pecorila, 662 m	Autoput A10, Italija	Kamion s ribom	Sudar, prednji-stražnji kraj		9 mrtvih, 22 ozlijeđenih	10 automobila	Laka oštećenja
1983.02.03	Frejus, 12868 m	Modane, Francuska-Italija	1 HGV s tovarom plastičnih materijala	Lom mjenjača	1 h 50 min	bez	1 HGV	Ozbiljna oštećenja 200 m
1986.09.09	L' Arme, 1100 m	Nica, Francuska	1 kamion s prikolicom	Sudar, velika brzina		3 mrtvih, 5 ozlijeđenih	1 kamion, 4 automobila	Umjerena šteta na opremi
1987.02.18	Gumefens, 340 m	Bern, Švicarska	1 HGV	Klizanje na cesti, sudar	2 h	2 mrtvih	2 HGV, 1 furgon	Laka oštećenja
1990.01.11	Mt Blanc, 11600 m	Francuska-Italija	HGV s 20 t pamuka	Motor		2 ozlijeđenih	1 HGV	Umjerena šteta na opremi
1993.	Serra Ripoli, 442 m	Autoput A1, Italija	Automobil i HGV s rolama papira	Sudar nakon gubitka kontrole nad vozilom	2 h 30 min	4 mrtvih, 4 ozlijeđenih	5 HGV, 11 automobila	Laka oštećenja
1993	Frejus, 12868 m	T2, Francuska/Italija	1 HGV	Požar motora	2 h	bez	1 HGV	
1994.02.27	Huguenot, 3914 m	Južna Afrika	Autobus s 45 putnika	Greška na elektrici	1 h	1 mrtav, 28 ozlijeđenih	1 autobus	Ozbiljna oštećenja instalacija
1994.07.05	St. Gotthard, 16322 m	Goeschenen, Švicarska	1 HGV s prikolicom natovaren sa 750 bicikala zamotanih u karton i plastiku	Trenje kotača	2 h	bez	1 HGV s prikolicom	Ozbiljna oštećenja stropa, pločnika i opreme 50 m, zatvoren 2,5 dana

[5] Među pojedinim referencama ima manjih razlika u podacima. Usvojeni su oni podaci koji su autoru izgledali najvjerodostojniji.

[6] HGV (Heavy Goods Vehicle) je bio tradicionalni naziv u Velikoj Britaniji za teretno vozilo ukupne mase > 3,5 t (noviji naziv LGV – Large Goods Vehicle). Uporaba ove kratice proširila se po cijelome svijetu (uključujući zemlje kontinentalne Europe), pa se s HGV danas često označavaju sva teretna vozila mase > 3,5 t. U daljnjem tekstu koristi se termin HGV, iako postoji velika razlika između kamiona ukupne mase 3,5 t i teškog kamiona-tegljača mase > 40 t.

Datum	Tunel, duljina	Lokacija	Vozilo gdje je požar započeo	Vjerojatni uzrok požara	Trajanje	Posljedice za		
						Ljude	Vozila	Građevinu i instalacije
1995.04.10	Pfänder, 6719 m	Austrija	Kamion s prikolicom	Sudar	1 h	3 mrtvih, 4 ozlijeđenih	1 kamion, 1 furgon, 1 automobil	Ozbiljna oštećenja
1996.03.18	Isola delle Femmine	Palermo, Italija	1 autocisterna s ukapljenim plinom, 1 mali autobus	Autobus udario u stražnji kraj autocisterne (stojeće zbog prethodnog sudara)		5 mrtvih, 20 ozlijeđenih	1 autocisterna, 1 autobus, 18 automobila	Ozbiljna oštećenja obloge i rasvjete, zatvoren 2,5 dana
1997.10.31	St. Gotthard	Švicarska	1 HGV natovaren automobilima	Požar motora	1 h 20 min	bez	1 HGV	Ozbiljna oštećenja (100 m)
1999.03.24	Mt Blanc, 11600 m	Francuska-Italija	Požar započeo na HGV s brašnom i margarinom	Istjecanje diesel goriva iz motora	53 h	39 mrtvih	23 HGV, 10 automobila, 1 motocikl, 2 vatrogasna kamiona	Ozbiljna oštećenja (900 m), tunel otvoren 22.12.2001.
1999.05.29	Tauern, 6401 m	Autoput A10, Salzburg-Spittal, Austrija	Kamion s bojama/ lakovima (sprej doze)	Sudar 4 automobila i 2 HGV, prednji-stražnji kraj	15 h	12 mrtvih, 49 ozlijeđenih	14 HGV, 26 automobila	Ozbiljna oštećenja (500 m), zatvoren 3 mjeseca
2000.07.14	Seljestads, 1272 m	E134, Drammen-Haugesund, Norveška	Kamion-tegljač, požar diesela u motoru prije sudara	Sudar prednji-stražnji kraj 1 kamion, 4 automobila	45 min	6 ozlijeđenih	1 kamion, 6 automobila, 1 motocikl	Ozbiljna oštećenja, zatvoren 1,5 dana
2001.05.28	Prapontin, 4409 m	Autoput A32, Torino-Bardonecchia, Italija	Kamion natovaren repom	Mehanički kvar		19 ozlijeđenih od dima		Zatvoren do 6.6.2001.
2001.08.06	Gleinalm, 8320 m	Autoput A9, pored Graza, Austrija	Automobil	Sudar kamiona i automobila		5 mrtvih, 4 ozlijeđenih	1 kamion, 1 automobil	
2001.10.24	St. Gotthard, 16322[7] m	Autoput A2, Švicarska	Sudar 2 HGV	Sudar	2 dana	11 mrtvih	13 HGV, 4 furgona, 6 automobila	Ozbiljna oštećenja (230 m), dodatna oštećenja 700 m, zatvoren 2 mjeseca
2003.11.10	Flöfjell, 3100 m	Norveška	Požar automobila proširio se na oblogu tunela	Udar automobila o zid		1 mrtav	1 automobil	
2004.04.14	Baregg, 1390 m	Autoput A1, Švicarska	Sudar kamiona i kolone vozila	Udar HGV u posljednje vozilo		1 mrtav, 5 ozlijeđenih	2 HGV, 1 automobil	
2005.06.04	Freéjus, 12868 m	T2, Francuska/Italija	1 HGV gume, 1 HGV sir, 1 HGV otpad, 1 HGV ljepilo	Istjecanje goriva iz HGV s gumama	6 h	2 mrtvih, 21 ozlijeđenih od dima	4 HGV, 3 vatrogasna vozila	10 km opreme trebalo je popraviti
2006.09.16	Viamala, 742 m	Autoput A13, Švicarska	Požar autobusa	Sudar automobila i autobusa	4 h	9 mrtvih, 5 ozlijeđenih	2 automobila, 1 autobus	
2007.03.23	Burnley, 2900 m	Melbourne City Link, Australija	Sudar automobila i HGV	Požar zbog sudara	1 h	3 mrtvih, 2 ozlijeđenih (u sudaru)	4 HGV, 7 automobila	Ponovno otvoren za 4 dana
2007.09.10	San Martino, 4800 m	SS 36, Italija	Požar kamion	Udar kamiona o zid		2 mrtvih, 137 ozlijeđenih		
2007.10.12	Santa Clarita, 183 m	Autoput I-5, Los Angeles, USA	Požar HGV	Lančani sudar HGV	24 h	3 mrtvih, 10 ozlijeđenih	28 HGV, 1 automobil	Ozbiljna oštećenja, otvoren 15.11.2007.

[7] Stvarna duljina tunela je 16322 m, no daljnjih 596 m autoputa pokriva zatvorena galerija, pa je ukupna duljina 16918 m.

Vozila-tegljači pokrivena ceradom uobičajena su u Europi, ali u nordijskim zemljama zbog klime nisu česta. Tu se češće koriste vozila sa čvrstim „sanducima". Stijenke i krov ovih sanduka obično se izrađuju od sendvič-panela ukupne debljine 20 mm, gdje se za vanjske obloge koriste plastične ploče debljine 2 mm, a unutrašnjost čine šperploča, poliuretan (PU) ili ekspandirani polistiren (EPS). Sendvič-paneli su uloženi u kostur od aluminijskih profila i međusobno spojeni lijepljenjem. Za transport hrane i drugih proizvoda koji zahtijevaju niske temperature, stijenke i strop takvih sanduka obično imaju unutarnju jezgru od EPS debljine 45-55 mm.
Dimenzije i kapacitet kamiona-tegljača za transport suhog i pakiranog tereta, neosjetljivog na temperaturu su tipično:

- duljina: 13,60 m,
- širina (unutarnja): 2,45-2,50 m,
- visina(unutarnja): 2,50-3,00 m,
- kapacitet: do 34 europalete.

Opseg prometa kroz cestovne tunele prikazuje tablica 1.2, sastavljena na temelju podataka iz [15], u kojoj je po pojedinim državama prikazan broj cestovnih tunela, njihova ukupna duljina, prosječan dnevni promet vozila i prosječna putna duljina koju vozila dnevno prevale. Većina dugačkih tunela očigledno je locirana u planinskim zemljama kao što su Norveška, Italija i Japan. Ipak, gustoća prometa znatno varira po zemljama, pa po volumenu prometa prednjače zemlje kao što su Italija, Francuska, Švicarska, Njemačka, Austrija i Norveška.

Tablica 1.2. Broj cestovnih tunela i gustoća prometa po zemljama [16][8]

Zemlja	**Broj tunela s $L > 1$ km**	**Ukupna duljina tunela, ΣL, km**	**Prosječan *AADT*[9], vozila/dan**	**Gustoća prometa u tunelima ($AADT \cdot \Sigma L$), 10^6 vozila·km/dan**
Italija	177	340		> 40
Francuska	46	133	20620	27
Švicarska	67	162	16690	27
Njemačka	38	69	38670	27
Austrija	55	177	11220	20
Norveška	199	522	3500	18
Španjolska	25	58	9450	5
V. Britanija	7	13	32390	4
Hrvatska	9[10]	27	5680	2
Turska	8	17		2
Belgija	7	11		2
Rusija	5	13		2
Nizozemska	4	11	13000	1
Švedska	3	7	19730	1
Japan (procjena)	100	300		> 50
SAD	41	72		> 15

Potpuno suprotno od najava političara i želja „zelenih", prema podacima OECD [17], udio željeznice u ukupnom prometu uporno pada već 30-ak godina, dok istodobno udio cestovnog

[8] Zbrajanjem podataka iz tablice 1.2 može se ustanoviti da je 2005. godine u Europi ukupno bilo 650 tunela duljih od 1 km, a njihova ukupna duljina bila je 1560 km.
[9] *AADT*, akronim od Average Annual Daily Traffic, prosječan godišnji dnevni promet [vozila godišnje/365]. U Hrvatskoj se koriste termini „prosječan godišnji dnevni promet" (PDGP) kroz tunel po prometnoj traci na dan (svako motorno vozilo je jedna jedinica) i „prosječan sezonski dnevni promet" (PLDP), [18].
[10] Ukupni broj tunela duljine > 1 km u Hrvatskoj danas je 15, a time je i ukupna duljina znatno veća. Noviji podatak o *AADT* nije bio raspoloživ.

prometa raste. Cestovni promet, mjeren ukupnom udaljenošću koju su prevalila motorna vozila u zemljama OECD[11], povećao se od 1980. do 1998. godine za 72%, dok se do 2020. godine očekuje daljnji porast od približno 40%. Ovaj se trend dobrim dijelom može pripisati razvoju cestovnog teretnog prometa, koji je proteklih desetljeća bio dodatno potaknut ekonomskim rastom, liberalizacijom trgovine, padajućim transportnim troškovima i manjim zahtjevima za infrastrukturnim ulaganjima nego što je to slučaj u željezničkom, vodnom ili zračnom prometu. Posebno je brz bio porast teretnog prometa, pa je npr. već 1998. udio teretnog prometa u tunelu Mt Blanc bio oko 40% ukupnog prometa. Ukupna masa prevezene robe danas je tri puta veća nego u ranim 1970-ima, čemu je, između ostalog, pridonio i dramatičan porast relativnog udjela cestovnog teretnog prometa. Dok se danas 75% ukupnog robnog transporta obavlja cestama, udio željeznice približio se prema 8% (21,1 % manje nego godine 1970.). Prema projekcijama Europske komisije, on će se do 2010. smanjiti na 7% ako se u međuvremenu ništa ne učini.

Gotovo identične podatke iznosi i Thamm [19], koji također navodi udio od oko 75% robnog prometa u cestovnom prometu, s prognozom od 40-60% njegovog povećanja u sljedećih 10 godina.

U neposrednom susjedstvu RH, u Italiji, navodi se da se oko 80% roba doprema cestovnim prometom, za čiji se opseg do 2010. predviđa porast od 30% [20]. Jasno je stoga da je sigurnost i učinkovitost cestovnog prometa, koji bitno ovisi o korištenju tunela na autoputovima, važan strateški cilj.

Prema Greenwood i sur. [4], transalpski prometni pravci sa svojim tunelima skupno čine jedan od najznačajnijih sustava tunela u Europi, a statistički podaci pokazuju značajne promjene u njihovoj uporabi. Najznačajnija promjena je da se opseg prometa povećao za nekoliko puta u svega 16 godina, a da je istodobno udio tereta prevezenog željeznicom osjetno smanjen.

- U godinama od 1984. do 2000., broj teretnih vozila koja su koristila velike transalpske tunele u Švicarskoj, Francuskoj i Austriji povećao se redom za 3,3, 2,6 i 2,5 puta.
- Od 1980. do 2000. godine, volumen transalpskog tereta prevezenog kroz tunele povećao se sa 49,4 miliona tona godišnje na 133,0 miliona tona, što je povećanje od 2,7 puta.
- U istom je periodu udio tereta prevezenog kroz željezničke tunele pao s 54% na 33%.

U skladu s tim podacima, očekuje se da će opseg gradnje novih prometnih tunela svih vrsta u sljedećih 10-15 godina doseći 2100 km u Europi i 2350 km u Aziji [21].

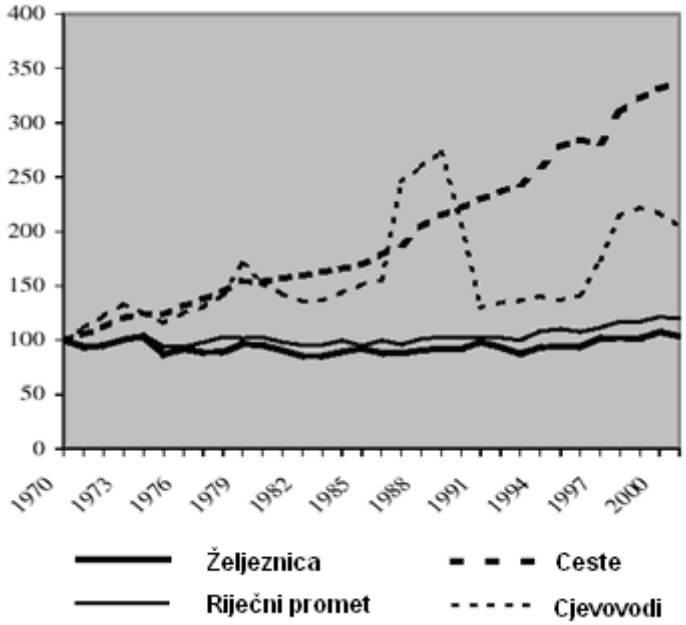
Podaci o snažnom porastu teretnog prometa ukazuju dalje na povećani rizik od velikih požara u cestovnim tunelima, gdje dovoljna količina „goriva“ za nastanak katastrofalnog požara redovito potječe od teških kamiona i njihovih tereta. Činjenica je naime, da katastrofalnog požara u tunelu, koji uključuje veći broj smrtnih žrtava i veliku materijalnu štetu, praktički nema bez sudjelovanja HGV u požaru [22]. Pritom treba spomenuti da se željeznički tuneli smatraju relativno sigurnima za promet, da posljednjih godina u njima nisu zabilježene ljudske žrtve i da npr. reosiguravatelj Munich Re procjenjuje da je vjerojatnost izbijanja požara u cestovnim tunelima oko 20 puta veća nego u željezničkima.

[11] OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development.

Činjenica je da najveći broj požara u cestovnim tunelima započinje „samozapaljenjem“ vozila, tj. bez ikakvog akcidenta. Unatoč tome, svi poznati požari u kojima je bilo smrtnih posljedica, nastali su kao rezultat akcidenta, sa samo jednom, iako značajnom iznimkom požara u tunelu Mt Blanc [23]. Iako tablica 1.1. nije sastavljena po sasvim precizno definiranim kriterijima niti na posve strukturirani način, uočljivo je da od 33 akcidenta koji su njome obuhvaćeni, u njih 30 sudjelovao je barem jedan HGV, u dva su sudjelovali autobusi, a svega u jednom samo osobni automobili. Ipak, bez veće količine razlivenih tekućih ugljikovodika, gotovo je nemoguće zamisliti brz razvoj katastrofalnog požara veće snage.

Osim stradanja ljudi, pri čemu se smrtne žrtve, ozljede i patnje vrlo teško mogu materijalno izraziti, katastrofalni požari uključuju i ogromne iznose isključivo materijalne štete. Tako Brekelmans [24] navodi sljedeće štete (obuhvaćeni su troškovi popravka i izgubljeni prihod):

- Eurotunel 1996. (željeznički), cca 600 miliona Eura,
- Tunel Mt Blanc 1999., cca 450 miliona Eura,
- Tauern tunel 1999., cca 50 miliona Eura.



Slika 1.3. Trendovi u teretnom prometu (tone-kilometri), Zap. Europa, 1970=100 [16]

Prema Greenwood i sur. [4], akcidenti koji su se dogodili proteklih godina privukli su pažnju i zbog pratećih troškova. Direktni troškovi popravaka i preuređenja tunela nakon nedavnih požara procijenjeni su na 210 miliona Eura godišnje, no tome treba pribrojiti i ostale troškove. Trošak koji je požar tunela Mt Blanc izazvao u talijanskoj ekonomiji procijenjen je na 350-450 miliona Eura godišnje[12] i oko 500 miliona Eura godišnje (u dva različita izvještaja).

Khoury [25] pak navodi da je samo financijska vrijednost direktne štete i izgubljenih prihoda zbog požara u Eurotunelu (bez društveno-ekonomskog utjecaja) iznosila oko 200 miliona GBP. No ukupna šteta zbog širih društveno-ekonomskih utjecaja požara u tunelima mnogo je veća od direktne štete, pa je tako samo talijanska ekonomija prema procjeni nadležnog Ministarstva industrije tijekom gotovo 3-godišnjeg zatvaranja tunela Mt Blanc pretrpjela štetu koja je procijenjena na 2,6 milijarde Eura.

[12] Tunel Mt Blanc bio je zatvoren 2 godine i 9 mjeseci.

Promat [26] štete od požara na tunelu Mt Blanc specificira kao: trošak popravka 206 miliona Eura, ekonomska šteta 250 miliona Eura i negativni efekti na lokalnu talijansku ekonomiju u zoni tunela 1,75 milijarde Eura.

Pri požaru u tunelu Burnley u Australiji, zbog zatvaranja tunela tijekom 4 dana, operator je izgubio na prihodu od cestarine oko 3 miliona AUD (cca 2,25 miliona Eura), a svaki dodatni dan vjerojatno bi značio gubitak od daljnjih milion AUD (cca 750 000 Eura), Jönsson i Johnson [27].

Studija International Road Transport Union [28] pokazala je da se ukupni direktni troškovi nastali kao posljedica požara u tunelima mogu procijeniti na 200 miliona Eura godišnje, dok su daljnje štete zbog zatvaranja tunela približno 300 – 450 miliona Eura godišnje.

Gornji podaci se relativno dobro uklapaju u svjetsku sliku požarnih opasnosti. Prema Cox [29], neposredni godišnji gubici zbog požara u mnogim zemljama iznose oko 0,2% bruto društvenog proizvoda (BDP), no ako se tome pribroje troškovi intervencijskih službi, mjera zaštite od požara, premije osiguranja od požara te posljedični gubici u proizvodnji i trgovini, ukupni troškovi požara penju se na približno 1% BDP-a.

Istraživanja američke National Fire Protection Assn. pokazuju osjetno veće štete. Za godinu 2005., NFPA je ukupne troškove požara u SAD procijenila na čak 267-294 milijarde USD, što iznosi 2-2,5% bruto nacionalnog dohotka zemlje [30]. Iz strukture direktnih troškova prikazanih prema vrsti u tablici 1.3 vidljivo je da je udio vrijednosti same imovine izgubljene u požaru najmanji, što potvrđuje da su ukupne štete od požara mnogo veće nego što se to obično misli.

Tablica 1.3. Procjena direktnih troškova požara u SAD za godinu 2005. [30]

Vrsta troška	**Trošak, 10^9 USD**	**Udio, %**
Zaštita od požara u troškovima gradnje	46	24,5
Procjena novčane vrijednosti smrti i povreda uzrokovanih požarom	42	22,3
Ostali ekonomski troškovi	40	21,3
Troškovi profesionalnih vatrogasnih postrojbi (vrijednost potrošenog vremena dobrovoljnih vatrogasaca nije uključena)	31	16,5
Neto troškovi osiguranja	16	8,5
Vrijednost izgubljene imovine, prijavljene ili neprijavljene, direktne ili indirektne	13	6,9
Ukupno	188	100,0

Požarna sigurnost i sigurnost općenito danas postaju sve važnija tema. Suvremeno društvo karakteriziraju kompleksni proizvodni i komunikacijski sustavi, razvoj novih materijala, strojeva i uređaja, čuvanje vrijedne imovine, te povećani opseg rukovanja, skladištenja i transporta opasnih tvari. Općenito gledano, veće i kompleksnije građevine, strojevi i uređaji, te novi materijali, mogu dovesti do većih požara, pri čemu je teško predvidjeti i procijeniti sve buduće rizike. Budući da je svijet već postao „globalno selo“, pažnju medija i svjetske (informirane) javnosti neodoljivo privlače događanja u kojima ima ljudskih žrtava i/ili velikih šteta. Ako se iz ovog razmatranja isključe prirodne katastrofe i ratna događanja, tada se u civiliziranom svijetu uz požare, po svojim vanjskim manifestacijama i posljedicama, u ovu grupu kao srodne pojave mogu ubrojiti eksplozije, ispuštanja toksičnih i drugih opasnih tvari

(npr. plinova). Ove pojave obično nastupaju u industrijskim postrojenjima, u velikim zgradama (npr. hotelima, uredskim i javnim zgradama, muzejima, shopping centrima itd.), te u prijevoznim sredstvima na vodi, u zraku i na kopnu. Posljedice mogu biti naročito pogubne u zatvorenim i podzemnim prostorima, a tuneli, posebno oni dugački, imaju velike sličnosti sa zatvorenim prostorima. Stoga se u svim ovim područjima uvode sve skuplje mjere za ublažavanje požarnih rizika i za povećanje sigurnosti. Građevinski je sektor već tradicionalno vrlo visoko reguliran kroz mnogobrojne preskriptivne propise. Ipak, posljednjih se godina u europske propise postepeno uvode i zahtjevi bazirani na performansama.

2. Dosadašnja situacija u istraživanju tunelskih požara i ciljevi istraživanja

Istraživanja tunelskih požara izvedena u prošlosti mogu se smisleno podijeliti na sljedeće glavne grupe:

A - Požarni eksperimenti u pravom mjerilu za bolje razumijevanja fenomena požara
Ovi eksperimenti su nedvojbeno najvredniji jer pružaju najtočnije podatke koji se zatim mogu direktno koristiti u praksi, ali isto tako i za validiranje i korekciju eksperimenata u umanjenom mjerilu i njihovih rezultata, kao i za „baždarenje" i validiranje programa za numeričko simuliranje požara. Gotovo svi dosadašnji eksperimenti ovog tipa izvedeni su u napuštenim tunelima, odnosno u tunelima koji se ne koriste za promet. Prednost napuštenih tunela je što se u njima mogu ispitati i učinci vrlo velikih žarišta, koja bi mogla uništiti ili oštetiti oblogu operativnih tunela i/ili njihove instalacije, no u većini slučajeva (osim u Memorial tunelu), dimenzije ispitnih tunela bile su osjetno manje nego dimenzije operativnih tunela. Razlike su posebno velike kod proučavanja pojava u suvremenim tunelima s višestrukim kolničkim trakama. Zbog vrlo visokih troškova i relativne nedostupnosti prikladnih (napuštenih) tunela, ovi eksperimenti su relativno rijetki.

B - Požarni eksperimenti u pravom mjerilu za procjenu učinkovitosti stacionarnih (sprinkler) sustava
Ovi eksperimenti također imaju vrlo visoku vrijednost, izvode se u pravom mjerilu, a usmjereni su na procjenu djelotvornosti stacionarnih sustava (sprinklera, deluge, vodena magla, pjena). Još su rjeđi nego gore navedeni eksperimenti i dosad su dobrim dijelom služili kao potvrda da su projektni parametri sustava dobro odabrani.

C - Požarna ispitivanja za testiranje sustava, prilikom primopredaje tunela i u operativnim tunelima
Potaknuto već spomenutim katastrofalnim požarima u Europi i pojačanim javnim zahtjevima za višom sigurnošću u tunelima, nekoliko je privatnih tvrtki odlučilo usmjeriti svoje napore na istraživanje i razvoj novih deluge/sprinkler/mist sustava za aktivno gašenje požara, dok druge tvrtke razvijaju vatrootporne obloge za tunelske cijevi, nove ventilacijske sustave itd. Iako su neki od ovih eksperimenata izvedeni u stvarnim požarnim uvjetima u stvarnim ili eksperimentalnim tunelima, mali je dio ovih rezultata javno dostupan. Posljednjih je godina izvedeno nekoliko takvih eksperimenata, kojima se uglavnom ispitivala učinkovitost vodene magle, a izvodile su ih tvrtke specijalizirane za proizvodnju watermist sustava, obično u zajednici s nekom neutralnom istraživačkom institucijom.

Primopredajna ispitivanja normalno se izvode na novoizgrađenim ili rekonstruiranim tunelima. Zbog izbjegavanja mogućnosti oštećenja, požarna opterećenja moraju se ograničiti na prihvatljivi minimum potreban za dokazivanje projektnih parametara.

Na operativnim tunelima povremeno se izvode testiranja instalacija za svrhe dokazivanja njihovih performansi odnosno za uvježbavanje operativnog osoblja. Požarna opterećenja su također ograničena, a isto tako i trajanje izvođenja, jer se vrijeme zatvaranja tunela želi skratiti na nužni minimum. U nekim zemljama, kao što je npr. Francuska, operator tunela mora najmanje jednom godišnje organizirati vježbu spašavanja za slučaj akcidenta, koja uključuje realistički požarni scenarij [31].

D - Požarna ispitivanja u umanjenom i u laboratorijskom mjerilu

Požarna ispitivanja u tunelima u pravom mjerilu su vrlo skupa i dugotrajna. Troškovi ispitne serije EUREKA „Firetun“ iznosili su oko 10 miliona USD, a na MTFVTP[13] je potrošeno više od 40 miliona USD [9]. Ovako visoki troškovi ozbiljno ograničavaju broj i opseg požarnih eksperimenata u pravom mjerilu, pa mnoga fundamentalna pitanja o ponašanju požara i dima u tunelima do danas nisu dobila konačni odgovor. Eksperimenti u umanjenom i u laboratorijskom mjerilu izvode se s namjerom da se odgovori dobiju uz manji trošak, a ponekad i da se modeliraju uvjeti za neki poseban projekt tunela. Uporabu maketa u umanjenom, a posebno u laboratorijskom mjerilu, treba smatrati komplementarnom ispitivanjima u pravom mjerilu i računalnim programima.

Negdje do godine 1960., istraživanje požara u tunelima u najvećoj je mjeri bilo koncentrirano na požarnu sigurnost tunela u rudnicima, zbog čega su kao glavna požarna opterećenja bili razmatrani ugljen (goriva površina u ugljenokopima, ugljen u transportu i skladištenju, eksplozije ugljene prašine itd.), građevine od drva (npr. drvene skele i ukrepe koje pridržavaju svodove tunela) te tračni transporteri (vjerojatni uzroci nekoliko požara u rudnicima). Uzroci i posljedice požara vozila se nisu razmatrali. Početkom 1960-ih započela je izgradnja većeg broja prometnih tunela, posebice u Alpama, pa se započelo s eksperimentalnim ispitivanjem požara u prometnim tunelima, kako bi se bolje shvatile pojave koje mogu nastati u slučaju požara. Iako su ispitivanja požara bila izvedena zbog niza različitih razloga, dva najvažnija od njih bila su:

- bolje razumijevanje dinamike požara i nastalih pojava u tunelima,
- testiranje i primopredaja tunela i njihovih instalacija, naročito sustava ventilacije, sprinkler sustava i obloge tunela.

2.1 Požarni eksperimenti u pravom mjerilu za bolje razumijevanja fenomena požara

U nastavku su opisana samo najvažnija ispitivanja izvedena u pravom mjerilu, kao i zaključci do kojih su došli istraživači koji su ih proveli. Ovdje treba naglasiti da su autoru disertacije na raspolaganju bili samo radovi koji su objavljeni, u kojima su navedeni rezultati istraživanja i zaključci, dok zapisnici, bilješke, fotografije, filmovi i drugi dokumenti s pojedinačnim detaljnim rezultatima mjerenja i opažanja redovito nisu dostupni. Komentari autora disertacije u ovom poglavlju su posebno označeni (*italik*).

Za ilustraciju, na slici 2.1 prikazano je 10 krivulja razvoja požara (*HRR*) dobivenih pri ispitivanjima toplinske snage požara u Europi od 1992-2003. godine.

Požarni eksperimenti u tunelu Ofenegg, 1965.

Najveća nepoznanica za požarnu sigurnost tunela u Švicarskoj početkom 1960-ih godina bilo je pitanje što će se dogoditi ako u jednom od njihovih novih tunela dođe do akcidenta autocisterne koja prevozi gorivo. Da bi se došlo do odgovora na to pitanje, izvedena je godine 1965. serija požarnih ispitivanja u napuštenom željezničkom tunelu u blizini Ofenegga u Švicarskoj [34, 35]. Ispitivanja su trebala dati informacije o razini opasnosti za korisnike tunela, o mogućnosti spašavanja ljudi i o utjecaju požara na konstrukciju i instalacije tunela. Kroz tunel širine 3,8 m i visine 6 m (s polukružnim svodom), površine poprečnog presjeka 23 m^2, prethodno je prolazila jednotračna željeznička pruga. Na udaljenosti od 190 m od ulaznog portala, tunel je zatvoren pregradnim zidom, čime je stvoren „mrtvi kraj“. Uzduž jedne stijenke tunela sagrađen je kanal da bi se moglo obaviti testiranje prirodne ventilacije, te

[13] MTFVTP, akronim od The Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program.

uzdužnog i polupoprečnog ventilacijskog sustava. Pri ispitivanjima s prirodnom ventilacijom, svi izlazni otvori kanala bili su zatvoreni, a također i vrata na pregradnom zidu.

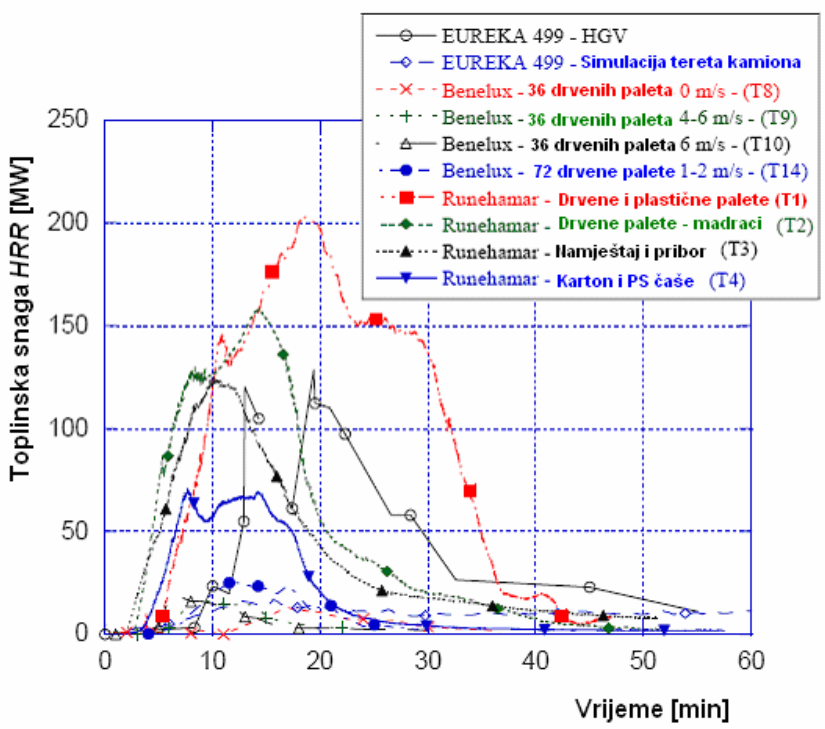
Tablica 2.1. Znanstveno usmjerena požarna ispitivanja u velikom mjerilu od 1965. nadalje [32]

Ispitivanje, zemlja, godina	**Broj ispitivanja**	**Žarište (gorivo)**	**Poprečni presjek tunela, m^2**	**Visina tunela, m**	**Duljina tunela, m**	**Mjereni parametri**	**Raspon vršne *HRR*, MW**
Ofenegg, Švicarska, 1965.	11	Benzin (6,6; 47,5; 95 m^2)	23	6	190	T, CO, O_2, v, vidljivost	11-80
Glasgow, UK, 1970.	5	Kerozin (1,44; 2,88; 5,76 m^2)	39,5	5,2	620	T, OD	2-8
Zwenberg, Austrija, 1974-75.	30	Benzin (6,8; 13,6 m^2), drvo, guma	20	3,8	390	T, CO, CO_2, NO_x, CH, O_2, v, OD	8-21
PWRI, Japan, 1980.	16	Benzin (4; 6 m^2), osobni automobil, autobus	57,3	≈ 6,8	700	T, CO, CO_2, v, OD, toplinska radijacija	Tava: 9-14
PWRI, Japan, 1980.	8	Benzin (4 m^2), autobus	58	≈ 6,7	3277	T, CO, CO_2, O_2, v, OD, toplinska radijacija	Tava: 9, autobus NA
EUREKA 499, Norveška, 1990-92.	21	Drvene „jaslice“[14], heptan, automobili, metro vagoni, željezn. vagoni, HGV maketa i prikolič ar	25-35	4,8-5,5	2300	HRR, T, CO, M, CO_2, O_2, SO_2, C_xH_y, NO, v, vidljivost, čađa,	2-128
Memorial, SAD, 1993-95.	98	Diesel gorivo (4,5-45 m^2)	36,2 i 60,4	4,3/7,8	853	HRR, T, CO, CO_2, C_xH_y, v, vidljivost	10-100
2nd Benelux tunel, Nizozemska, 2002.	14	n-heptan + toluen[15], automobil, furgon, HGV maketa	50	5,1	872	HRR, T, M, topl. radijacija, v, OD, vidljivost	3-26
Runehamar tunel, Norveška, 2003.	4	Celuloza, plastike, namještaj	32-47	4,7-5,1	1600	HRR, T, PT, CO, CO_2, O_2, HCN, H_2O, izocijanati, OD, toplinska radijacija	67-202

Legenda: *HRR*- toplinska snaga požara; M- brzina gubitka mase; T- temperatura; PT- plošni termometar; CO, CO_2, H_2O, HCN (cijanidi) - koncentracije; v - brzina; OD- optička gustoća; vidljivost - kamere za detekciju dima.

[14] Jaslice (engl. crib) su požarno žarište za ispitivanje izgaranja i gašenja krutih tvari. Tipični predstavnik krutih tvari (A-klase požara) je drvo, pa se npr. „jaslice“ za ispitivanje učinkovitosti ručnih vatrogasnih aparata pri gašenju požara klase A prema EN 3-7 [33] izrađuju slaganjem drvenih letvica poprečnog presjeka 39 x 39 mm u 14 „slojeva“. U svakom od slojeva nalazi se po 5 letvica, letvice su međusobno paralelne i udaljene jedna od druge 61 mm. Letvice su u odnosu na letvice susjednih (po visini) slojeva uvijek okomito postavljene, tako da su vanjski gabariti standardnih jaslica 500 mm (širina) x 546 mm (visina), a oblik jaslica je kvadar. Duljina jaslica ovisi o veličini ispitnog žarišta i standardno iznosi 0,5, 0,8, 1,3, 2,1, 2,7, 3,4, 4,3 ili 5,5 m. Pri ispitivanju tunelskih požara jaslice se obično slažu od drvenih paleta (europaleta).

[15] N-heptan ima plamište na -4 ^{0}C, a toluen na +4 ^{0}C.



Slika 2.1. Deset *HRR* krivulja dobivenih ispitivanjima u Europi [22]

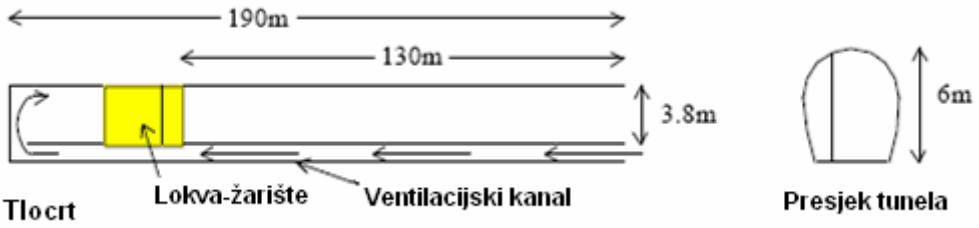
Polupoprečna ventilacija od 0,25 m^3/s svježeg zraka (po metru duljine tunela[16]) mogla se uspostaviti korištenjem izlaznih otvora na kanalu za zrak, postavljenih na međusobnim uzdužnim razmacima od 5 m. Uzdužna ventilacija (u = 1,7 m/s) simulirana je tako što su izlazni otvori duž kanala zraka zatvoreni, a kraj zračnog kanala je otvoren u blizini zazidanog kraja tunela. Pri prirodnoj ventilaciji uspostavljala se ventilacija nepoznate brzine, a pri polupoprečnoj se brzina mijenjala po presjeku, pa je nemoguće specificirati njenu veličinu. Za sva ispitivanje korišten je „avionski benzin", naliven u tri požarne „tave" različite veličine: 6,6 m^2, 47,5 m^2 i 95 m^2. Tave su bile izrađene od betona, s prednjim rubom na 131,5 m od ulaznog portala tunela. Širina tava bila je jednaka širini tunela (3,8 m), a duljina im je bila redom 1,7, 12,5 i 25 m. Najmanja tava simulirala je veličinu požara dvaju rezervoara goriva sudarenih automobila, a najveća veliko razlivanje iz autocisterne s benzinom. Količina goriva u tavama iznosila je redom 100, 500 i 1000 L, što znači da je dubina goriva iznosila 15,2 mm u najmanjoj, odnosno 10,5 mm u većim tavama[17]. Pod svodom tunela bile su postavljene 2 linije sprinklera. Gustoća primjene bila je 19 L/m^2min. Vrijeme aktiviranja sprinkler sustava nakon zapaljenja goriva, tj. vrijeme predgorenja, nije zabilježeno. Požari su se razvijali vrlo brzo. Podaci koji su se mjerili bili su: vidljivost, temperature zraka, koncentracije CO i O_2 te brzine strujanja zraka. Ukupno je izvedeno 11 ispitivanja, a bitni su zaključci bili sljedeći:

- Prirodno i polupoprečno ventilirana žarišta gorjela su sporije nego odgovarajuća žarišta na otvorenom prostoru i to zbog nedostatka kisika. Ovaj efekt bio je izraženiji kod većih žarišta.
- Uzdužna ventilacija može uzrokovati povećanje brzine izgaranja (u usporedbi s drugim žarištima u tunelu, a ne s izgaranjem na otvorenom prostoru).

[16] Jedinica m^3/s po m duljine može izgledati malo neobično, no ona nije neobična pri opisivanju tunelskih požara. Ako se volumni protok zraka dobavlja postepeno duž duljine tunela, ponekad se to iskazuje po m duljine tunela.

[17] Iskustveni podaci NFPA za vatrogasce navode da se pri slobodnom izgaranju ugljikovodika razina spušta za oko 0,3 m/h, tj. za oko 5 mm/min. Drysdale [37] navodi gotovo istu vrijednost (0,055 kg/m^2s) za veliku lokvu.

- Brzina širenja dima i gustoća sloja dima bile su veće pri većim žarištima (do 11 m/s i 4 m/s pri polupoprečnoj ventilaciji).
- Uzdužna ventilacija može uzrokovati da sloj dima ispuni čitav presjek tunela, tj. gubitak stratifikacije.
- Maksimalne temperature u blizini stropa postignute su unutar 1-2 minute nakon paljenja.
- Preživljavanje nije moguće na udaljenosti manjoj od 30-40 m od velikih žarišta-tava (neovisno o vrsti ventilacije), a uzdužna ventilacija signifikantno smanjuje izglede za preživljavanje na nizvjetrenoj strani požara.
- Sprinkleri su ugasili sva žarišta nakon kratkog vremena,[18] ali zaostale pare goriva se mogu upaliti s uništavajućim učinkom (uzrokovati uništenje instalacija).



Slika 2.2. Skica tunela Ofenegg [36]

Kritičko razmatranje eksperimenata

Budući da je u ovom tunelu izvedena prva serija ispitivanja tunelskih požara u velikom mjerilu u svrhu dobivanja znanstvenih i inženjerskih informacija [34, 35], rezultati i nalazi ovih ispitivanja imali su, po svemu sudeći, iznimno značajan utjecaj na sve daljnje preporuke, standarde i propise koji se odnose na zaštitu tunela od požara. Taj se snažan utjecaj osjeća sve do danas, posebno u pogledu negativnog stava prema stacionarnim sustavima za gašenje požara.

Li i Ingason [32] su na bazi raspoloživih podataka izračunali HRR i sastavili tablicu maksimalnih temperatura dimnih plinova i brzina zraka koja je dolje priložena. HRR su izračunali na temelju podataka o potrošnji goriva za pojedina ispitivanja, uzimajući toplinu izgaranja benzina od 43,7 MJ/kg*, te usvajajući stupanj efikasnosti izgaranja od 0,8 za prirodnu i polupoprečnu ventilaciju, a 0,9 za uzdužnu ventilaciju. Za veličinu tave od 47,5* m^2*, maksimalna temperatura plinova pod svodom bila je 1325* ^{0}C *uz HRR koja je izračunata na 70* MW*, dok su s prirodnom i polupoprečnom ventilacijom temperature bile oko 1200* ^{0}C *uz HRR od 33-39* MW*. U tablici 2.2 ispuštene su posljednje (desne) 2 kolone originalne tablice B2 [32], a pridodane su nove 4 kolone s analizom uvjeta izgaranja.*

Uz pretpostavku da su snage požara (HRR) točno određene, analizom tablice 2.2 uočava se da su jedino pri eksperimentima s najmanjom tavom ostvareni uvjeti za (približno) potpuno izgaranje benzina, budući da su brzine izgaranja približno jednake onima na otvorenom prostoru. Pri površini tave od 47,5 m^2*, relativna brzina izgaranja pada na 36-68% brzine izgaranja na otvorenom prostoru, dok pri tavi površine 95* m^2*, brzina izgaranja pada na svega 17-19%. Iz podataka se također vidi da je snaga žarišta bila veća pri površini tave od*

[18] Zbog vrlo niskog plamišta benzina (oko -40 ^{0}C), iz vatrogasnog je iskustva poznato da se vodom iz sprinkler sustava i ručnih mlaznica praktički ne može ugasiti požar benzina, pa je vrlo teško prihvatiti zaključak autora eksperimenta. Benzin se vodom može ugasiti jedino ako se ona primijeni kao magla i to samo ako je time moguće dovoljno smanjiti koncentracija kisika iznad lokve. Primijenjena dubina goriva omogućavala je svega 2-3 minute izgaranja (na otvorenom prostoru), što također dovodi u pitanje tvrdnju o gašenje benzina vodom.

47,5 m^2*, nego pri 95* m^2*, što je svakako neobično i upućuje na pretpostavku da je izgaranje bilo nepotpuno. Realna posljedica nepotpunog izgaranja je sakupljanje CO i neizgorjelih para goriva u atmosferi tunela, što je vjerojatno i bio uzrok eksplozije o kojoj su švicarski stručnjaci izvijestili i koju su (vjerojatno pogrešno) pripisali djelovanju sprinkler sustava kojim su, kako tvrde, žarišta ugašena.*

Tablica 2.2. Relevantni podaci ispitivanja u tunelu Ofenegg 1965.

Ispit. br.	Tip ventilacije	Dovod zraka, m^3/s	Brzina dovodnog zraka, m/s	Temp. okoliša ϑ_a, ^0C	Max. temp. dimnih plinova, ^0C	HRR Q_{max}, MW	Površina tave, m^2	Brzina izgaranja (regresije goriva), mm/min	Relativna brzina izgaranja	Min. potreban dovod zraka, m^3/s	Min. brzina dovoda zraka, m/s
1	Prirodna	0	0	16	710	16	6,6	5,62	1,26	4,89	0,213
2	Polupopreč.	15	?	17,5	830	12	6,6	4,22	0,945	3,67	0,160
2a	Uzdužna	39	1,70	11	450	14	6,6	4,37	0,980	4,28	0,186
5	Prirodna	0	0	10	1200	39	47,5	1,90	0,427	11,93	0,519
6	Polupopreč.	15	?	10	1180	33	47,5	1,61	0,361	10,09	0,439
7a	Uzdužna	39	1,70	11,3	1325	70	47,5	3,03	0,680	21,39	0,932
9	Prirodna	0	0	4,6	1020	35	95	0,854	0,191	10,70	0,466
10	Polupopreč.	6	?	9	850	32	95	0,781	0,175	9,78	0,426

Napomene uz tablicu 2.2: HRR je izračunata prema HRR = $\eta \dot{m}''_f A_f H_c$ (MW) *gdje je η stupanj efikasnosti izgaranja,* m''_f (kg/m^2s) *je brzina izgaranja (regresije) goriva,* A_f (m^2) *je površina goriva, a* H_c (MJ/kg) *je toplina izgaranja. Spec. gustoća goriva uzeta je kao 740* kg/m^3*. Relativna brzina izgaranja izračunata je u odnosu na brzinu izgaranja velike lokve benzina na otvorenom prostoru od* m''_∞ *= 0,055* kg/s m^2 *[38][19]. Minimalan potreban dovod zraka i minimalna brzina zraka izračunate su za navedene HRR za slučaj stehiometrijskog izgaranja benzina, jer je za određenu HRR zrak morao biti doveden na bilo koji način. Spec. gustoća zraka uvijek je računata s 1,20* kg/m^3*, što odgovara za temperaturu* ϑ_a = 20 ^{0}C.

Požarni eksperimenti u tunelu West Meon

Početkom 1970-ih, Fire Resarch Station, U.K., izvela je nekoliko požarnih ispitivanja u napuštenom željezničkom tunelu u blizini West Meon, Hampshire [39]. Tunel širine 8 m i visine 6 m bio je dug 480 m. O ovim eksperimentima dostupno je vrlo malo podataka u literaturi, osim što se zna da je kao gorivo korišten veći broj automobila i da je prirodna ventilacija imala brzinu strujanja od oko 2 m/s. Glavni zaključci bili su:

- Sloj dima bio je debeo do 3 m, što znači da je zrak u visini glave bio respirabilan.
- Promatrači su bili u stanju ostati u blizini žarišta bez naknadnih posljedica (osim glavobolje).

Požarni eksperimenti u tunelu Glasgow, 1970.

U napuštenom željezničkom tunelu u Glasgowu, duljine 620 m, širine 7,6 m i visine 5,2 m, izvedeno je 5 ispitivanja [40]. Požarno opterećenje u svakome od njih sastojalo se od 1, 2 ili 4 tave dimenzija 1,2 x 1,2 m s kerozinom kao gorivom, toplinske snage oko 2 MW po tavi. Promatralo se kretanje dima i mjerene su neke temperature. Glavni zaključci bili su:

- Sloj dima je pri većini ispitivanja započinjao s debljinom od 1-2 m, ali mu je debljina vremenom rasla. Pri najvećem žarištu, sloj dima postigao je debljinu od 3-4 m nakon 10 minuta.
- Sloj dima napredovao je longitudinalno brzinom od oko 1-1,5 m/s.

[19] Već za lokvu promjera 2,9 m, koja po površini odgovara najmanjoj tavi od 6,6 m^2, brzina izgaranja odstupa od m''_∞ za manje od 0,5%.

- Na kraju tunela formirao se „čep“ dima kad je naišao na poprečni vjetar na otvorenom. Dim je ispunio cijelu visinu tunela, s tendencijom da se uvuče natrag u tunel zbog strujanja zraka uzrokovanog izgaranjem.
- Zrak ispod glavnog sloja dima nije ostao posve čist, već je došlo do djelomičnog miješanja ubrzo nakon početka izgaranja.

Požarni eksperimenti u tunelu Zwenberg, 1976.

Početkom 1970-ih godina, u Austriji je započela gradnja autoputova, što je uzrokovalo izgradnju većeg broja tunela duljine od 5 do 13 km. Budući da vlasti nisu imale iskustva s požarima u tunelima, izvedeno je 30 požarnih ispitivanja da bi se došlo do potrebnih podataka [41]. Ispitivanja su izvedena u napuštenom željezničkom tunelu duljine 390 m, poprečnog presjeka 20 m^2, u koji je ugrađen ventilacijski kanal presjeka 4 m^2. Visina tunela (do ventilacijskog kanala) bila je 3,8 m, a širina 4,4 m. Zahvaljujući modifikacijama, u tunelu je bilo moguće simulirati prirodnu ventilaciju, kao i uzdužni, polupoprečni i poprečni sustav prisilne ventilacije. Mogućnost dobave svježeg zraka bila je do 30 m^3/s, a mogućnost odsisa također do 30 m^3/s. Na svakih 6 m razmaka, alternativno su bili postavljeni otvori za dovod svježeg zraka i otvori za odsis zagađenog zraka. Na južni portal postavljen je ventilator, kojim se moglo ostvariti uzdužno strujanje zraka do 7 m/s. Žarište je bilo udaljeno 108 m od južnog portala, a sastojalo se od 12 betonskih tava, postavljenih u 2 reda. Uz dimenzije tava od 1 m širine i 1,7 m duljine, mogla se tako dobiti maksimalna površina lica goriva od 20,4 m^2. U „standardnim“ ispitivanjima, kojih je izvedeno 25, koristila se grupa od 4 susjedne tave (ukupna površina 6,8 m^2), u koje je svaki puta izliveno po 200 L goriva ukupno (u 24 slučaja benzin, a u jednom ispitivanju diesel gorivo). Time je dobivena dubina goriva od 29,4 mm. S tavama ukupne površine 13,6 m^2 izvedena su svega 3 ispitivanja, a gorivo je bio benzin. Jedno preliminarno ispitivanje izvedeno je s tavom površine 3,4 m^2, a jedno s miješanim gorivom od drva, autoguma i piljevine. U tunelu se nalazilo 46 mjernih točaka za temperaturu, 11 za brzinu zraka i dimnih plinova, 19 za uzorkovanje plinova (O_2, CO_2, CO, CH i NO_x), te 7 za određivanje vidljivosti.

Glavni zaključci ispitivanja bili su:

- Temperature uz strop bile su vrlo visoke (povremeno do 1200 ^0C).
- Veće brzine uzdužne ventilacije uništile su toplinsko raslojavanje zraka (stratifikaciju).
- Pri poprečnoj ventilaciji, ventilaciju je u požarnom sektoru trebalo postaviti na maksimalni odsis, dok je dovodnu ventilaciju zbog očuvanja stratifikacije trebalo smanjiti za 20-30%.
- Smještaj dovodnih ventilatora nije bitan (nisko ili visoko).
- Pri manjim žarištima bilo je moguće odsisati sve dimne plinove na duljini tunela od oko 260 m s maksimalnim odsisom i minimalnim dovodom svježeg zraka.
- Obloga tunela i međustrop nisu bili uništeni (od izgaranja).

Kritičko razmatranje eksperimenta

Budući da je ispitni poligon bio vrlo dobro pripremljen, izvedena su ispitivanja sa sljedećim kombinacijama uvjeta:

- *Dobava svježeg zraka: odozdo; odozgo; bez dobave,*
- *Dobavna količina svježeg zraka: 30* m^3/s *i 1/3 = 10* m^3/s,
- *Odvodna količina otpadnog zraka: 30* m^3/s *i 1/3 = 10* m^3/s,
- *Uzdužna brzina zraka: 0; 2* m/s*; 4* m/s *(preliminarna ispitivanja 2,5 i 7* m/s*),*
- *Uvjeti u tunelu: slobodan presjek; ispitni modeli u tunelu.*

Analizom podataka koju su proveli Li i Ingason [32], vidi se da su HRR žarišta u svim mogućim kombinacijama dovoda, odvoda i uzdužnog strujanja zraka bile u relativno uskom rasponu od 7 MW *do 13* MW *pri površinama tave od 6,8* m^2*, odnosno 17* MW *do 21* MW *pri površinama tave od 13,6* m^2*. Snaga požara malo je ovisila o brzini uzdužnog strujanja zraka, pa se pri površini tave od 6,8* m^2 *kretala od 9,87* MW *(prosjek u 15 mjerenja s uzdužnom brzinom 0) do 11,88* MW *(prosjek od 8 mjerenja s uzdužnom brzinom 2* m/s*), odnosno do 12* MW *(1 mjerenje s uzdužnom brzinom 4* m/s*). Pri dvostruko većem žarištu, s površinom tave 13,6* m^2*, prosječna snaga požara bila je nešto manje od 2 puta veća (prosjek od 3 mjerenja s uzdužnom brzinom 0 bio je 19,3* MW*). Ovakvi rezultati upućuju na zaključak da je količina zraka bila dovoljna u svim slučajevima, odnosno da je izgaranje bilo potpuno.*
U Zwenbergu nisu ispitivani nikakvi sustavi za gašenje.

Požarni eksperimenti u tunelu PWRI, 1980.
Japanski Public Works Research Institute (PWRI) izveo je 2 serije ispitivanja u pravome mjerilu [42, 43]. Prva serija od 16 ispitivanja izvedena je u vlastitoj požarnoj galeriji, a druga serija od 8 požarnih ispitivanja u tunelu Kakeitou na Chugoku Highway. Galerija PWRI ima ukupnu duljinu od 700 m, poprečni presjek iznosi 57,3 m^2 (H = 6,8 m), a opremljena je uređajima za ventilaciju i sprinkler instalacijom. Tunel Kakeitou ima ukupnu duljinu 3277 m, poprečni presjek mu je 58 m^2 (H = 6,7 m), a opremljen je uređajima za ventilaciju i sprinkler instalacijom. Glavna svrha korištenja dugačkog tunela bila je da se utvrde uvjeti okoliša za ljude koji se evakuiraju iz tunela.

Požarno opterećenje činila su žarišta od tava s benzinom, osobni automobili i veliki autobusi. Ukupno je izvedeno 12 ispitivanja s tavama benzina (10 ispitivanja s tavama od 4 m^2 i 2 s tavama od 6 m^2), 6 ispitivanja s osobnim automobilima i 6 s autobusima (jedno vozilo po ispitivanju). Tave s benzinom simulirale su veličinu požara vozila (*HRR*), a korištene su zbog dobivanja uniformnih i ponovljivih žarišta, što je vrlo teško postići ako se pale vozila. Stvarna vozila korištena su za dobivanje potvrde rezultata. Tave su bile u modulima od po 4 x 0,25 m^2 = 1 m^2, pa se koristio potreban broj modula. U svaku od malih tava nalivalo se po 18 L benzina (dubina 72 mm), što je dostajalo za vrijeme izgaranja od barem 10 minuta. U ispitivanjima s osobnim vozilima, vrata vozača ostavljana su poluotvorena, dok su ostala vrata i prozori bili zatvoreni. U spremnik goriva osobnih vozila stavljano je po 10-20 L benzina. Pri ispitivanjima velikih autobusa, ulazna i izlazna vrata te prozor vozača bili su potpuno otvoreni, a u spremnik goriva stavljalo se po 50 L diesel goriva. Za svrhu paljenja automobila i autobusa, na stražnja sjedala stavljao se komad tkanine prethodno umočene u benzin i palio. Pri ispitivanjima je korištena opsežna instrumentacija. Tako se npr. u tunelu temperatura plinova mjerila u 84 točke, koncentracija dima u 78 točaka, brzine plinova u 5 točaka, koncentracije O_2 i CO u 1 odnosno 3 točke, toplinska radijacija u 1 točki, a isto tako i brzina izgaranja (kao gubitak mase goriva).

HRR nije mjerena kao toplina, već je pri korištenju tava kao žarišta izračunavana iz snižavanja razine goriva. Navodi se da je pri brzini uzdužnog strujanja od 1 m/s, brzina izgaranja bila 6,3 mm/min (77,7 g/m^2s uz 740 kg/m^3 za benzin) i 12,4 mm/min (152,9 g/m^2s) pri uzdužnoj brzini od 4 m/s. Autori izvještaja naveli su za usporedbu i brzinu izgaranja na otvorenom prostoru od 4,2 mm/min (51,8 g/m^2s). Usporedbom ovih brzina izgaranja s vrijednostima iz Ofenegga, može se vidjeti da su one približno jednake veličine kod najmanjih tava i uz malu brzinu strujanja, dok su pri velikoj brzini strujanja (4 m/s) približno 2 puta veće. Za brzinu izgaranja osobnih automobila navodi se 8,8 kg/min (0,15 kg/s) pri brzini strujanja od 1 m/s, odnosno 10 kg/min (0,17 kg/s) pri brzini od 4 m/s. Pretpostavljajući prosječnu toplinu izgaranja materijala automobila od 30 MJ/kg [44], dobivaju se odgovarajuće snage požara od

oko 4,4 MW i 5 MW. Za brzinu izgaranja sjedala u autobusu navodi se 6,9 do 8,1 kg/min (0,11 do 0,14 kg/s).
Glavni zaključci ispitivanja bili su:

- Stratifikacija dima djelomice se uništava uzdužnom ventilacijom brzine 1 m/s, a potpuno se uništava brzinom od 2 m/s.
- Toplinska snaga požara (*HRR*) povećava se pri većoj brzini uzdužne ventilacije. Kod tave benzina *HRR* je bila 4 MW sa strujanjem od 1-2 m/s i 6 MW sa 4 m/s. Ovaj učinak je još izraženiji kod požara vozila.
- Povišenje temperature u tunelu signifikantno je jedino u blizini žarišta.
- Niti jedan požar automobila, autobusa ili tave nije potpuno ugašen djelovanjem sprinklera, ali je toplinska snaga požara u svakom od njih bila smanjena.
- Sprinkleri su imali „negativan učinak na neposredni okoliš“, jer su uzrokovali smanjenje gustoće dima uz strop, a povećanje gustoće dima u donjoj zoni tunela.

Požarna ispitivanja u VTT, 1985.
Prethodnik projekta EUREKA bila su 2 „pilotska“ požarna ispitivanja s drvenim jaslicama, izvedena u „malom“ tunelu u Lappeenranta, na jugoistoku Finske [45]. Svrha ovih ispitivanja bila je da se istraži utjecaj požara na oblogu tunela kao i prijenos požara između objekata. Duljina tunela bila je 183 m, širina od 5,5-6,1 m, visina 4,3-5,0 m, a prisilnu ventilaciju održavala su dva ventilatora na jednom od krajeva tunela. Glavni zaključci ispitivanja bili su:

- U prvom ispitivanju s maketom vlaka metroa (u vidu drvenih jaslica), uspostavila se nakon kratkotrajne početne faze ustaljena brzina širenja požara ($6,6 \times 10^{-4}$ m/s, $\approx$ 1,8 MW).
- U drugom ispitivanju s nizom od 8 maketa putničkih vagona (drvene jaslice 1,6 x 1,6 x 0,8 m visine, s međusobnim razmakom 1,6 m), nije bilo prijenosa požara između jaslica.
- Identične jaslice na nasuprotnim krajevima niza u drugom ispitivanju pokazale su vrlo različite karakteristike izgaranja: jaslice na uzvjetrenoj strani niza gorjele su s gotovo dvostrukom snagom od onih na suprotnom kraju.
- Budući da eksperimenti u ovome mjerilu nisu nikada potpuno reproducibilni, potrebno je izvesti više nego samo jedan eksperiment da bi se donijeli dalekosežni zaključci o požarima vozila [46].
- Tijekom požara u tunelima s grubom kamenom površinom dolazi do značajnog ljuštenja stijenki.
- Prema teorijskim modelima koji su se tada koristili, pri oba se ispitivanja očekivalo da će doći do razbuktavanja[20] požara, ali se to niti u jednom slučaju nije dogodilo [46].

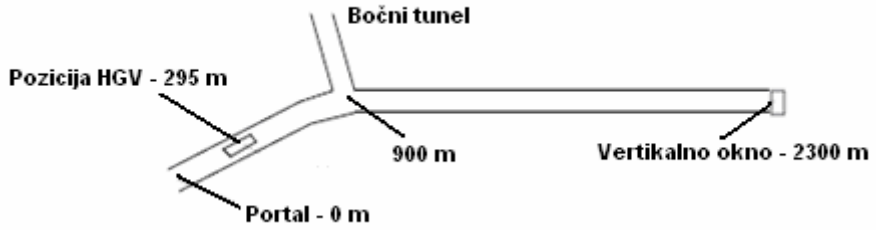
Serija požarnih ispitivanja EUREKA EU-499 „Firetun“, 1990-1992.
Serija požarnih ispitivanja s nesporno najvećim opsegom bila je ispitna serija EUREKA „Firetun“, koju su između 1990. i 1992. izveli timovi istraživača iz Austrije, Finske, Francuske, Njemačke, Italije, Norveške, Švedske, Švicarske i U.K. [47, 48, 49]. Mjesto ispitivanja, tunel Repparfjord u blizini Hammerfesta u Norveškoj, bio je napušteni rudnički tunel duljine 2,3 km od glavnog portala do vertikalnog okna visine 90 m. Proteže se u smjeru sjever-jug i ima uzdužni gradijent manji od 1%. Tunel je nepravilnog oblika, širine 5,3-7,0 m,

[20] Razbuktavanje požara (engl. Flashover) – faza požara pri kojoj su sve površine i objekti ugrijani na njihove temperature samozapaljenja, pa izgaranje nastupa gotovo trenutačno po čitavoj površini [50]. Alternativno se koristi termin „požarni preskok“. U Hrvatskoj i drugdje u svijetu termin „flashover“ se često koristi bez prevođenja. Strogo gledajući, „flashover“ je definiran pri požarima zatvorenih prostorija, a ne pri požarima tunela.

maksimalne visine u središtu od 4,8-5,5 m, a poprečni presjek je vrlo približno kvadrat površine 25-35 m^2.

Većina ovih ispitivanja (njih 21) izvedena je godine 1992., pri čemu su kao požarno opterećenje korišteni automobili, putnički vagoni, drvene jaslice, tave s heptanom, simulirani tovar kamiona i jedan HGV potpuno natovaren namještajem. Daljnja ispitivanja izvedena kao dio ove ispitne serije bila su požarna ispitivanja drvenih jaslica u nekorištenom željezničkom tunelu u Njemačkoj, požarna ispitivanja drvenih jaslica u VTT u Finskoj (gore opisana), te laboratorijska ispitivanja obloge tunela. Nalazi o ponašanju vagona i HGV u požaru imali su značajan utjecaj na buduće projekte velikih tunela. Ciljevi ovog projekta bili su da se dobiju informacije o:

- požarnom fenomenu i razvoju požara,
- mogućnosti bijega, spašavanja te gašenja požara,
- utjecaju okolne strukture na požar,
- mogućnosti ponovnog korištenja građevine (nastala oštećenje, vrijeme potrebno za ponovno osposobljavanje itd.),
- teoretskoj podlozi za poboljšanje razumijevanja požara, modificiranje modela itd.,
- stvaranju, distribuciji i precipitaciji kontaminanata.



Slika 2.3. Skica tunela Repparfjord [36]

Tijekom požarnih ispitivanja izmjereni su dotad nepoznati podaci o *HRR* stvarnih vozila, pri čemu je po prvi puta na tunelskim ispitivanjima u pravom mjerilu korištena kalorimetrija potrošnje kisika[21]. Pri ispitivanjima su korištena i dobro definirana žarišta, kao što su drvene jaslice i tave s heptanom, čime su dobiveni vrijedni podaci za znanstvenu analizu rezultata. Ispitivanja s drvenim jaslicama pokazala su tendenciju povećanja brzine rasta požara s povećanom brzinom ventilacije, ali bez primjetnog povećanja vršne *HRR*. Rezultati su nadalje pokazali da općenito kod vozila izrađenih od rastaljivih materijala (npr. kod vagona metroa izrađenih od aluminija i školskog autobusa od plastike armirane staklenim vlaknima, GFRP), temperature ispod svoda mogu doseći od 800 do 1090 ^{0}C, a *HRR* od 29-43 MW (ispitivanja 7, 11 i 14). Kod vagona s čeličnom strukturom, *HRR* nije prelazila 19 MW, trajanje požara bilo je dulje, a temperature ispod svoda dosezale su do 800 ^{0}C (ispitivanja 4, 5, 12 i 13). Kod osobnih vozila, najviše temperature bile su između 210 i 480 ^{0}C, a *HRR* do 6 MW (ispitivanja 3 i 20). Utjecaj materijala izrade tijela vozila (plastika ili čelik) bio je sličan kao kod vagona. Ispitivanja su također pokazala važnost otpornosti prozora na rast požara kod vagona s čeličnom strukturom, jer je na brzinu rasta utjecao redoslijed i vrijeme pucanja prozora, što se pokazalo pri analizi razvoja temperature unutar prostora vagona. Vrsta unutarnjeg materijala (stariji, gorivi ili noviji, vatrootporni) nije pokazala značajan utjecaj kako je to bilo očekivano. Stoga je zaključeno da su vrsta materijala za gradnju vagona i kvaliteta prozora od veće važnosti nego vrsta unutarnjih materijala. Kod teških tereta (namještaj), koji se nisu nalazili

[21] Oxygen consumption calorimetry označava izračunavanje snage požara (*HRR*) iz razlike koncentracije kisika u svježem (ulaznom) i otpadnom (izlaznom) zraku.

unutar čeličnog ili aluminijskog tijela, najviše temperature bile su oko 1000 ^{0}C, a *HRR* od 120-128 MW.

Tablica 2.3. Neki relevantni podaci iz ispitne serije [47, 48, 49]

Ispit. br.	**Vrsta goriva**	**Brzina zraka *u*, m/s**	**Q_{max}, MW**	**ϑ_{max}, 0 m, ^{0}C**	**ϑ_{max}, 10 m, ^{0}C**
7	Školski autobus (GFRP)	0,3	29	810	690
8	Drvene jaslice, br. 3	0,3	9,5	NA	480
9	Drvene jaslice, br. 4	3,5	18	NA	440
10	Drvene jaslice, br. 5	4,5	13	NA	290
11	1,5 željeznička vagona F2A1+F7 (aluminij + čelik)	3,5	43	980	950
12	Željeznički vagon F2St (čelik)	0,5	19	650	840
13	Željeznički vagon F1 (čelik)	0,5	13	450	720
14	Metro vagon F4 (aluminij)	0,5	35	810	1090
15	Miješani teret, simulira tovar kamiona	0,7	16,5	NA	400
16	1 m^2 tava heptana, br. 1	1,25	9[22]	540	NA
17	1 m^2 tava heptana, br. 2	1,75	8	400	340
20	Osobni automobil (plastika)	0,5	6	480	250
21	Kamion (HGV) s namještajem	5	128	925	970

Ispitivanjem su prikupljene različite vrste podataka o gubitku mase, temperaturi, koncentraciji plinova, gustoći dima, brzini strujanja zraka itd. Svi ovi podaci mjereni su na mnogim točkama, u blizini žarišta požara i na udaljenosti od njega. Gubitak mase (goriva) mjeren je direktno na lokaciji žarišta pomoću osjetnika težine (load cells). Nažalost nisu pri svakom eksperimentu bilježene sve ove vrste podataka. U nekoliko ispitivanja s drvenim jaslicama i u jednom od ispitivanja s automobilom, nisu bilježeni gubitak mase niti koncentracija plinova, tako da je nemoguće procijeniti toplinsku snagu ovih žarišta. Iz ovog ispitnog niza izvučen je veliki broj zaključaka:

- Stupanj oštećenja na vozilima i na oblozi tunela, posebno u zoni svoda, ovisi o vrsti vozila. Krov vozila izrađenih od čelika bio je otporan na toplinu, dok su krovovi vozila izrađenih od aluminija potpuno uništeni već u ranoj fazi požara [52, 53].
- Temperature tijekom trajanja većine požara automobila dosizale su maksimalne vrijednosti od 800-900 ^{0}C. Temperature pri ispitivanju HGV dosizale su do 1300 ^{0}C. Temperature su znatnije opadale na maloj udaljenosti od žarišta požara. Temperature su više na nizvjetrenoj nego na uzvjetrenoj strani [53].
- Željeznički vagoni gorjeli su toplinskom snagom od 15 i 20 MW. HGV je gorio s više od 100 MW [53].

[22] Pri ispitivanjima br. 16 i 17 navedene su snage požara od 9 MW i 8 MW za tavu od 1 m^2, što je nekoliko puta više od *HRR* ≈ 2 MW koju navode ostala ispitivanja i koju potvrđuje izračun prema Babrauskas [38]. Te podatke nije bilo moguće provjeriti, pa ih treba uzeti s rezervom. Karlsson i Quintiere daju za požar lokve benzina od 1 m^2 *HRR* od 2,5 MW [51].

- Željeznički vagon, koji se npr. smatra „malim požarnim opterećenjem“, može razviti snagu (*HRR*) od 45 MW [49][23].
- Sva cestovna i željeznička vozila pokazala su brzi razvoj požara tijekom prvih 10-15 minuta [53].
- Brzina razvoja požara vozila varirala je od „srednje“ do „ultra brze“ prema [54, 55].
- Suvremeni željeznički vagoni su zbog vatrootpornih unutarnjih obloga otporniji na zapaljenje nego stariji vagoni [53].
- Pri požarnim ispitivanjima željezničkih vagona s prirodnom ventilacijom, gustoća dima i koncentracija CO prešle su „prihvatljive“ granice na više od 300 m udaljenosti od lokacije požara [56].
- Da bi se vatrogascima omogućio pristup do žarišta požara, potrebno je predvidjeti „zaštićeni put“, kao što je to npr. servisni tunel uz Eurotunel [56].
- Maksimalna koncentracija policikličkih aromatskih ugljikovodika (PAH) i drugih polutanata nalazi se na oko 70-80 m nizvjetreno od žarišta [57].
- Razvoj požara i način izgaranja su pod snažnim utjecajem ventilacije [58].
- Ako kontejner ili zatvoreni prostor nisu dobro zabrtvljeni, ventilacija može unijeti dovoljnu količinu „propuštenog“ zraka da se izgaranje nastavi smanjenom brzinom [58].
- Upravljiva ventilacija može korisno poslužiti za upravljanje dimom [58].
- Uzdužna ventilacija može uništiti stratifikaciju dima na nizvjetrenoj strani žarišta [58].

Ispitivanja požarne ventilacije u Memorial tunelu (MTFVTP), SAD, 1993-1995.

Iako je po opsegu (vrste goriva i ciljevi) ispitna serija EUREKA bila veća od bilo koje druge serije, MTFVTP je do danas najveća serija požarnih ispitivanja tunela u smislu broja ispitanih varijanti ventilacije (ukupno 98 ispitivanja). Eksperimente je provela Federal Highway Administration za svrhu izgradnje Boston Central Artery tunela. Mjesto ispitivanja bio je dvotračni cestovni tunel Memorial u blizini Charlestona, West Virginia, SAD, duljine 853 m i širine 8,8 m, koji je sagrađen 1953. kao dio West Virginia Turnpike, a zatvoren godine 1987. [59]. Od južnog prema sjevernom portalu tunel se uspinje s gradijentom od 3,2%. Prilikom originalne izgradnje, tunel je opremljen poprečnim sustavom ventilacije, s dovodnim ventilatorima na južnom, a odvodnima na sjevernom portalu. Zračni kanal pod svodom tunela bio je izveden tako da je betonski svod postavljen na visini od 4,3 m iznad kolnika, a prostor iznad njega razdijeljen je vertikalnim betonskim zidom na dovodni i odsisni dio. Za svrhe ispitivanja tunel je modificiran, da bi se omogućilo ispitivanje i usporedba prirodnog, polupoprečnog, poprečnog i uzdužnog sustava ventilacije i njihove sposobnosti da upravljaju gibanjem i odsisom dima. Za neka od ispitivanja horizontalni je strop uklonjen, kako bi se u tunel mogla smjestiti 24 reverzibilna jet-ventilatora[24] u grupama po 3, ravnomjerno raspoređena uzduž tunela. Time je mijenjan i poprečni presjek tunela, i to od približno pravokutnog, površine 36,2 m^2, do „potkovastog“, visine 7,8 m i poprečnog presjeka 60,4 m^2. Ventilatori trajne otpornosti na temperaturu zraka do 300 ^{0}C mogli su pružiti volumni protok od 43 m^3/s uz izlaznu brzinu zraka od 34,2 m/s.

Tunel je bio bogato opremljen mjernim instrumentima i registratorima podataka. U 12 poprečnih presjeka tunela postavljeni su senzori za brzinu zraka, temperaturu, CO, CO_2 i THC (total hydrocarbon content). Ukupno je korišteno približno 1400 mjernih točaka, u svakoj su se točki podaci bilježili svake sekunde, a vrijeme ispitivanja bilo je od 20-45 minuta.

[23] Ova dva zaključka na prvi pogled izgledaju međusobno kontradiktorni. Oni su djelomice posljedica korištenja različitih metoda za određivanja snage požara u tunelu, a djelomice dvaju različitih konteksta u dvije reference: u jednoj su uspoređeni požar HGV i željezničkog vagona sa zaključkom da je požar HGV daleko teži, dok se u drugoj željelo naglasiti da i „malo požarno opterećenje“ može rezultirati vrlo ozbiljnim požarom.

[24] Impulsne ili jet ventilatore definira EN ISO 13350:2008, *Industrial fans – Performance testing of jet fans*

Učinkovitost ventilacijskog sustava pri upravljanju gibanjem dima i topline ispitivana je na unaprijed proračunatim veličinama žarišta od 10, 20, 50 i 100 MW (nominalna snaga). Ovim su žarištima dodijeljene odgovarajuće tave s površinama goriva od redom 4,5 m^2, 9 m^2, 22,2 m^2 i 44,4 m^2, što znači da je usvojen ekvivalent prosječne toplinske snage od 2,25 MW/m^2. Gorivo je uvijek bilo diesel-ulje, odnosno loživo ulje No. 2 s niskim sadržajem sumpora, naliveno u tave. Osim promjene veličine žarišta, sustavno su varirani protoci zračne struje, uzdužna brzina zraka na mjestu žarišta, te vrijeme odziva svakog pojedinog sustava ventilacije. Ispitivanjima se također željelo utvrditi utjecaj brzine uzdužnog strujanja zraka na učinkovitost sustava gašenje pjenom. Promjenama strategije upravljanja dimom i kombinacijom različitih strategija željelo se ustanoviti i parametre utjecaja gibanja zraka na kretanje dima, njegov uzgon i razrjeđivanje, te mogućnost sprječavanje backlayeringa[25] (kritične brzine). Ukratko, ciljevi ove ispitne serije bili su:

- Razviti opsežnu bazu podataka o temperaturi i gibanju dima na temelju ispitivanja ventilacije u pravom mjerilu, što bi dalje omogućilo jasnu komparativnu procjenu mogućnosti upravljanja dimom i toplinom putem sustava poprečne i uzdužne ventilacije u slučaju požarnog akcidenta.
- Odrediti u uvjetima požarnog ispitivanja u pravome mjerilu relativnu učinkovitost različitih konfiguracija sustava ventilacije, brzina ventilacije, te operativnih načina za upravljanje širenjem dima i topline tijekom tunelskih požara različitog intenziteta.

Rezultati nekih od tipičnih ispitivanja prikazani su u tablici 2.4.

Utjecaj različitih načina ventilacije na snagu požara (*HRR*) nije bio razmatran. Budući da nisu izvedene sustavne serije testova, pri kojima bi se mijenjala samo brzina strujanja zraka uz konstantne ostale parametre, već je konfiguracija aktivnih ventilatora više puta mijenjana tijekom ispitivanja, nije se došlo do jasne spoznaje kako različite ventilacijske strategije utječu na ponašanje požara. Korišteno diesel gorivo proizvodi mnogo dima i ima smanjen rizik od eksplozije u odnosu na benzin (mnogo više plamište, tipično iznad 62 ^{0}C u odnosu na plamište benzina od oko -40 ^{0}C). No kako se ovo gorivo nije koristilo kod većine drugih eksperimenata, teško je izvesti komparaciju s drugim ispitivanjima požara tave (lokve), kako u tunelu, tako i izvan njega. Bitni zaključci ove ispitne serije bili su:

Uzdužna ventilacija:

- Uzdužna ventilacija koja koristi jet-ventilatore vrlo učinkovito upravlja širenjem dima za požare do 100 MW. Ipak, ona je prikladna samo za jednosmjerne tunele.
- Uzdužna brzina zraka ovisi o broju aktivnih ventilatora i o njihovom potisku, a ne o konfiguraciji ventilatora.
- Požar snage 10 MW ima tendenciju smanjiti brzinu uzdužnog strujanja zraka za 10%, a požar od 100 MW ju smanjuje za 50-60%.
- Brzine strujanja zraka od 2,5-3 m/s su dovoljne da spriječe backlayering dima koji proizvodi požar snage 100 MW u Memorial tunelu.

Poprečna ventilacija:

- Pri požarnoj situaciji u tunelu nije dovoljno samo dovoditi (svježi) zrak, nego je potrebno otpadni zrak i odsisavati.

[25] Backlayering ili smoke backflow (natražni tok dima) je pojava kada učinak uzgona tjera dimne plinove (topao dim) od žarišta u smjeru koji je suprotan gibanju svježeg zraka uzrokovanog ventilacijom. Ova pojava se normalno želi izbjeći zbog zaštite ljudi na „uzvjetrenoj“ strani, posebno kod uzdužne ventilacije. Projektom ventilacijskog sustava obično se traži onemogućavanje backlayeringa u slučaju požara, tj. održavanje barem minimalne uzdužne brzine zraka u prometnom presjeku tunela, što se naziva kritična brzina.

- Uzdužna ventilacija je bitan faktor za upravljanje dimom i kod poprečno ventiliranih tunela.
- Multizonski ventilacijski sustavi mogu bolje upravljati dimom nego jednozonski sustavi.
- Odsis s jednim otvorom (SPE[26]) i predimenzionirani odsisni otvori (OEP[27]) signifikantno pojačavaju sposobnost ventilacijskog sustava da upravlja kretanjem dima i da ga izbacuje.

Tablica 2.4. Ispitni program u tunelu Memorial s različitim tipovima ventilacije [59]

Ispit. br.	**Sustav ventilacije**	**Brzina zraka (uzdužna), m/s**	**Površina tave, m^2**	**Q_{max}, MW**	**ϑ_{max}, ^{0}C**	**Visina tunela, H, m**
101CR	FTV	-	4,5	10	579,7	3,64
103	FTV	-	9	20	1368,2	3,64
113A	FTV	-	22,5	50	1369,9	3,64
217A	PTS/EV	-	22,5	50	1347,2	3,64
238A	TZPTV	-	22,5	50	1224,6	3,64
239	TZPTV	-	45	100	1298,3	3,64
312A	PTV-SPE	-	22,5	50	1302,2	3,64
313A	PTV-SPE	-	22,5	50	811,0	3,64
401A	PTV-OEP	-	22,5	50	1082,8	3,64
318A	PSPEO	-	22,5	50	1236,3	3,64
501	Prirodna	0,6	9	20	492,0	7,14
502	Prirodna	1,0	22,5	50	952,3	7,14
605	Uzdužna	1,8	4,5	10	177,8	7,14
606A	Uzdužna	1,5	4,5	10	197,9	7,14
607	Uzdužna	1,75	9	20	366,3	7,14
610	Uzdužna	2,5	22,5	50	528,3	7,14
612B	Uzdužna	2,5	22,5	50	561,0	7,14
615B	Uzdužna	2,0	45	100	1086,1	7,14
618A	Uzdužna	2,25	9	20	367,2	7,14
621A	Uzdužna	2,5	45	100	816,6	7,14
623B	Uzdužna	1,8	9	20	384,3	7,14
624B	Uzdužna	1,8	22,5	50	720,3	7,14
625B	Uzdužna	2,0	45	100	1067,2	7,14

Napomena i legenda uz tablicu 2.4:
Sva ispitivanja izvedena su s diesel gorivom.
FTV- Puna poprečna ventilacija
PTS/EV- Djelomično poprečna dovodno-odsisna ventilacija
TZPTV- 2-zonska djelomično poprečna ventilacija
PTV-SPE- Djelomično poprečna ventilacija s jednim odsisnim otvorom
PTV-OEP- Djelomično poprečna ventilacija s predimenzioniranim odsisnim otvorom
PSPEO- Ventilacija s točkastim dovodom i točkastim odvodom

[26] Single point extraction opening (SPE) je dio odsisnog poprečnog ventilacijskog sustava kojim se dim odsisava preko samo jednog odsisnog otvora smještenog što bliže žarištu požara, za razliku od sustava koji za odsis imaju niz otvora duž kanala zraka.
[27] Oversized exhaust ports (OEP) su dio odsisnog poprečnog ventilacijskog sustava kojima se dim odsisava preko nekoliko predimenzioniranih odsisnih otvora smještenih što bliže žarištu požara, za razliku od sustava koji za odsis imaju niz otvora duž kanala zraka.

Gibanje dima i topline:

- Vrijeme koje je potrebno da dim uđe u zonu boravka ljudi na pozicijama udaljenim od žarišta požara ovisi o visini tunela i o geometriji stropa.
- Signifikantno smanjenje vidljivosti nastupa brže nego za čovjeka opasna temperatura[28].

„Project Safety Tests": Ispitivanja u 2nd Benelux tunelu, Nizozemska, 2001.

Nakon požara u nekoliko alpskih cestovnih tunela u godinama 1999-2001. koji su uslijedili nakon prometnih akcidenata, odlučeno je da se izvede serija od 14 požarnih eksperimenata kako bi se istražili:

- uvjeti izdržljivosti[29] za osobe u tunelu u odnosu na širenje topline i dima nastalih u požaru,
- utjecaj ventilacije na veličinu požara,
- utjecaj sprinklera,
- mogućnosti djelovanja detektora požara tijekom požarnih incidenata u tunelima.

Parametri obuhvaćeni mjerenjima bili su temperatura, razina toplinske radijacije i optička gustoća dima u tunelu, kao i brzina širenja dima i snaga požara. Ispitivanja su izvedena u 2nd Benelux tunelu, Rotterdam, Nizozemska, neposredno prije nego što je taj tunel pušten u rad [60, 61, 62]. Ovaj tunel ima pravokutan poprečni presjek, visinu od 5,1 m, širinu 9,8 m, a duljine je 872 m. Na strop tunela i na gornji dio zidova sprejem je nanesena toplinska izolacija za poboljšanje vatrootpornosti tunelske građevine u skladu sa standardnom procedurom za nove tunele u Nizozemskoj. Za svrhe ispitivanja, zidovi, strop i pod tunelske cijevi pokriveni su dodatnom vatrootpornom oblogom u duljini od 35 m na obje strane od žarišta. Tunel ima maksimalni nagib od 4,4% i opremljen je uzdužnom ventilacijom. Na uzvjetreni portal tunela postavljeno je 6 jet-ventilatora, pa je dobivena mogućnost generiranja struje zraka brzine do 6 m/s.

Program ispitivanja obuhvatio je više vrsta žarišta. Na 4 tave-žarišta (ispitivanja 1-4) s brzinom ventilacije od 0 do 6 m/s, za gorivo je uzeta mješavina od 60% n-heptana i 40% toluena. Žarište se sastojalo od 1 odnosno 4 tave veličine 1,8 m (duljina) i 1 m (širina), koje su postavljene na visinu od 0,5 m iznad kolnika.

U ispitivanjima 5-10, žarišta su činili automobili i pokriveni tovar kamiona. Svaki od tovara sastojao se od 800 kg drvenih paleta (4 gomile od po 9 paleta, ukupno 36 Euro-paleta), a na vrh su stavljene po 4 autogume. Čitav tovar postavljen je na maketu kamiona, pokriven ceradom, a stražnji kraj cerade je otvoren. Ukupne dimenzije makete bile su 4,5 m (duljina), 2,4 m (širina) i 2,5 m (visina). Uzdužna brzina zraka varirala je od 0 do 6 m/s.

Pri ispitivanjima 11-14, različiti sprinkler sustavi aktivirani su nakon nekoliko minuta izgaranja u vremenu od 4 minute do 14 minuta. Gustoća primjene bila je 12,5 L/m^2min, što je osjetno manje nego pri testovima u Ofeneggu. Pri ispitivanjima s prirodnom ventilacijom, brzine zraka mjerene su na uzvjetrenoj strani žarišta.

Da bi se izmjerila snaga požara (*HRR*), pri svim su ispitivanjima (osim kod tava) žarišta postavljena na platformu koja se vagala. *HRR* za tave dobivena je mjerenjem brzine gubitka mase na tanku iz kojeg se dovodilo gorivo. Temperature zraka mjerene su na 5 različitih visina u simetrali tunela, na udaljenostima od 10 m, 20 m i 50 m na obje strane od žarišta, te

[28] Američka NFPA u svim svojim dokumentima, uključujući i promotivne letke za širu publiku, uvijek jasno navodi: „Smoke is the killer". Drysdale navodi da se prema britanskim i američkim statističkim podacima više od 50% smrtnih žrtava može pripisati udisanju čestica dima i toksičnih plinova [37].

[29] Tenability conditions (engl.). Pod ovim pojmom podrazumijevaju se faktori kao što su temperatura i vlažnost zraka, toplinska radijacija, koncentracije plinova (O_2, CO, CO_2, HCN itd.), svaki utjecaj zasebno ili u različitim kombinacijama, koje prosječan čovjek može izdržati, a sve u funkciji vremenskog trajanja utjecaja tih faktora.

još na 200 m niz vjetar. Toplina zračenja žarišta mjerena je pomoću hlađenih mjerača toplinskog toka u visini očiju čovjeka, na udaljenosti od 5 m, 10 m i 20 m od žarišta. Brzine zraka mjerene su na 3 pozicije na uzvjetrenoj strani žarišta pomoću anemometara sa žarnom niti, te na 3 pozicije na nizvjetrenoj strani pomoću dvosmjernih osjetnika. Neki od rezultata prikazani su u tablici 2.5.

Tablica 2.5. Dio ispitivanja na 2nd Benelux tunelu [61, 62]

Ispit. br.	Žarište	Tip ventilacije	Brzina zraka, m/s	Površina tave, m^2	Temp. okoline, ^0C	Q_{max}, MW	ϑ_{max}, ^0C
1	n-heptan/toluen	Bez LTV	1,5	1,8	13	4,1	218
2	n-heptan/toluen	LTV	2	1,8	15	3,5	220
3a	n-heptan/toluen	Bez LTV	1,7	7,2	12	11,5	470
3b	n-heptan/toluen	LTV	5	7,2	12	11,5	250
4	n-heptan/toluen	LTV	5	7,2	11	11,4	210
5	Automobil	Bez LTV	1	-	10	NA	230
6	Automobil	Bez LTV	1,5	-	10	4,9	210
7	Automobil	LTV	6	-	10	4,8	110
8	36 drv. paleta, 4 autogume	Bez LTV	1,5	-	10	13,2	400
9	36 drv. paleta, 4 autogume	LTV	5,3	-	10	19,5	290
10	36 drv. paleta, 4 autogume	LTV	5	-	10	16,5	300

Legenda: LTV- uzdužna ventilacija

Glavni zaključci nakon ove serije testova bili su sljedeći:

- Zbog visoke razine toplinskog zračenja, letalni uvjeti stvaraju se unutar 6 m od potpuno razvijenog požara automobila. U požaru malog HGV, ova se udaljenost povećava na 12 m. Zbog povoljne konvekcije i stratifikacije dimnih plinova, niti na ovim lokacijama bliskima žarištu, CO ne ugrožava život ljudi.
- I s i bez uzdužne ventilacije, vidljivost je zbog dima bila loša unutar 100-200 m udaljenosti od žarišta. Ipak, na ovim lokacijama nisu prekoračene granice toksičnosti.
- Pri visokoj brzini ventilacije, razvoj požara putničkog automobila bio je usporen do 30 minuta ako je izgaranje započelo na prednjem kraju vozila, a strujanje zraka je dolazilo sa stražnjeg kraja. Visoke brzine ventilacije imale su tendenciju da ubrzaju izgaranje pri požaru HGV do 20 MW, ali su temperature plinova na lokalitetu vozila bile smanjene zbog jače ventilacije.
- Sprinkleri su značajno smanjili i temperaturu zraka i temperature vozila koja su bila u blizini požara. Pri testovima u okviru opsega ispitanih vozila, nisu uočene letalne temperature, a širenje požara bilo je pod kontrolom. Stvaranje vodene pare nije uočeno.
- Linearni detektori požara općenito su alarm aktivirali više od 5 minuta nakon nastanka požara. Pri brzorastućim požarima, ovo se vrijeme skratilo na 3 minute. U uvjetima prirodne ventilacije, požar je u pravilu detektirao senzor koji je bio udaljen manje od 5 m. U uvjetima prisilne ventilacije, detektor koji se aktivira može biti udaljen i do 20 m.

- Oznake evakuacijskih putova postale su zbog dima vrlo brzo nevidljive, pa je preporučeno da se takve oznake postavljaju na maloj visini.

Serija požarnih ispitivanja Runehamar tunel, 2003.

U napuštenom cestovnom tunelu Runehamar u Norveškoj izvršena je rujna 2003. serija od 4 požarna ispitivanja [63, 64]. Ovaj tunel bio je prethodno dvosmjerni cestovni tunel s asfaltiranim kolnikom. Duljina tunela je 1600 m, visina 6 m, širina 9 m, a nagib varira od 0,5-1%. Unutarnje stjenke su od grubog kamena (od miniranja), a površina poprečnog presjeka varira od 47-50 m^2. Na lokaciji požarnih eksperimenata, približno 1 km u dubini tunela, 75 dužnih metara tunela obloženo je vatrozaštitnim panelima, čime je površina poprečnog presjeka na mjestu žarišta smanjena na 32 m^2 (visina na 4,7 m). Ciljevi ove serije eksperimenata bili su da se ispita:

- razvoj požara na tovaru HGV,
- utjecaj uzdužne ventilacije na snagu požara (*HRR*) i na brzinu porasta snage,
- stvaranje toksičnih plinova,
- prenošenje požara s vozila na vozilo,
- mogućnosti za gašenje požara,
- razvoj temperature pod svodom tunela i duž tunela.

Za svako od ispitivanja pripremljeno je požarno opterećenje (maketa), koje odgovara jednom tipičnom HGV tegljaču s poluprikolicom. Tovari su se sastojali od standardnih drvenih paleta, plastičnih paleta izrađenih od polietilena (PE), čaša od polistirena (PS) u kartonskim kutijama i madraca od poliuretana (PU). Pri svakom ispitivanju, tovar je bio pokriven ceradom od poliestera. Dimenzije makete prikolice tegljača bile su: duljina 10,45 m, visina tereta 2,9 m (podnica prikolice na 1,1 m iznad površine kolnika), ukupna visina čelične konstrukcije 4,5 m (sa ceradom).

Požarno opterećenje pri prvom ispitivanju sastojalo se od 10,9 t drvenih i plastičnih paleta. Na udaljenosti od 15 m od nizvjetrene strane žarišta (stražnji kraj makete prikolice) postavljen je „ciljni objekt“, koji se sastojao od jednog reda paleta od istih materijala od kojih je bilo žarište. Odgovarajući ciljni objekti postavljeni su i pri sljedeća 2 ispitivanja. U drugom ispitivanju, požarno opterećenje sadržavalo je 6,9 t drvenih paleta i madraca. U trećem ispitivanju, požarno opterećenje sastojalo se od 7,7 t namještaja na drvenim paletama, kao i 10 autoguma (800 kg) postavljenih oko nosivog okvira na mjesta na kojima bi se one nalazile na pravoj HGV prikolici. U četvrtom ispitivanju, požarno opterećenje bilo je sastavljeno od 2,8 t plastičnih čaša u kartonskim kutijama koje su se nalazile na drvenim paletama, a ciljnog objekta nije bilo. Procijenjena količina plastičnih materijala pri svakom od ispitivanja bila je 18-19% (maseno).

Prilikom svakog ispitivanja, za stvaranje uzdužnog strujanja zraka korištena su 2 ventilatora postavljena u blizini portala tunela. Brzina strujanja zraka iznosila je oko 3 m/s na početku svakog ispitivanja (na sredini presjeka), no kad bi se požar potpuno razvio, brzina je smanjena na 2,4-2,5 m/s. Vršna toplinska snaga (HRR_{max}) ovih žarišta bila je u rasponu od 67-202 MW, a vršne temperature plinova oko 1250-1350 ^{0}C. Ovakve snage i temperature prethodno su u tunelima bile ustanovljene samo pri ispitivanjima s tekućim gorivima. Unatoč relativno malim izvorima paljenja, razvoj požara bio je vrlo brz, pa su vršne *HRR* dosegnute nakon 8-18 minuta po zapaljenju.

Objavljeni zaključci ove ispitne serije bili su sljedeći:

- „Obični“ (ne-opasni) tereti HGV mogu proizvesti toplinske snage (*HRR*) usporedive sa scenarijem požara tankera s gorivom [64]
- Pri požarima HGV u tunelu mogu se razviti temperature iznad 1300 ^{0}C [63].

- Kad su se požari potpuno razvili, brzina ventilacije je smanjena i nastupio je backlayering [63].
- Pri ispitivanju 1 i 2 primijećen je fenomen „pulsiranja“ požara [64].
- Požarna krivulja RWS je najbolja standardna požarna krivulja za prikaz požara HGV u tunelu [63].

Tablica 2.6. Ispitivanja na Runehamar tunelu [63, 64]

Ispit. br.	**Žarište**	**Ciljni objekt**	**Sadržaj topline žarišta E_{tot}, GJ**	**Temp. okoline, ^{0}C**	**Q_{max}, MW**	**ϑ_{max}, ^{0}C**
T1	Drvene i plastične PE palete, cerada	32 drv. palete, 6 PE paleta	242	12	202	1365
T2	Drvene palete, PU madraci, cerada	20 drv. paleta, 20 PU madraca	141	11	157	1282
T3	Namještaj, pribor, cerada	Podstavljene sofe i naslonjači na paletama	131	9,5	119	1281
T4	PS čaše u saću u kartonskim kutijama, drvene palete, cerada	Bez cilja	62	11	67	1305

2.2 Požarni eksperimenti u pravom mjerilu za procjenu učinkovitosti stacionarnih (sprinkler) sustava

Ispitivanja sustava za gašenje/supresiju požara, Japan 1963-1985.

Nakon nekoliko poznatih katastrofalnih tunelskih požara, koji su se dogodili koncem 1990-ih i početkom 2000-ih godina u Europi, predmet zanimanja i stručnih debata postalo je pitanje stacionarnog sustava za gašenje u tunelu [65]. Mišljenja stručnjaka bila su vrlo podijeljena u odnosu na to da li benefiti koje donosi takav sustav (prvenstveno gašenje ili bitna redukcija veličine požara) nadmašuju negativne posljedice (npr. smanjenje vidljivosti). Uporaba stacionarnih sustava za gašenje u tunelima, kao što su vodena magla, sprinkler i deluge sustav postala je tema mnogih istraživačkih programa u Europi. Najveći dio istraživanja u posljednjih 10-ak godina obavile su tvrtke koje razvijaju sustave vodene magle. Prije izbijanja prvih katastrofalnih požara u alpskim tunelima 1999. godine, Japan je bio jedina zemlje u svijetu koja je ozbiljno razmotrila, ispitala i u značajnijoj mjeri primijenila sprinkler sustave u vlastitim cestovnim tunelima. U sve japanske tunele klase AA obvezno se postavljaju sprinkler sustavi [66][30], a prema potrebi ugrađuju se i u tunele klase A. Tijekom godina, u japanskim tunelima izveden je znatan broj požarnih ispitivanja u pravom mjerilu, od kojih su neka navedena u nastavku:

- Požarni eksperiment u Tennozan tunelu, tava alkohola 8 m^2, polupoprečna ventilacija, sprinkleri, 1963.
- Požarni eksperiment u Kanmon tunelu, tava benzina 1 m^2, poprečna ventilacija, 1964.

[30] Klasa tunela bazirana je na gustoći prometa i duljini tunela, pa npr. tuneli duljine > 3 km s gustoćom prometa > 40000 vozila na dan pripadaju u klasu AA.

- Požarni eksperiment s autobusom i tavom benzina od 6 m^2, uzdužna i polupoprečna ventilacija, sprinkleri, 1968.
- Požarni eksperiment s automobilom i natovarenim kamionom od 6 t, uzdužna ventilacija, sprinkleri, 1968.
- Požarni eksperiment s kamionom, malim furgonom i tavom benzina 6 m^2, uzdužna ventilacija, sprinkleri, 1969.
- Požarni eksperiment u Nihonzaka tunelu, tava metanola 6 m^2, polupoprečna ventilacija, sprinkleri, 1969.
- Požarni eksperiment u Amikake tunelu, tava metanola 4 m^2, polupoprečna ventilacija, sprinkleri, 1975.
- Požarni eksperiment u Tokyo Port tunelu, tava benzina 1 m^2, polupoprečna ventilacija, sprinkleri, 1976.
- Požarni eksperiment u Tohoku Expressway tunelu, tava benzina 1 m^2, prirodna ventilacija, sprinkleri, 1979.
- Požarni eksperiment s autobusom i tavom benzina 4 m^2, prirodna ventilacija, sprinkleri, 1983.
- Dva požarna eksperimenta u Enasan tunelu, tave benzina 1 m^2 i 2 m^2, poprečna i uzdužna ventilacija, sprinkleri, 1985.
- Požarni eksperiment u Kan'etsu tunelu s autobusom i tavom benzina 4 m^2, uzdužna ventilacija, sprinkleri, 1985.

Rezultati ovih eksperimenata objavljeni su samo na japanskom jeziku, a sažetak na engleskom nekih od njih nalazi se u [66]. Općeniti zaključak navodi da su sprinkleri u stanju reducirati veličinu požara i temperaturu, te time spriječiti širenje požara na susjedne objekte. Prvi japanski tunel u kojem su instalirani sprinkleri bio je Tennozan tunel godine 1963. Iz gotovo 50-godišnjeg iskustva, japanske vlasti (Japan Highway Public Corporation i Metropolitan Expressway Public Corporation) izvješćuju da se sprinkler sustavi aktiviraju 2-3 puta godišnje u požarnim incidentima u tunelima. Smatra se da su u tim slučajevima sprinkleri ohladili žarišta požara i spriječili njihovo širenje. Slučajevi lažnog aktiviranja ili nefunkcioniranja nisu zabilježeni [66].

2.3 Požarna ispitivanja tunelskih požara u umanjenom i u laboratorijskom mjerilu

Požar je po svojoj prirodi, kao brzo izgaranje odnosno brza oksidacija gorive tvari, tipična termodinamička pojava. Ipak, pojave koje se u tehničkoj termodinamici najčešće proučavaju događaju se u pravilu između jasno definiranih tehničkih objekata međusobno, ili između njih i otvorenog okoliša. Vrlo se često te pojave događaju u zatvorenim volumenima, kao što su npr. toplinski strojevi, cjevovodi, procesne posude, izmjenjivači topline, građevine, vozila svih vrsta itd. Osim kratkotrajnih prijelaznih stanja na početku i na kraju izgaranja, te su pojave redovito relativno stacionarne po naravi i dobro definirane, kako po vrsti, obliku, materijalu i svojstvima tehničkih objekata, tako i po medijima koji su prisutni. Stoga se ove pojave uglavnom mogu smatrati determinističkima. Za razliku od njih, požari se često događaju u slabo definiranim uvjetima, gdje vrste goriva koja sudjeluju u požaru, prostorni i vremenski raspored tih goriva, njihova količina, okoliš požara, vrijeme i mjesto paljenja mogu biti posve proizvoljni, pa su u pitanju termodinamičke pojave čiji se tijek u različitim slučajevima može vrlo značajno međusobno razlikovati[31]. Požari su stoga tipične stohastičke pojave, pa ih je, isto kao i druge stohastičke pojave, moguće proučavati samo uz pomoć

[31] Vatrogasci obično vole isticati da je svaki požar „priča za sebe“, tj. da ne postoje dva jednaka požara.

statistike. To podrazumijeva da će uz dobru i pažljivu pripremu, uvjeti i rezultati eksperimenta sličiti najčešćim i najvjerojatnijim stvarnim događajima, no vrlo se rijetko i samo slučajno mogu poklopiti s nekim određenim stvarnim požarom. Neovisno o tome, eksperimenti su vrlo korisni i potrebni, no uvijek treba imati na umu da se požarni scenarij pri stvarnom požaru može bitno razlikovati od onoga predviđenog scenarijem eksperimenta. Pri eksperimentima u umanjenom mjerilu ovaj problem dolazi još više do izražaja.

Da bi se dobili upotrebljivi rezultati požarnih eksperimenata u umanjenom mjerilu, mora se uspostaviti jasno definirana sličnost između modela i objekta koji se proučava u pravome mjerilu [67]. Ako postoji velika sličnost, tada se (umanjeni) model može koristiti za istraživanje specifičnih aspekata ponašanja vatre ili dima. Ako sličnost nije velika, tada ponašanje vatre ili dima na modelu može pružiti samo informacije općenitog karaktera. Da bi se između stvarnosti i umanjenog modela uspostavila velika sličnost, potrebno je razmotriti tok plina u i oko vatre.

Tok plina može se klasificirati korištenjem bezdimenzijskih značajki (brojeva). Za vatru se uobičajeno koristi Froudeova značajka (Fr):

$$\mathrm{Fr} = \frac{u^2}{gL} \tag{2.1}$$

Pri čemu je u brzina plinova, g je gravitacijska akceleracija, a L je karakteristična dimenzija sustava (najčešće visina tunela, H). Za klasifikaciju ponašanja požara koriste se i druge bezdimenzijske značajke, kao što su Reynoldsova (Re), Richardsonova (Ri) i Grashofova (Gr):

$$\mathrm{Re} = \frac{uL}{v} \tag{2.2}$$

$$\mathrm{Ri} = \frac{gL}{u^2} \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho} \tag{2.3}$$

$$\mathrm{Gr} = \frac{gL^3}{v^2} \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho} \tag{2.4}$$

pri čemu je v kinematički viskozitet, ρ je specifična gustoća dimnih plinova, a $\Delta\rho$ je razlika između njihove gustoće i gustoće okolnog zraka. Grashofova značajka je u biti kombinacija Reynoldsove i Richardsonove ($\mathrm{Gr} = \mathrm{Re}^2 \cdot \mathrm{Ri}$). U idealnom će slučaju svaka od ovih značajki biti jednaka u stvarnosti i na umanjenom modelu. U stvarnom životu to nije uvijek moguće, pa se modeli uobičajeno „skaliraju“ tako da se zadrži jednakost samo Froudeove značajke. Pretpostavka da će se time očuvati sličnost je ispravna osim u slučaju vrlo malenih modela, budući da promjene Reynoldsove značajke nemaju signifikantan utjecaj na strujanje u turbulentnom području.

Froudeova značajka proporcionalna je s HRR^2/L^5. To npr. znači da će za geometrijski jednake proporcije tunela čija visina iznosi ½ L, odgovarajuća toplinska snaga modelskog žarišta (HRR_M) biti $0{,}177 \cdot HRR$ ($0{,}5^{5/2} = 0{,}177$). Na sličan se način brzina ventilacije na umanjenom modelu smanjuje u omjeru s $L^{1/2}$, pa će se npr. brzina zraka od 2 m/s modelirati s umanjenom brzinom od 1,41 m/s. Naprotiv, temperatura žarišta biti će jednaka u pravoj veličini i na malome modelu [68].

Ipak, rezultati ispitnih serija požara u umanjenom mjerilu nikad se ne smatraju toliko relevantnima kao rezultati ispitivanja izvedenih u pravome mjerilu[32], a često nisu niti javno dostupni.

Budući da je interes ove disertacije prvenstveno usmjeren prema analizi velikih, tj. katastrofalnih požara, za prevenciju kojih je prema uvjerenju autora disertacije jedina dovoljno pouzdana mjera postavljanje stacionarnih sustava za gašenje/supresiju/kontrolu[33] u tunele, potrebno je dodatno istaknuti stohastičku karakteristiku požara, napose procesa njegovog gašenja. Budući da su vatra odnosno požar po svojoj su prirodi slučajne, a moglo bi se čak reći i hirovite pojave, ponašanje vatre i njeni rezultati mogu u posve jednakim uvjetima pokazati znatne međusobne razlike. Ova činjenica posebno je važna pri ispitivanjima gašenja požara stacionarnim sustavima. Ta se ispitivanja praktički uvijek izvode u pravome mjerilu da bi se rasipanje rezultata i otklon od stvarne situacije sveli na najmanju moguću mjeru. Prijenos požara s objekta na objekt na neku udaljenost (tipično desetak metara ili više), npr. pri požaru vozila u tunelu, a što je jedan od redovitih „okidača" za nastup katastrofalnog požara, eklatantan je primjer ove stohastičnosti. Drugim riječima, zasad je nemoguće bilo eksperimentom ili numeričkim računalnim metodama dovoljno točno predvidjeti kako će se tijek požara događati u jedno određeno vrijeme nekog određenog dana [70]. Još je teže do pravih rezultata doći kada se proučava utjecaj FFFS[34] s vodom ili pjenom na požar, jer je vrlo teško skalirati međuodnos vodenih kapljica s požarom i dimom, pa se relevantni rezultati mogu očekivati jedino od testova izvedenih u pravom mjerilu [71]. Bez obzira na njihovu malobrojnost, eksperimentalna istraživanja požara u tunelima znatno su poboljšala razumijevanje fenomena požara u njima i dovela do razvoja boljih i prikladnijih tehnologija za prevenciju, zaštitu i ublažavanje posljedica tih požara. Dojam je naime da bi u protivnom tijekom posljednjeg desetljeća češće dolazilo do katastrofalnih ishoda požara sličnih onima u tunelima Mt Blanc (1999.) i St. Gotthard (2001.).

2.4 Ciljevi i osnova istraživanja

Cilj ove disertacije je analiza mjera za prevenciju katastrofalnih požara u cestovnim tunelima. Drugim riječima, istraživanje je usmjereno na:

- Predviđanje mogućih uzroka katastrofalnih požarnih događaja, scenarija događanja i posljedica,
- Analizu mogućnosti za smanjivanje frekvencije tih događaja (dobrom preventivom),
- Analizu mogućnosti za veću samopomoć potencijalno ugroženih osoba u tunelu,
- Analizu mogućnosti za sprječavanje razvoja malih akcidenata prema potencijalno katastrofalnim scenarijima kroz što raniju intervenciju u inicijalnoj fazi, što je vjerojatno moguće postići jedino ugradnjom automatskih stacionarnih sustava za gašenje/supresiju/kontrolu požara,
- Analizu granica mogućnosti intervencije vatrogasnih postrojbi,

[32] The only way to represent all the numerous phenomena involved in a fire with no risk of error is to perform a full scale test [69].

[33] Pojam kontrole, a posebno pojam supresije požara, su novi u području stacionarnih sustava za zaštitu od požara. U literaturi, u normama (EN) i u standardima (NFPA), oni su nedovoljno precizno definirani. Stoga je često u literaturi, posebno onoj starijoj od nekoliko godina, iznimno teško razlučiti da li je autor mislio na (potpuno) gašenje požara ili samo na supresiju odnosno kontrolu, kao gašenje koje ne završava potpunom eliminacijom izgaranja. Autor disertacije pokušao je u Rječniku manje poznatih termina u inženjerstvu sigurnosti i zaštite (u Prilogu) jasnije definirati spomenute pojmove na temelju dostupnih podataka i vlastitog razmišljanja.

[34] FFFS, Fixed Fire Fighting System.

- Izradu konceptualnog prijedloga rješenja automatskog stacionarnog sustava za gašenje/supresiju/ /kontrolu požara, uključujući prijedlog za standardiziranje ispitnog tunelskog žarišta i protokola ispitivanja.

Posljednjim dvjema točkama, analizi i istraživanju mogućnosti i kapaciteta intervencije vatrogasne službe te izradi konceptualnog prijedloga rješenja automatskog stacionarnog sustava za gašenje/supresiju/kontrolu požara (uključujući prijedlog za standardiziranje ispitnog žarišta i protokola ispitivanja) posvećena je posebna pažnja, jer su ove dvije točke usko međusobno povezane. Od vatrogasne se službe naime ponekad očekuje znatno više nego što je to realno moguće. Mnogi stručnjaci i istraživači precjenjuju mogućnosti vatrogasaca, vjerujući da su oni u stanju ugasiti svaki požar pred kojim se nađu i da će „već nekako improvizirati rješenje“, što je posve pogrešan pristup problemu. Vatrogasna služba ima granice do kojih može obaviti brzo i uspješno spašavanje i gašenje. Granice mogućnosti uspješnog djelovanja vatrogasne službe određene su brojem i sposobnošću vatrogasaca, vrstom, kvalitetom i količinom opreme i sredstava za gašenje požara, razinom opasnosti koju su vatrogasci spremni prihvatiti, objektivnom situacijom na požarištu itd. Na koncu svaki požar biva ugašen, mada oni katastrofalni često završe tek onda kad se iscrpi sve raspoloživo gorivo. Ovaj rad ima za cilj da pokuša dati rješenje za sprječavanje upravo takvih situacija, na način da se što ranije zaustavi porast snage požara. U idealnom će slučaju snaga požara pod djelovanjem automatskog stacionarnog sustava opadati sve dok izgaranje ne prestane (slučaj gašenja). U stvarnom slučaju to često neće biti moguće ostvariti, ali će ipak ograničena snaga požara biti će dovoljno dugo zadržana unutar mogućnosti gašenja koje ima normalna vatrogasna služba (slučaj supresije/kontrole).

Postoje situacije i akcidenti s „trenutnim razvojem“, kao što su npr. eksplozije raznih vrsta, ispuštanja toksičnih tvari i sl., gdje su posljedice predodređene gotovo u istom trenutku kad je takav događaj nastupio, imajući u vidu lokaciju akcidenta u određenom tunelu, uvjete strujanja zraka, atmosferske uvjete, broj i razmještaj ljudi i vozila u tunelu itd. Ovakve događaje ne može onemogućiti i njihove posljedice ne može bitno umanjiti niti automatski stacionarni sustav za gašenje/supresiju/kontrolu požara projektiran tako da započne djelovati odmah po detektiranju opasnosti, kao niti vatrogasna služba bilo koje vrste. Vatrogasci, čak ako su locirani uz portal tunela, ovdje mogu djelovati samo „post festum“. Međutim, velika većina dosad zabilježenih katastrofalnih požara dogodila se po scenariju postepenog, iako relativno brzog rasta, gdje je dovoljno brza intervencija, koja bi započela unutar prvih nekoliko minuta po izbijanju požara, mogla spriječiti da ovakvi akcidenti budu uopće zabilježeni u medijima masovnih komunikacija. Cilj ovog rada je prvenstveno da rasvijetli ova događanja i njihov tijek, te da kroz znanstvenu i tehničku analizu pokaže kako se ona mogu riješiti s relativno malim posljedicama i uz razuman trošak.

Scenarij odgovora sigurnosnog sustava tunela na požar može se načelno zamisliti i planirati na dva načina, koje će autor, u nedostatku uobičajenog znanstveno prihvaćenog kriterija podjele, nazvati: 1 - „ventilacijski“ pristup i 2 – „vatrogasni“[35] pristup. Oni se ukratko i vrlo grubo mogu opisati na sljedeći način:

1- **„Ventilacijski“ pristup:** Najopasniji učinak požara (posebno velikog požara) za ljude u tunelu je svakako dim. Stoga treba stvoriti takve uvjete strujanja i odvođenja dima, da se dim što dulje zadrži u gornjem dijelu tunela, iznad visine od cca 2 m i omogućiti hitnu evakuaciju ljudi u sigurnu zonu putem gusto postavljenih izlaza. U tu svrhu treba

[35] Pod pojmom „vatrogasni“ ovdje se ne misli na pristup kojim vatrogasci rješavaju požar, već na želju i namjeru da se požar/vatra ugasi ili barem stavi pod kontrolu što je prije moguće.

projektirati i postaviti odgovarajući sustav požarne ventilacije, kojom će se osim dima odvesti i znatan dio toplinske energije stvorene izgaranjem. Za izlaz ljudi u sigurnu zonu treba predvidjeti što veći broj izlaza iz tunelske cijevi opremljenih vatrootpornim vratima. Požar će nastaviti gorjeti, a riješit će ga vatrogasci kada stignu, ali tek nakon što dovrše fazu „potpomognutog spašavanja ljudi“[36]. Uostalom, gašenje požara i spašavanje je njihov posao i oni to sigurno mogu najbolje obaviti. Budući da će intervencija vatrogasaca započeti u najboljem slučaju u roku od cca 15 minuta po izbijanju požara, da će gašenje požara trajati najmanje pola sata, a može se protegnuti i na više sati, predvidjeti će se mjere za održavanje funkcije bitnih servisnih sustava tunela i njegovog fizičkog integriteta: ventilacije (toplinski otporni ventilatori i kanali za zrak, kod poprečne i polupoprečne ventilacije), električnih instalacija (posebno rasvjete, komunikacija i signalizacije), građevinskih elemenata (vatrootporna vrata i izlazi) i posebno same konstrukcije tunela (toplinski otporni betoni i/ili toplinska izolacija armiranog betona od kojeg je sagrađena tunelska cijev). Ako sve bude išlo po planu, oštećenja na tunelu neće biti suviše velika, pa će se tunel otvoriti za promet nakon tjedan ili dva. U protivnom, barem će ljudi biti spašeni, a to je i najvažnije.

2- **„Vatrogasni“ pristup:** Najopasniji učinak požara (posebno velikog požara) za ljude u tunelu je svakako dim. Stoga požar treba što prije ugasiti ili barem ograničiti i zaustaviti njegov rast, jer kad nema vatre, nema niti dima. U tu svrhu potrebno je ugraditi sustav za što ranije otkrivanje i što preciznije lociranje mjesta požara, kao i automatski stacionarni sustav za njegovo gašenje/supresiju/kontrolu, koji će požar „napasti“ po mogućnosti odmah, bez odgode. Ako se kao tipična brzina porasta velikog požara uzme 10-20 MW/minuta[37], onda je bitno da gašenje, odnosno ograničavanje porasta njegove snage, započne unutar prve 2 minute po njegovom izbijanju. Sustav raspršene vode (ili pjene) će ugasiti ili barem zaustaviti rast požara u inicijalnoj fazi, djelomice će oboriti čestice dima i plinske produkte izgaranja, te hladiti okolnu atmosferu, instalacije i građevinu. Stoga se ostale zaštitne mjere mogu primijeniti „relaksirano“: požarna ventilacija može se dimenzionirati na manji kapacitet zbog manje razvijene količine dima i topline, međusobna udaljenost izlaza u siguran prostor može se povećati, ventilatori mogu imati manju razinu toplinske otpornosti isto kao i sigurni izlazi, a betonsku tunelsku konstrukciju i kanale za zrak nije potrebno dodatno štititi od utjecaja topline. Vatrogasci će vjerojatno morati dovršiti gašenje požara, ali nije presudno da li će gašenje započeti nekoliko minuta ranije ili kasnije, jer požar ostaje mali, pod kontrolom je i ne raste, a možda je u trenutku dolaska vatrogasaca već i ugašen. Intervencija vatrogasaca biti će bitno lakša i kraća, sigurnija za intervencijsko osoblje, oštećenja na tunelu biti će ograničenog karaktera, pa će se tunel gotovo sigurno ponovno pustiti u promet nakon najviše nekoliko dana. Ljudskih žrtava uzrokovanih djelovanjem požara u pravilu neće biti.

Tradicionalni pristup, koji dobrim dijelom još i danas prevladava, je onaj prvi. To se ogleda u velikoj većini propisa, standarda i preporuka za zaštitu tunela od požara[38]. To se isto tako

[36] Umjesto izraza „potpomognuto spašavanje“, kao prijevod engleskog „assisted rescue“ koristi se i izraz „spašavanje uz asistenciju“ [73].

[37] Za vršni *HRR* < 30 MW, preporučuje se usvojiti gradijent porasta *HRR* od 10 MW/min, a ako je vršni *HRR* > 30 MW, preporučuje se gradijent porasta *HRR* od 20 MW/min [72].

[38] Ovaj pristup jasno se vidi u PIARC dokumentu [8]: *As in a tunnel the ventilation capacity is the only parameter able to counterbalance the effects of a fire, the control of the longitudinal air velocity often appears of common interest for all these studies*. Očito pod utjecajem PIARC, isti pristup se nalazi i u [73]: *Razlog takvog širokog interesa leži prvenstveno u činjenici da je sustav ventilacije jedini koji se svojim radom može*

ogleda i u znanstvenom interesu, jer je u svijetu objavljeno mnogo više radova na temu ventilacije i upravljanja dimom u tunelima nego na temu gašenja požara u inicijalnoj fazi. Nedostaci i propusti „ventilacijskog pristupa“ uočeni su vrlo brzo nakon požara u tunelima Mt Blanc i Tauern (1999.), na skijalištu Kitzsteinhorn (2000.) i u tunelu St. Gotthard (2001.). Bjegović i sur. [74] konstatirali su da su uzroci tih katastrofa povezani s pogrešnim vjerovanjem u mogućnosti sustava ventilacije, jer niti „najbolji“ sustav potpuno poprečne ventilacije nije u stanu spriječiti brzo širenje vrućeg i toksičnog dima.

U posljednje se vrijeme situacija donekle mijenja. Uvođenje automatskih stacionarnih sustava za gašenje uglavnom se više ne „odsavjetuje“ kao prije, već se preporučuje da se njihovo (ne)uvođenje razmotri u procjeni rizika, pa ako se procijeni da su benefiti veći od troška, da se ipak primijene. Kao jedan od većih razloga za dvojbu još se uvijek ističe pitanje cijene postavljanja i troška održavanja stacionarnog sustava. Pritom se u analizu i procjenu rizika često ne žele uključiti moguće uštede na tunelskoj građevini, sustavu požarne ventilacije, drugim instalacijama i uređajima, te uštede na račun mogućeg umanjenje ostalih zahtjeva, kao što su npr. smanjenje broja izlaza za slučaj nužde i/ili dežurnih vatrogasaca[39]. Činjenica je da su važeći propisi/standardi/preporuke za tunele, uključujući i europsku Direktivu [75], još uvijek u najvećem dijelu preskriptivnog tipa, što onda ne dozvoljava da se tražena razina sigurnosti postigne na način koji je različit od propisanog. Čak se i samo pitanje o mogućnosti umanjenja nekih od tradicionalnih zahtjeva za postizanje sigurnosti, s prijedlogom da se oni nadoknade kroz benefite koje pruža automatski stacionarni sustav za gašenje, ponekad smatra „tabu“ temom zbog razloga koji su teško dokučivi i shvatljivi u kritičkoj znanstvenoj i tehničkoj analizi koja nije opterećena predrasudama.

Ipak, iz prethodnog izlaganja ne bi nikako trebalo zaključiti da sustav požarne ventilacije pri „vatrogasnom pristupu“ ima podređenu ili nebitnu ulogu pri požaru. I s umanjenom snagom požara potrebno je putem ventilacije osigurati uvjete za sigurno preživljavanje ljudi u tunelu prilikom požara, ali pokušati to postići samo s ventilacijom, može biti nepotrebno skupo i nedovoljno učinkovito. Ventilacija je nesporno potrebna pri redovnom djelovanju tunela, no požarna ventilacija potrebna je samo pri požaru. Kada nastanak požara ne bi bio moguć, potreba za požarnom ventilacijom bi nestala. Ako produkti izgaranja ne bi ugrožavali sigurnost ljudi i tunela općenito, požarna ventilacija također ne bi bila potrebna, što je slučaj požara na otvorenom prostoru cesta i autocesta. U stvarnosti je požar uvijek moguć, pa je požarna ventilacija u zatvorenom prostoru „conditio sine qua non“. Ipak, mišljenje je autora disertacije, da optimalno tehničko rješenje, koje će uz minimalni ukupni trošak biti u stanju pružiti i maksimalnu ili barem prihvatljivu razinu sigurnosti, u dugim i prometno visoko opterećenim tunelima često neće biti moguće postići ako se u opseg mogućih sigurnosnih mjera i instalacija ne uključi i automatski stacionarni sustav za gašenje/supresiju/kontrolu požara. Cilj disertacije biti će kroz znanstvenu i tehničku analizu dokazati ovu tvrdnju, predložiti konceptualno rješenje odgovarajućeg stacionarnog sustava i način selekcije optimalnog sustava.

aktivno „suprotstaviti“ negativnim efektima požara u tunelu, te je njegovo djelovanje u požarnim uvjetima od izuzetne važnosti.

[39] Gledano holistički, tj. ako se požar i reakcija na njega promatraju kao jedna objedinjena cjelina, teško je naći opravdanje za „dodavanje sigurnosti na sigurnost“.

3. Europski projekti, Europska direktiva i usporedba s ostalim relevantnim standardima i preporukama

3.1 Europski projekti o sigurnosti tunela

Historijska je činjenica da su se u Europi u kratkom vremenskom periodu dogodili neki od najtežih katastrofalnih požara u razvijenom svijetu. Posebno su teške posljedice imali požari u tunelima Mt Blanc[40] i Tauern[41] (1999.), St. Gotthard (2001.) i Eurotunel (željeznički, 1996.[42]) a po broju žrtava najtragičniji je bio požar u tunelu skijališta Kitzsteinhorn[43] (zupčasta željeznica, 2000.). Pažnja javnosti, političara i znanstvenika usmjerila se prema rješavanju pitanja sigurnosti u prometnoj, posebno cestovnoj mreži Europe, te je među najbitnijim konačno u EU direktivi [75] konstatirano da:

- Sustav prometa, naročito transeuropska cestovna mreža[44], ima vrlo veliki značaj za podršku europskoj integraciji i pružanje visoke razine dobrobiti građanima Europe.
- Europska zajednica ima odgovornost da jamči visoku, jednoliku i konstantnu razinu sigurnosti, usluga i udobnosti u transeuropskoj cestovnoj mreži.
- Dugi tuneli, duljine veće od 500 m, predstavljaju važne objekte koji omogućavaju komunikaciju između velikih područja Europe i igraju odlučujuću ulogu u funkcioniranju i razvoju regionalnih ekonomija.
- Nacionalne legislative treba međusobno uskladiti prema najnovijim harmoniziranim zahtjevima za poboljšanje sigurnosti u dugačkim tunelima.
- Nedavne nesreće u tunelima naglašavaju njihovo značenje za ljude, ekonomiju i kulturu, pa je potrebno hitno poduzimanje mjera za povećanje sigurnosti tunela.
- Neki stariji tuneli, projektirani i izvedeni u drugim uvjetima, imaju nedovoljnu razinu sigurnosti, što treba ispraviti.
- Sigurnost u tunelima traži mnogobrojne mjere vezane s geometrijom i projektom tunela, sigurnosnom opremom, upravljanjem prometom i akcidentima, obukom intervencijskih službi, pružanjem informacija o najboljem načinu ponašanja u tunelima, bolju komunikaciju između organa vlasti i intervencijskih službi (policije, vatrogasnih postrojbi i spasilačkih službi).
- Sigurnosne mjere trebaju omogućiti sudionicima akcidenta da djeluju trenutno, da se spase i da spriječe ozbiljnije posljedice, a intervencijskim službama da djeluju efikasno, da zaštite okoliš i ograniče materijalne štete.
- Zbog visoke cijene ovih mjera, potrebno je definirati minimalnu sigurnosnu opremu, uzevši u obzir vrstu i očekivani volumen prometa u svakom tunelu zasebno.
- Održavanje visoke razine sigurnosti zahtijeva dobro održavanje sigurnosne opreme u tunelima i sustavnu razmjenu informacija o modernim tehnikama sigurnosti i akcidentima između zemalja članica, daljnji tehnički napredak za poboljšanje sigurnosti tunela, te harmonizirane procedure za analizu rizika.
- Zemlje članice treba potaknuti da usporedivu razinu sigurnosti uvedu i u tunele koji ne pripadaju transeuropskoj cestovnoj mreži.

[40] U Mt Blanc tunelu i u St Gotthard tunelu dogodilo se još nekoliko manjih požara bez tragičnih posljedica [8], pa su ostali uglavnom nepoznati javnosti.
[41] U Tauern tunelu se dogodilo još nekoliko manjih požara bez većih posljedica (2002., 2001., 2000.) [8], pa su ostali uglavnom nepoznati javnosti.
[42] U Eurotunelu su se naknadno dogodila još 2 požara, 2006. i 2008. godine.
[43] U tunelu Kitzsteinhorn je poginulo 155 ljudi [8].
[44] Trans-European Road Network, često skraćeno u TERN.

Ovakvom stavu EU značajno su pridonijeli rezultati opsežnih istraživačkih projekata izvedenih u okviru EU, prikazanih u tablici 3.1.

Tablica 3.1. Europski istraživački projekti o sigurnosti tunela [76, 77, 24]

Projekt	Trajanje	Partneri	Opis i ciljevi	Trošak (Eura)
FIT (Fire in Tunnels)	2001, 4 godine	33 iz 12 europskih zemalja	Sakupiti informacije iz čitave Europe i svijeta o postignutim rezultatima istraživanja i općenito iskustvima u požarnoj sigurnosti u transportnim tunelima. Dati preporuke.	9,7 miliona
DARTS (Durable and Reliable Tunnel Structures)	2001, 3 godine	8 iz europskih zemalja	Razviti operativne metode i potporne praktične alate za najbolji proaktivni proces odlučivanja pri izboru, u svakom pojedinom slučaju, troškovno optimalnog tipa tunela i postupke gradnje u vezi s okolišnim uvjetima, tehničkom kvalitetom, sigurnosnim mjerama i dugim životnim vijekom.	
UPTUN (Upgrading Methods for Fire Safety in Existing Tunnels)	2002, 4 godine	41 iz 16 europskih zemalja	Razviti inovativne tehnologije, procijeniti postojeće tehnologije te razviti procedure za unaprjeđenje postojećih tunela.	
Safe T (Safety in Tunnels)	2003, 3 godine	22	Harmonizirati europske zahtjeve glede sigurnosti tunela, uključujući procjenu rizika. Sakupiti nacionalna iskustva zbog kompilacije i procjene.	1 milion
SAFE TUNNEL (Innovative Systems and Frameworks for Enhancing of Traffic Safety in Road Tunnels)	2001, 3 godine	9	Pridonijeti smanjivanju opsega i broja akcidenata u cestovnim tunelima uz pomoć preventivnih sigurnosnih mjera, uključujući komunikaciju vozilo-infrastruktura.	5,2 miliona
SIRTAKI (Safety Improvement in Road & Rail Tunnels using Advanced Information Technologies and Knowledge Intensive Decision Support Models)	2001, 3 godine	12 iz europskih zemalja	Reformirati operativne koncepte o upravljanju sigurnošću i akcidentima.	
Virtual Fires (Virtual Real Time Emergency Simulator)	2001, 3 godine	8 iz 15 europskih zemalja	Razviti pogodan i praktičan simulator namijenjen vježbanju vatrogasaca za ograničavanje i gašenje požara u tunelima.	
L-surF (Large-Scale Underground Research Facility)	2005, 3 godine	6 iz 6 europskih zemalja	L-surF fundacija čini virtualnu istraživačko-znanstvenu infrastrukturu u području sigurnosti podzemnih građevina sa svrhom da pruži usluge pri testiranju, razvoju inženjerstva i istraživanju, te usluge treninga i edukacije.	3,3 miliona

Osim navedenih projekata koji su provedeni na europskoj razini, izveden je i niz drugih nacionalnih i privatnih istraživačkih projekata. U aneksu reference [78] navedeni su osnovni podaci za 105 takvih projekata.

3.2 Osnovni faktori sigurnosti i organizacije sigurnosti prema EU Direktivi

Razina sigurnosti u tunelima ovisi u različitoj mjeru o nizu faktora koji se mogu svrstati u 4 glavne grupe kao što je to prikazano na slici 3.1 [15]:

Ti faktori na sigurnost utječu svaki zasebno, ali i u međudjelovanju svakog od njih sa svakim. Stoga je pitanje ukupne sigurnosti vrlo složeno. Zbog posebnog interesa Hrvatske kao buduće punopravne članice EU, u nastavku je ukratko opisan sustav sigurnosti uveden temeljem EU Direktive [75], koji se odnosi na sve postojeće (oko 400) i na sve buduće tunele u TERN dulje od 500 m.

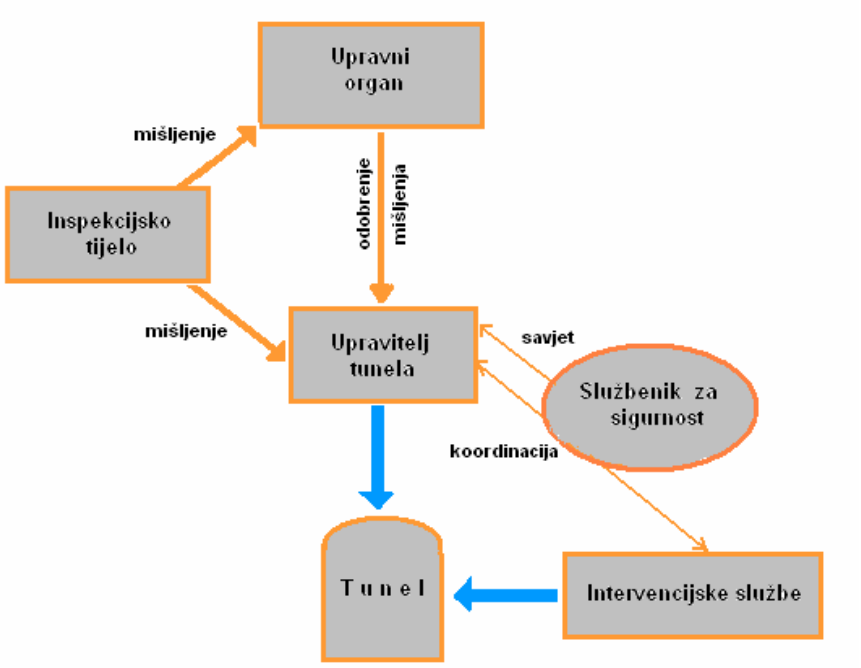
Zahtjevi EU Direktive postaju obvezni tek nakon transponiranja u nacionalne propise, a osim zemalja članica EU, prihvatile su ih Norveška, Švicarska i Hrvatska. Većina zemalja učinila je zahtjeve obveznim i za tunele koji ne pripadaju TERN mreži, a neke su ih primijenile i na kraće tunele.

Slika 3.1. Faktori sigurnosti u tunelu [15]

EU Direktiva [75] uvodi sljedeće funkcije/institucije:

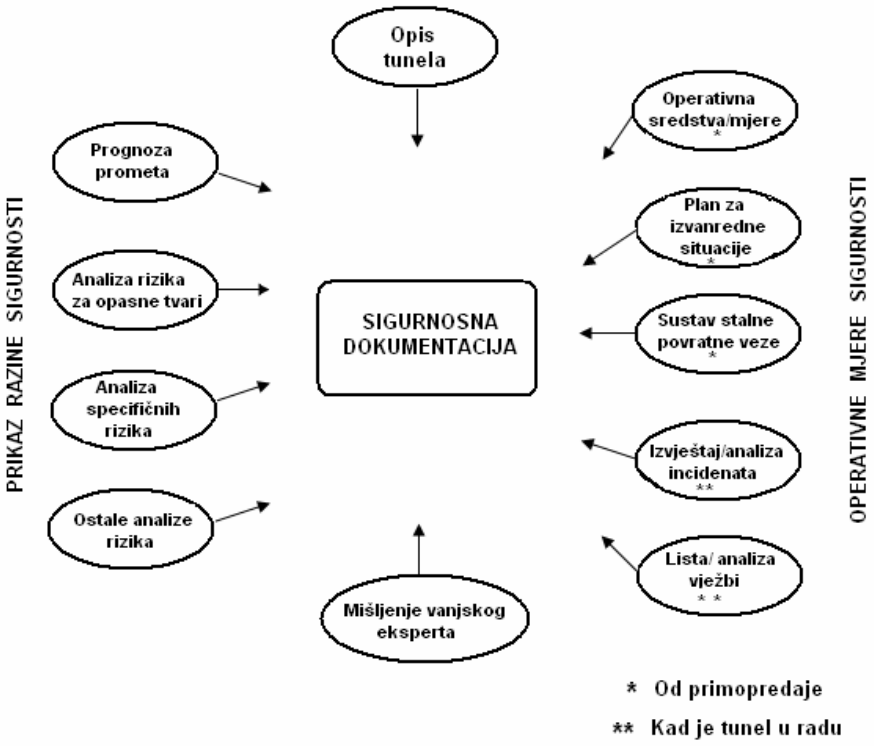
- *Upravni organ (Administrative Authority)* odgovoran je za osiguranje svih aspekata sigurnosti tunela i poduzima korake za provođenja svih zadataka sukladnosti s Direktivom (pregledi, sheme, planovi, mjere za smanjenje rizika itd.). Upravni organ može biti uspostavljen na nacionalnoj, regionalnoj ili lokalnoj razini. Može zaustaviti ili ograničiti rad tunela.
- *Upravitelj tunela (Tunnel Manager)* je javno ili privatno tijelo koje postavlja Upravni organ za svaki tunel i u svakoj fazi (projektiranje, izgradnja, rad), koje je odgovorno za normalan rad i sigurnost. Upravni organ može sam obavljati ovu funkciju. O svakom značajnijem incidentu ili akcidentu Upravitelj tunela sastavlja izvještaj koji predaje Službeniku za sigurnost, Upravnom organu i Intervencijskim službama.
- *Službenika za sigurnost (Safety Officer)* postavlja Upravitelj tunela uz suglasnost Upravnog organa. Njegova je zadaća da koordinira sve preventivne i sigurnosne mjere, provjerava elemente sigurnosti, sudjeluje u vježbama, analizi akcidenata itd. Može biti član osoblja tunela ili intervencijskih službi, ali mora biti neovisan u svim pitanjima sigurnosti tunela i ne smije primati upute poslodavca glede tih pitanja.
- *Inspekcijsko tijelo (Inspection entity)* ima zadatak da izvodi preglede, vrednovanje i testiranje, pa mora imati visoku razinu sposobnosti i visokokvalitetne procedure. Funkcionalno mora biti neovisno o Upravitelju tunela, jer daje mišljenje o sigurnosti.
- *Intervencijske službe (Emergency Services)* imaju vrlo važnu zadaću, u EU Direktivi se spominju 29 puta, ali ima malo jasno određenih zahtjeva na njih.

Međusobni odnosi spomenutih funkcija/institucija prikazani su na slici 3.2.



Slika 3.2. Sustav sigurnosti prema EU Direktivi [75]

Vrlo važan alat za pitanja sigurnosti je sigurnosna dokumentacija koju sastavlja Upravitelj tunela. U sigurnosnoj dokumentaciji trebaju biti opisane sve preventivne i sigurnosne mjere i sve informacije od značaja za sigurnost. Ona je ujedno i komunikacijski alat između svih bitnih dionika, kao i osnova za sve sigurnosne postupke.

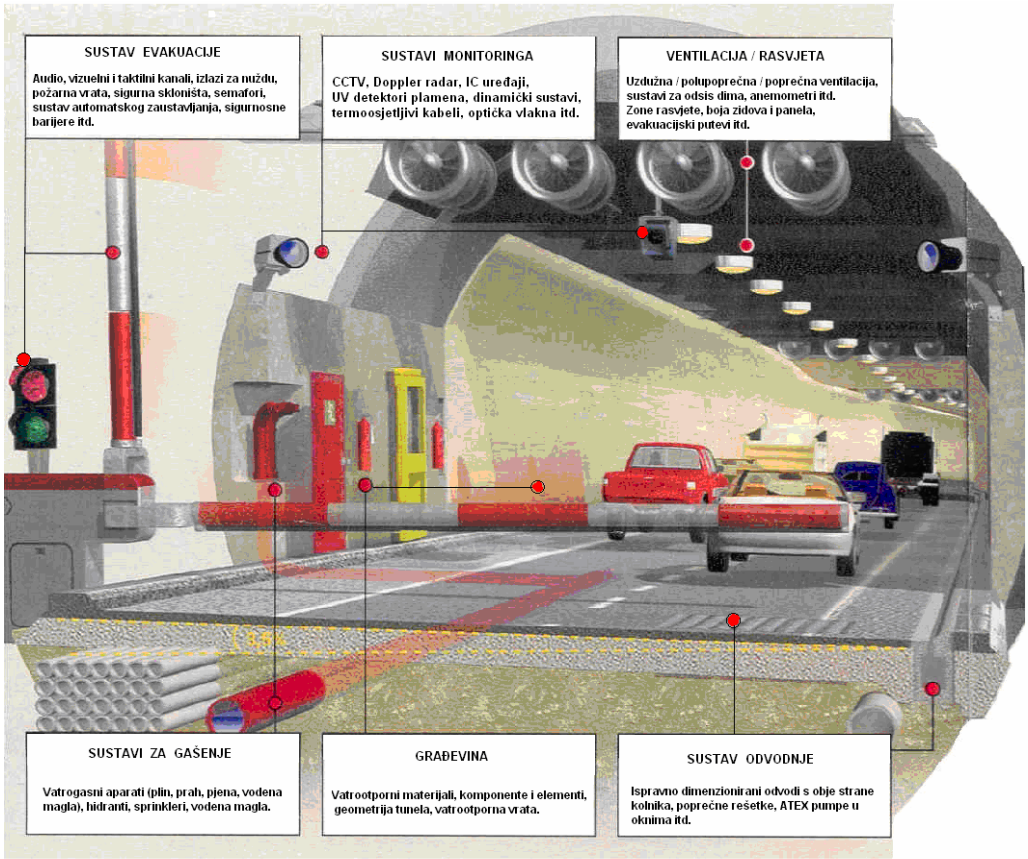


Slika 3.3. Sigurnosna dokumentacija prema EU Direktivi [75]

Od ostalih bitnih detalja treba spomenuti rokove provođenja, tj.:

- Svi tuneli čiji projekt nije bio odobren do 30.4.2006. podvrgavaju se zahtjevima Direktive.
- Za tunele s odobrenim projektom koji nisu otvoreni za javni promet do 30.4.2006. Upravni organ procjenjuje usklađenost sa zahtjevima Direktive i, ako ustanovi neusklađenost, obavještava Upravitelje tunela i Službenika za sigurnost, te poduzima daljnje mjere za usklađivanje.
- Za tunele koji su u javni promet ušli do 30.4.2006., Upravni organ će procijeniti usklađenost sa zahtjevima Direktive. Upravitelj tunela će po potrebi i po odobrenju Upravnog organa poduzeti mjere za popravak stanja. Obnova postojećih tunela treba biti u pravilu dovršena do 30.4.2014. Zemljama u kojima je kvocijent duljine postojećih tunelskih cijevi i ukupne duljine njihovog dijela TERN cesta veći od prosjeka EU, rok obnove se može produljiti za 5 godina.
- Inspekcijska tijela će svaki tunel pregledati tako da razmak uzastopnih pregleda ne bude dulji od 6 godina. Prvi „krug“ tehničkih pregleda trebao se dovršiti do 30.4.2010.

Troškovi provedbe Direktive [75] u stvarnost Khoury i sur. [79] procijenili su na 2,6-6,3 milijarde Eura[45].



Slika 3.4. Sastavni dijelovi sustava sigurnosti tunela [80]

[45] IRU, International Road Transport Union, u dokumentu *IRU Standpoint on the proposal from an EN Directive on minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network*, koji je IRU General Assembly jednoglasno prihvatila u Ženevi 24.4.2003., troškove vezane s unaprjeđenjem infrastrukture tunela i upravljanjem procijenjuje na 4,8 milijarde Eura ako se svi postojeći tuneli usklade s njenim zahtjevima, odnosno na 2 milijarde Eura ako se u potpunosti iskoriste sve mogućnosti derogacije zahtjeva predviđene i dozvoljene Direktivom.

3.3 Usporedba zahtjeva EU Direktive [75], Pravilnika RH [18], NFPA 502 [81] i preporuka PIARC[46] [9]

Prilikom projektiranja, gradnje i eksploatacije tunela uvijek se koriste tehnički propisi, norme, standardi i/ili preporuke (upute). Mnoge razvijene zemlje u kojima se nalaze dugi cestovni tuneli imaju vlastite takve dokumente. Ostale zemlje koriste neki od „međunarodno priznatih" dokumenata ili neku njihovu kombinaciju. Ovisno o tome da li imaju status obveznih (propis[47]) ili dobrovoljnih za primjenu (standardi[48], preporuke), oni na različiti način utječu na konačno rješenje. U tablici 3.2 međusobno su uspoređeni neki najvažniji od takvih „međunarodno priznatih" dokumenata koji se koriste na svjetskoj i/ili kontinentalnoj razini, a dana je i njihova usporedba s hrvatskim *Pravilnikom o minimalnim sigurnosnim zahtjevima za tunele* [18]. Za usporedbu su odabrani:

- PIARC (1999): *Fire and smoke control in road tunnels* [9], uputstvo za upravljanje požarom i dimom, koje je izdala World Road Association, osnovana 1909. kao Permanent International Association of Road Congresses (PIARC). Ova neprofitna i nepolitička organizacija, u koju je učlanjeno 118 zemalja svijeta (stanje 2009.), svake 4 godine održava svjetske kongrese o cestama, pa će se tako ove godine održati 24-ti kongres[49]. Uz to, održavaju se i tzv. tematski kongresi, seminari, objavljuju tehnički izvještaji, newsletter itd., sve vezano s različitim aspektima cestovne infrastrukture. PIARC danas ima možda najveći tehnički utjecaj na projektiranje, izgradnju i održavanja tunela u svijetu, budući da je PIARC Technical Committee on Road Tunnel Operation osnovan još 1957. godine, a danas u njemu sudjeluje 30 zemalja sa 130 eksperata u 5 radnih grupa.

- NFPA 502 (2008): *Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways* [81], norma koju je izdala National Fire Protection Association. NFPA je osnovana u SAD godine 1896. sa sjedištem u Quincy, MA, i danas je sigurno najveća i najutjecajnija nacionalna organizacija za zaštitu od požara u svijetu. Udruženje je dobrovoljno i neprofitno, ima oko 70 000 članova iz čitavog svijeta (većinom iz SAD), a standarde i kodekse vezane sa svim aspektima zaštite od požara izdaje od svojeg osnutka[50]. Trenutačno postoji oko 300 važećih standarda/kodeksa NFPA, koji se koriste u čitavom svijetu, bilo kao baza za izradu sličnih nacionalnih i međunarodnih dokumenata, bilo direktnim prihvaćanjem. Prvi NFPA 502 standard izdan je 1972. pod nazivom gotovo identičnim današnjem i u međuvremenu je doživio niz revizija i obnovljenih izdanja. NFPA 502 je prihvaćen i kao američki nacionalni standard (ANSI).

- EU Direktiva (2004): *Directive 2004/54/EC of the European parliament and of the Council of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network* [75], izdana je na razini EU, sa svrhom međusobnog usklađivanja barem minimalnih zahtjeva pojedinih nacionalnih propisa i normi zemalja članica EU, a s osnovnim ciljem podizanja i ujednačavanja razine požarne sigurnosti u europskim cestovnim tunelima. Kao što je to slučaj i s drugim europskim

[46] PIARC - Permanent International Association of Road Congresses.
[47] Propis je dokument koji donosi zakonsko tijelo vlasti, a sadrži neke specifične obvezne zahtjeve. Primjeri propisa su zakoni, uredbe i pravilnici.
[48] Standardi (norme) i preporuke formalno-pravno najčešće nisu obvezni za primjenu.
[49] http://www.piarc.org/en
[50] http://www.nfpa.org

direktivama, obveza svih zemalja-članica bila je da ovu direktivu transponiraju u vlastito nacionalno zakonodavstvo. Iako se njene odredbe formalno odnose samo na tunele transeuropske mreže autocesta duljine veće od 500 m, one se često primjenjuju i na tunele izvan ove mreže kao minimalni sigurnosni kriterij. Uz to, odredbe Direktive prihvaćaju i zemlje kandidatkinje za EU, npr. Hrvatska, ali i ostale zemlje koje ocijene da su za njih prikladne[51].

- Pravilnik (2009): *Pravilnik o minimalnim sigurnosnim zahtjevima za tunele* [18] donesen je kao hrvatski nacionalni propis u sklopu približavanja Hrvatske EU, te u biti predstavlja transpoziciju EU Direktive u hrvatski pravni sustav. Odnosi se na cestovne tunele na autocestama i državnim cestama čija duljina prelazi 500 m, koji su u fazi projektiranja, građenja ili korištenja. Ne ulazeći u razloge za to, treba ipak navesti da Pravilnik ne sadrži sve odredbe EU Direktive. Uz to, neki od zahtjeva Direktive su „postroženi", a obveza je proširena i na tunele na državnim cestama. Na snagu stupa danom pristupanja Republike Hrvatske u EU. Isto kao i Direktiva, Pravilnik [17] tunele inicijalno dijeli prema prometnom opterećenju[52], a zatim još dodatno prema duljini kako slijedi:

  Promet ≤ 2000 vozila/trak:
  - duljina 500 – 1000 m
  - duljina > 1000 m

  Promet > 2000 vozila/trak:
  - duljina 500 – 1000 m
  - duljina 1000 – 3000 m
  - duljina > 3000 m

  Za prometno visoko opterećene tunele, kod kojih će očekivano prometno opterećenje biti veće od 10.000 vozila po prometnoj traci na dan u prognostičkom razdoblju od 15 godina, mora se planirati izgradnja dviju tunelske cijevi s jednosmjernim prometom.

Budući da pojedini uspoređeni dokumenti tunele dijele na grupe u ovisnosti o različitim duljinama, prometnom opterećenju itd., u tablici 3.2 dat je samo pregled bitnih zahtjeva bez ulaženja u detalje, jer u protivnom ne bi bilo uopće moguće sastaviti tablicu.

Jasno je da svaki od ovih dokumenata daje različite, mada ponekad ne previše različite zahtjeve i kriterije za projektiranje i izvođenje sigurnosnih sustava u tunelima. To ne znači da je bilo koji od njih pogrešan, jer je svaki pojedini razvijen s različite točke gledanja. Standardi i propisi razvijaju se sa svrhom da daju samo minimalnu razinu požarne sigurnosti, ostavljajući vlasniku ili operatoru tunela brigu o tome da ostvari odgovarajuću, po potrebi višu sigurnost. Upute i preporuke su, s druge strane, samo vodič prema dobrom i sigurnom projektu i isto takvoj izvedbi.

[51] Švicarska, iako nije članica EU, sudjelovala je u pripremi EU Direktive [75].

[52] Prometno opterećenje je prosječni godišnji dnevni promet (PGDP) kroz tunel po prometnoj traci na dan, računajući svako motorno vozilo kao jednu jedinicu, tj. ukupni promet podijeljen s brojem traka i brojem dana u godini. Prometno opterećenje normalno se računa za prognostičko razdoblje od 15 godina.

Tablica 3.2. Usporedba zahtjeva EU Direktive [75], hrvatskog Pravilnika [18], NFPA standarda [81], uputa PIARC [9], na temelju Cornell [82] s dopunama

Sustav	**Element**	**Stavka**	**EU Direktiva 2004/54/EC** [75] **Propis**	**Pravilnik RH** [18] **Propis**	**NFPA 502** [81] **Standard**[53]	**PIARC 1999** [9] **Uputa**[54]
		Minimalna duljina	**> 500 m**	**> 500 m**	**≥ 90**[55] **m**	**Nema**
Detekcija požara	Detektori požara		Zahtjev	Zahtjev	Zahtjev[56]*	Preporuka
	Ručni alarm		Ne obuhvaća	Ne obuhvaća	Zahtjev*	Opcija
	Automatski detektori požara		Zahtjev (bez centra za upravljanje prometom)	Zahtjev (bez centra za upravljanje prometom)	Zahtjev*	Preporuka
	CCTV		Zahtjev (sa centrom za upravljanje prometom)	Zahtjev (sa centrom za upravljanje prometom)	Zahtjev*	Preporuka
Sustav za zaštitu od požara	Vatrogasna vozila		Ne obuhvaća	Ne obuhvaća	Da su u blizini	Ne obuhvaća
	Vodoopskrba		Zahtjev	Zahtjev	Zahtjev	Preporuka
		Kapacitet	Ne obuhvaća	1200 L/min @ 6-12 bar, 1 h	1920 L/min @ 6,9 bar, 1 h	1000 L/min @ 5 bar
	Hidrantski ormarić		Podrazumijeva se	Zahtjev	Zahtjev	Preporuka
	Priključak za vatrogasce		Ne obuhvaća	Ne obuhvaća	Zahtjev	Ne obuhvaća
	Hidranti (cijevni priključak)		Zahtjev	Zahtjev	Zahtjev	Preporuka
		Razmak	≤ 250 m	Novi ≤ 150 m, postojeći ≤ 250 m	≤ 85 m	100-200 m
	Vatrogasne pumpe		Ne obuhvaća	Ne obuhvaća	Po potrebi	Ne obuhvaća
	Stacionarni sustav za gašenje požara (sprinkleri)[57]		Ne obuhvaća	Ne obuhvaća	Opcija	Opcija
	Prijenosni vatrogasni aparati		Zahtjev	Zahtjev	Zahtjev	Preporuka
		Razmak	Novi ≤ 150 m, postojeći ≤ 250 m	Novi ≤ 150 m, postojeći ≤ 250 m	≤ 90 m*	Ne obuhvaća
	Sustav odvodnje		Zahtjev	Zahtjev, ≥ 200 L/s	Zahtjev*	Ne obuhvaća
	Pohrana odvodnje		Ne obuhvaća	Zahtjev, ≥ 15 m^3	Zahtjev*	Ne obuhvaća
	Pumpe za odvodnju		Ne obuhvaća	Ne obuhvaća	Po potrebi	Ne obuhvaća
	Detektori ugljikovodika		Ne obuhvaća	Ne obuhvaća	Zahtjev*	Preporuka
	Ventilacija za nuždu/akcident		Zahtjev	Zahtjev	Zahtjev*	Preporuka
		Kriterij	> 1000 m & > 2000 PGDP	> 1000 m & > 2000 PGDP	≥ 240[58] m	Ne obuhvaća

[53] Standard ili norma je tehnički dokument koji sadrži jasne i precizne obvezne zahtjeve, ali se u pravilu primjenjuje dobrovoljno. Obveznu primjenu ima jedino ako ga je u tu svrhu prihvatilo zakonsko tijelo vlasti. Obično ga donosi normizacijsko tijelo ili udruženje.

[54] Upute su dokumenti koji čitatelju daju preporuke za projektiranje, izvedbu, instalaciju i/ili rad, u ovom slučaju u vezi sa sigurnošću ljudskih života i zaštitom od požara u tunelima. Donose ih tehnička udruženja, a ponekad i vladine agencije.

[55] Zahtjevi se povećavaju prema kategorijama duljine: ≥ 90 m; ≥ 240 m; ≥ 300 m; ≥ 1000 m (za koju važe svi zahtjevi).

[56]* Zahtjev za ≥ 240 m.

[57] Pod stacionarnim sustavom za gašenje požara (FFFS – Fixed Fire Fighting System) normalno se podrazumijevaju WBFFS (Water Based FireFighting System), koji obuhvaćaju sustave klasičnih (automatskih) sprinklera, deluge, vodene magle i pjene [81]. U prošlosti se obično koristio samo naziv sprinkler sustav, vjerojatno zato što su se klasični sprinkleri najčešće koristili u praksi, ali i zbog manjkavog znanja pisaca standarda o stacionarnim sustavima za zaštitu od požara. Pogrešna primjena ovog naziva uzrokovala je mnoge nesporazume i bespotrebne diskusije.

[58] Za ≥ 1000 m obvezno, za < 1000 m po potrebi.

Sustav	**Element**	**Stavka**	**EU Direktiva 2004/54/EC** [75] **Propis**	**Pravilnik RH** [18] **Propis**	**NFPA 502** [81] **Standard**	**PIARC 1999** [9] **Uputa**
		Minimalna duljina	**> 500 m**	**> 500 m**	**≥ 90 m**	**Nema**
Komunikacije	Komunikacijski sustav		Zahtjev	Zahtjev	Zahtjev*	Preporuka
	2-smjerni radio		Ne obuhvaća	Ne obuhvaća	Zahtjev*	Preporuka
	Radio prijenos (re-emitiranje)		Zahtjev	Zahtjev	Zahtjev	Preporuka
		Kriterij	> 1000 m & > 2000 PGDP	> 1000 m & > 2000 PGDP	Ne obuhvaća	Ne obuhvaća
	Telefon za nuždu		Zahtjev	Zahtjev	Zahtjev*	Preporuka
		Razmak	Novi ≤ 150 m, postojeći ≤ 250 m	Novi ≤ 150 m, postojeći ≤ 250 m	Ne obuhvaća	Ne obuhvaća
	Razglas (zvučnici)		Ne obuhvaća	Ne obuhvaća	Ne obuhvaća	Ne preporučuje
Izlazi	Izlaz za nuždu		Zahtjev	Zahtjev	Zahtjev	Preporuka
		Kriterij	Novi > 2000 PGDP	Novi > 2000 PGDP	Ne obuhvaća	Ne obuhvaća
		Razmak	≤ 500 m	≤ 500 m	≤ 300 m	Ne obuhvaća
	Identifikacija izlaza		Zahtjev	Zahtjev	Zahtjev	Preporuka
	Okoliš s izdržljivim uvjetima[59]		Ne obuhvaća	Ne obuhvaća	Zahtjev	Ne obuhvaća
	Poprečni prijelazi		Zahtjev	Zahtjev	Zahtjev	Preporuka
		Razmak	Ne obuhvaća	Ne obuhvaća	≤ 200 m	Ne obuhvaća
	Nogostupi za nuždu		Obuhvaća	Obuhvaća	Ne obuhvaća	Ne obuhvaća
	Izlazni koridor		Obuhvaća	Obuhvaća	Ne obuhvaća	Preporuka
	Pristup za hitne službe (2 cijevi)		Zahtjev	Zahtjev	Ne obuhvaća	Ne obuhvaća
		Razmak	≤ 1500 m	≤ 1000 m		
	Skloništa		Samo s izlazom	Samo s izlazom	Ne obuhvaća	Preporuka
	Hodna površina		Ne obuhvaća	Ne obuhvaća	Zahtjev	Ne obuhvaća
Operacije	Kontrolni centar		Zahtjev	Zahtjev	Po potrebi	Ne obuhvaća
		Kriterij	> 3000 m & > 2000 PGDP	> 3000 m & > 2000 PGDP		
	Plan za slučaj nužde/akcidenta		Zahtjev	Zahtjev	Zahtjev	Zahtjev
	Upravljanje akcidentom		Zahtjev	Zahtjev	Zahtjev	Zahtjev
	Puštanje u rad		Zahtjev	Ne obuhvaća	Ne obuhvaća	Ne obuhvaća
	Periodičke vježbe		Zahtjev	Ne obuhvaća	Zahtjev	Preporuka
	Požarni testovi		Ne obuhvaća	Ne obuhvaća	Ne obuhvaća	Preporuka
	Uvježbavanje		Zahtjev	Ne obuhvaća	Zahtjev	Preporuka
Promet	Prometni znakovi		Zahtjev	Zahtjev	Zahtjev	Preporuka
	Upravljanje prometom		Zahtjev	Zahtjev	Zahtjev	Preporuka
	Zaustavne površine (ugibališta)		Zahtjev	Zahtjev	Ne obuhvaća	Ne obuhvaća
		Kriterij	> 1500 m & > 2000 PGDP	> 1000 m & > 2000 PGDP	Ne obuhvaća	Ne obuhvaća
		Razmak	≤ 1000 m	≤ 1000 m		

[59] Tenable environment, tj. okoliš s uvjetima koji omogućavaju preživljavanje čovjeka.

3.4 Neki nacionalni zahtjevi za sustave gašenja požara i otpornost opreme na toplinu

Zbog posebnog interesa za sustave namijenjene automatskom gašenju požara u ovoj disertaciji, detaljnije su prikazani nacionalni zahtjevi za vodoopskrbu (hidrantsku mrežu) i stacionarne sustave za gašenje požara (FFFS) u nekim europskim i izvaneuropskim zemljama.

Vatrogasni hidranti u biti su priključci za oduzimanje vode pod tlakom iz stacionarne (hidrantske) mreže, koja autori dokumenata uspoređenih u tablicama 3.2 i 3.3, ali i ostalih sličnih dokumenata, najčešće deklariraju kao sredstvo za gašenje požara namijenjeno za uporabu korisnicima tunela i vatrogasnim postrojbama. Uz pravilnu uporabu, njihova je moć gašenja neusporedivo veća nego moć gašenja prijenosnih vatrogasnih aparata, koji predstavljaju spravu namijenjenu gašenju samo malih početnih požara. Sagledavajući realistički mogućnosti osoba koje se u trenutku izbijanja požara nalaze u tunelu, lako se dolazi do zaključka da će ovaj snažan „alat“ u pravilu ostati neupotrijebljen sve dok se požar potpuno ne razvije. Jasno je naime da će vatrogasni hidrant znati i moći koristiti vatrogasac. No vjerojatnost da je korisnik tunela koji se u inicijalnoj fazi požara, tj. u nekoliko prvih minuta po njegovom izbijanju, zatekao u blizini hidranta, sposoban koristiti hidrant i vatrogasnu cijev s mlaznicom, je minimalna. Za korištenje hidranta uobičajene veličine i karakteristika[60], s uobičajenim plosnatim vatrogasnim cijevima C (Ø 52 mm) duljine 15 m, s mlaznicom nazivnog protoka najmanje 200 L/min, potrebno je znanje i vještina koju je vrlo teško očekivati od prosječnog korisnika tunela, posebno u stvarnoj požarnoj situaciji, u uvjetima zbunjenosti, straha, neizvjesnosti itd.[61]. Neosposobljena i neuvježbana osoba mogla bi čak oštetiti vatrogasnu opremu ili njenom nepravilnom uporabom ozlijediti ljude u neposrednoj blizini. Jedini autoru poznati dokument koji nalaže da se izlaz iz hidrantske mreže u tunelu spoji ne samo na hidrante s velikim protokom za vatrogasce, nego i na „cijevna vitla“, koja sadrže polukrute cijevi unutarnjeg promjera Ø 19 mm, duljine 30 m, koja bi prosječan čovjek realno mogao koristiti za gašenje požara, je britanski BD 78/99 [83]. Cijevna vitla se postavljaju na međurazmaku od 50 m, pa je svaki požar moguće napasti sa 2 strane[62]. Također treba navesti da dokumenti koji u nekim zemljama obrađuju problematiku zaštite od požara tunela, uz hidrante istodobno predviđaju i postavljanje tzv. priključaka za vatrogasce velikog kapaciteta[63].

U tablici 3.3 uspoređeni su nacionalni zahtjevi za vodoopskrbom i hidrantima u nekim relevantnim zemljama svijeta. Dokumenti iz kojih su zahtjevi ekstrahirani nisu detaljno prezentirani, jer to nije bilo potrebno za daljnje razmatranje. Analizom prikupljenih podataka (tablice 3.2 i 3.3) može se zaključiti da je u većini europskih zemalja ugradnja hidrantskog

[60] *Pravilnik o hidrantskoj mreži za gašenje požara* [84] hidrantsku mrežu za gašenje požara definira kao skup cjevovoda, uređaja i opreme kojima se voda od sigurnog izvora dovodi do štićenih prostora i građevina. To je cijevna (vodovodna) mreža tlaka 2,5 – 7 bara s priključcima najmanje veličine Ø 52 mm (unutarnja hidrantska mreža), odnosno tlaka 2,5 – 12 bara s hidrantima NO 80 mm ili NO 100 mm (vanjska hidrantska mreža). Slične karakteristike i dimenzije imaju i hidranti u Hrvatskoj susjednim zemljama, ali i u većini zemalja kontinentalne Europe. Ipak, pod nazivom „hidrant“ susrećemo se u literaturi i u praksi priključci nazivnih dimenzija od 19 mm pa do preko 100 mm.

[61] Autoru disertacije ova je činjenica poznata ne samo iz vlastitog iskustva, nego iz razgovora s mnogobrojnim vatrogascima u Hrvatskoj i u inozemstvu.

[62] Ako je moguće, cijevna vitla trebaju biti okretna, što olakšava njihovu uporabu, a povlačenje cijevi treba rezultirati istjecanjem vode [83]. U normi EN 671-1 [85] naglašava se da je sustav cijevnih vitala vrlo efikasno vatrogasno sredstvo, raspoloživo odmah i namijenjeno za učinkovitu uporabu jedne prosječne osobe. U skladu s ovom normom, protok na mlaznici promjera npr. 7 mm pri tlaku od 4 bara iznosi 44 L/min, što je neusporedivo prihvatljivije nego 200 L/min. [u ovom slučaju protok (L/min) = 22 $p^{1/2}$, ako je p tlak u bar].

[63] NFPA 502 [81] uz hidrante predviđa i postavljanje priključaka za vatrogasce (Fire Department connections) minimalne nazivne veličine 100 mm.

sustava obvezna za tunele duljine > 300-500 m, pri čemu minimalni tlak vode iznosi 5-6 bara, a protok se kreće u granicama od 1000-1200 L/min. Kapacitet spremnika vode mora osigurati količinu potrebnu za vrijeme gašenja požara traženim protokom od najmanje 1 h.

Tablica 3.3. Usporedba nacionalnih zahtjeva za izvorima vode za gašenje požara i hidrantsku mrežu

Zemlja	Kriterij primjene	Kapacitet i razmak hidranata	Napomena	Izvor
Austrija	Klase III, IV[64]	1200 L/min, 6 bara, 250 m razmak	Preporučeno za sve klase tunela. Min. vrijeme dobave vode 60 minuta	[86]
Francuska	≥ 300 m (urbani) ≥ 500 m (ne-urbani)	1000 L/min, 6 bara, 200 m razmak	-	[31]
Njemačka	≥ 600 m ili ≥ 400 m ako ima > 4000 HGV·km/cijev·dan	1200 L/min, 6-10 bara, 150 m razmak	U tunelu < 400 m hidranti su uz portale	[87]
Vel. Britanija	Klase AA, A, B, C[65]	100 m: hidranti, 50 m: cijevna vitla	Cijevna vitla normalno u tunelu klase AA; za klase A, B i C razmotriti	[80]
SAD	≥ 90 m	≥ 1920 L/min, 6,9 bara, ≤ 85 m razmak	Odobreni izvor vode za ≥ 1 h	[65]
Australija	-	Razmak 60 m (hidranti i cijevna vitla)	Neopremljeni hidranti s fitinzima smješteni su u svakoj niši s opremom	[88]
Japan	Klase AA, A i klasa B (ali za > 1000 m)[66]	130 L/min, 1,7 bara, razmak 50 m[67]	-	[89]
Hrvatska	> 500 m	1200 L/min, 6-10 bara, 150 m razmak (novi), 250 m (stari tuneli)	Obvezno za sve tunele. Minimalna dobava vode 60 minuta ili rezervoar 80 m^3.	[17]

Tablica 3.4. Usporedba nacionalnih zahtjeva za FFFS

Zemlja	Kriterij primjene	Napomena
Australija	-	AFAC[68] snažno zagovara postavljanje prikladno projektiranog deluge/sprinkler sustava s ručnim aktiviranjem. Iako nema zakonske obveze, deluge/sprinkler sustavi ugrađuju se u veliku većinu novih tunela u Australiji, posebno onih urbanih.
Japan	- Klasa AA - Klasa A ako je L > 3000 m & > 4000 vozila/dan i tunel je dvosmjerni	Poznato je da su sprinkler sustavi do 1999. u Japanu instalirani u 82 tunela [9]. To su zapravo deluge sustavi sa sekcijama duljine 20-30 m, a aktiviraju se 2-3 susjedne sekcije istodobno [90][69]. Do aprila 2001., Japan je imao 8331 tunela ukupne duljine 2653 km [91].
Rep. Koreja	Preporučuje su ugradnja u ≥ 3000 m duge tunele s velikim prometom[70]	Veliki promet je ≥ 60000 vozila·km/cijev·dan za dvosmjerni tunel ili jednosmjerni urbani tunel. Za jednosmjerni tunel u ne-urbanoj zoni to je 90000 vozila·km/cijev·dan

[64] Tuneli su klasificirani u 4 klase opasnosti. Klasa IV je najviša.
[65] Tuneli su klasificirani u 5 klasa ovisno o kombinaciji AADT i duljine. Klasa AA je najviša.
[66] Tuneli su klasificirani u 5 klasa ovisno o kombinaciji AADT i duljine. Klasa AA je najviša.
[67] Hidranti za „stanovništvo“ su zapravo cijevna vitla malog kapaciteta postavljena na međurazmaku od 50 m, pa ih mogu koristiti ljudi bez vatrogasnog iskustva. Mogu biti za primjenu vode ili za primjenu pjene. Preporučuje se da se protok vode aktivira jednostavnim povlačenjem cijevi [90]. Hidranti za vatrogasce postavljeni su na međurazmaku od 150 m [92]. Na pitanje autora postavljeno e-mailom, g. Mashimo iz PWRI, Incorporated Administrative Agency, odgovorio je 28.1.2011. da su hidranti za vatrogasce dimenzionirani na protok od 400 L/min pri tlaku od 2,9 bara.
[68] AFAC, Australian Fire Authorities Council.
[69] Na pitanje postavljeno e-mailom, g. Mashimo iz PWRI, Incorporated Administrative Agency, odgovorio je 28.1.2011.: da se koriste otvoreni sprinkleri; da je gustoća pokrivanja 6 L/m^2min; da se aktiviraju 2 zone istodobno i da je duljina jedne zone 25 m (ukupno se pokriva 50 m duljine tunela). Koriste se detektori koji požar detektiraju na višestrukim frekvencijama plamena prema specijalnim karakteristikama razdiobe.
[70] Preporuka GIST (*Guideline for Installation of Safety facility in road tunnels*, Min. of Construction and Transport - 2004). Druga slična korejska organizacija, NFSC (National Fire Safety Codes, Korea National Emergency Management Agency - 2005), nema jasan stav.

Za razliku od situacije s hidrantskom mrežom, kojom je opremljen praktički svaki tunel duljine > 500 m u Europi i u drugim razvijenim zemljama svijeta, situacija sa stacionarnim sustavima za gašenje požara (FFFS) je bitno drugačija. U tablici 3.4 prikazani su zahtjevi onih malobrojnih zemalja u kojima se zahtijeva ugradnja FFFS u određenim slučajevima.

Otpor kojim dokumenti bazirani na tradicionalnom „ventilacijskom" pristupu sigurnosnom sustavu tunela odgovaraju na mogućnost korištenja FFFS u slučaju požara oslikava se i kroz činjenicu da se npr. u EU Direktivi [75] riječ *Fire* spominje 26 puta i to u kontekstu: vatrootpornosti tunelske građevine i opreme tunela, aparata za gašenje požara, požara kao događaja, sustava vatrodojave i vatrogasaca, ali niti jednom u kontekstu opreme ili sustava koji gasi/supresira/kontrolira požar.

3.5 Iskustva s FFFS u Japanu

Japan je trenutno jedina zemlja svijeta u kojoj je za najugroženije tunele obvezna ugradnja sprinkler sustava[71]. Sprinkler sustavi ugrađuju se u japanske cestovne tunele od druge polovine 1960-ih godina. Zahtjevi za sigurnosnim instalacijama određeni su u revidiranom *National Safety Standard of Emergency Facilities on Road Tunnels*, koji je nakon tragičnog požarnog akcidenta u tunelu Nihonzaka na Tomei Expressway, 11.7.1979., donijelo Ministarstvo za zemlju, infrastrukturu i transport godine 1981. [91]. Ti zahtjevi prikazani su u tablici 3.5 i definirani su klasom tunela. Klasifikacija se bazira prvenstveno na duljini tunela i na prometnom opterećenju (slika 3.5), no uzimaju se u obzir i posebne karakteristike tunela, da bi se razina zaštite što bolje uskladila s vjerojatnošću nastupa akcidenata i požara temeljenoj na iskustvima iz prošlosti[72]. S time u skladu, potrebno je duge tunele na autoputovima s velikom prometnom brzinom i tunele s posebnom sub-optimalnom geometrijom uvrstiti u višu zaštitnu klasu [91].

Tablica 3.5. Sigurnosne instalacije u cestovnim tunelima u Japanu [91]

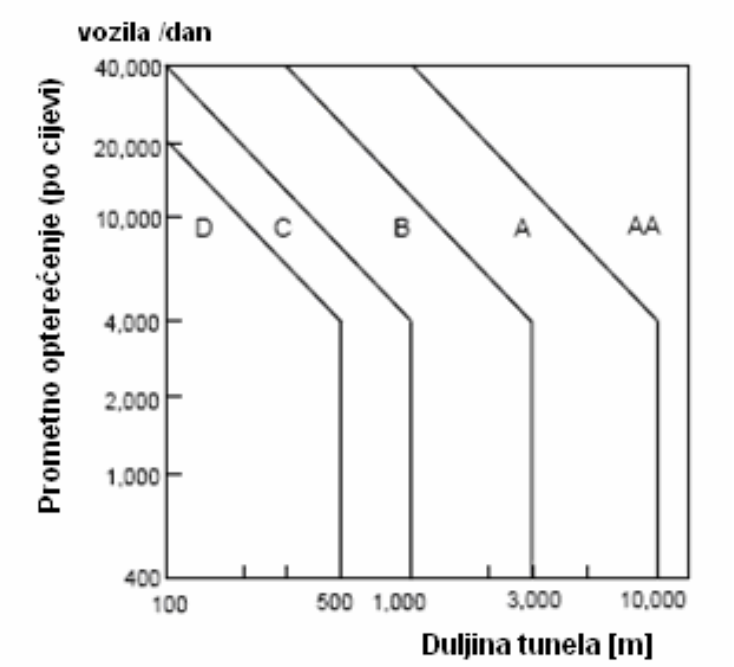
Sigurnosne instalacije		**Klasa tunela**				
		AA	A	B	C	D
Informacijska i alarmna oprema	Telefon za nuždu	O	O	O	O	
	Informacijski uređaj s pritisnim dugmetom	O	O	O	O	
	Detektori požara	O	PP			
	Alarmni uređaj za slučaj nužde	O	O	O	O	
Oprema za gašenje požara	Ručni vatrogasni aparat	O	O	O		
	Cijevno vitlo	O	O			
Oprema za bijeg i vođenje	Pokazne ploče	O	O	O		
	Oprema za odsis dima ili izlaz za bijeg	O	PP			
Ostala oprema	Hidrant	O	PP			
	Pomoćna radio-komunikacijska oprema	O	PP			
	Oprema za radio re-emitiranje ili razglas	O	PP			
	Sustav vodenih sprinklera	O	PP			
	Promatračka oprema (CCTV)	O	PP			

Legenda: O – Oprema koja se po pravilu mora postaviti; PP – Oprema koja postavlja po potrebi

[71] Iako se u literaturi redovito navodi da se u Japanu koriste sprinkler sustavi, zapravo su to deluge-sprinkler sustavi, tj. sustavi sprinklera koji imaju otvorene mlaznice, kao što je to prethodno objašnjeno.

[72] Npr. za prometnicu Tokyo-Wan Aqualine, koja se sastoji od 2 usporedne podmorske tunelske cijevi duljine 9,5 km i mosta duljine 4,4 km, kao stacionarni sustav za gašenje požara predviđen je sustav sprinklera s vodom, ali s mogućnošću doziranja pjenila [92].

Japanski propisi ne dozvoljavaju da se opasne tvari prevoze kroz podvodne tunele, niti kroz tunele dulje od 5000 m [92]. U prošlosti su se sprinkler sustavi aktivirali tek nakon što je bila završena evakuacija osoba iz tunela, kako se ne bi otežali uvjeti okoliša za ljude. Nakon jednog akcidenta godine 1998., poslije kojeg je zaključeno da je odgođeno aktiviranje sprinklera bilo uzrok (pre)dugotrajne vatrogasne akcije, operativne procedure su izmijenjene, tako da se sustav sprinklera može ručno aktivirati odmah po detekciji čak i malog požara. Naknadna iskustva dokazala su ispravnost ovakvih postavki [91].



Slika 3.5. Klasifikacija tunela u Japanu [90]

Slika 3.6. Primjer japanskog tunela klase AA opremljenog sigurnosnim uređajima i instalacijama [91]

Toplinska otpornost ventilatora

Vjerojatno najvažniji faktor sigurnosti za osobe koje se u tunelu zateknu u trenutku izbijanja požara nesporno je održavanje atmosferskih uvjeta unutar parametara koji im jamče respirabilnost zraka (prije svega koncentracije dima i toksičnih plinova, u manjoj mjeri i

temperature). Te uvjete pruža dobro projektirani i izvedeni sustav požarne ventilacije, koji bi trebao biti u stanju djelovati i nakon što su tunel napustile osobe iz vozila, a u njega ušle intervencijske ekipe, prvenstveno vatrogasci. Bitan element sustava ventilacije su ventilatori, pa se od njih traži sposobnost djelovanja na znatno povišenoj temperaturi. U tablici 3.6 uspoređeni su neki od zahtjeva u različitim zemljama.

Tablica 3.6. Usporedba nacionalnih zahtjeva i zahtjeva EU Direktive za toplinskom otpornošću ventilatora

Zemlja	Oprema	Minimalna temperatura i vrijeme rada	Izvor
Francuska	Odsisni ventilatori	200 ^{0}C, 120 minuta	[31]
Njemačka	Odsisni ventilatori i zaklopke za zrak	400 ^{0}C, 90 minuta	[87]
	Jet ventilatori	250 ^{0}C, 90 minuta; u nekim slučajevima do 400 ^{0}C, 90 minuta	
Vel. Britanija	Sve električne i strukturne komponente bitne za kontinuirani rad ventilatora	250 ^{0}C, 120 minuta	[80]
SAD	Tunelski ventilatori, motori, zaklopke i sve povezane komponente	250 ^{0}C, 60 minuta	[65]
EU	Vatrootpornost sve tunelske opreme mora održavati potrebnu sigurnosnu funkciju	-	[73]
Rep. Koreja	Dovod zraka i pomoćna oprema ventilacijskog sustava	250 ^{0}C, 60 minuta	NFSC
	Sve električne i strukturne komponente bitne za kontinuirani rad ventilatora		GIST

Vidljivo je da se uglavnom traži relativno visoka toplinska otpornost ventilatora i ostalih povezanih komponenti u rasponu od 200 – 400 ^{0}C tijekom 60 – 120 minuta. Budući da je raspon zahtjeva relativno velik, treba pretpostaviti da je najprikladnija kombinacija u pojedinim slučajevima u različitim zemljama bila dobivena cost-benefit analizom. Imajući u vidu da se niti u jednom od izvora podataka tablice 3.6 ne zahtijeva ugradnja FFFS, visoki zahtjevi za toplinskom otpornošću ventilacijskog sustava u svim zemljama vjerojatno su opravdani. Ipak, postavlja se pitanje da li je na taj način postignut optimalan omjer troška i benefita glede ukupnog sigurnosnog sustava tunela.

4. Opasni događaji u tunelima

Opasni događaji u cestovnom prometu i prometu općenito mogu biti vrlo različiti i imati različite uzroke. Iako pri spominjanju opasnosti u cestovnom prometu prva misao upućuje na opasnost od sudara vozila, međusobno ili s nekom zaprekom na ili u blizini ceste, lista opasnosti i njihovih uzroka zapravo je mnogo veća. Uzrok stradavanja ljudi i materijalnih dobara u prometu mogu biti vremenske nepogode (vjetar, magla, padavine, munja), kvarovi vozila, nedostaci ili nesavršenosti kolnika, signalizacije ili uputa, neznanje ili nesnalaženje vozača u pojedinoj situaciji, psihički ili fizički problemi vozača, terorističke aktivnosti itd. Neke opasnosti i rizici prisutni na otvorenim cestama u tunelima gotovo ne postoje (npr. vremenske nepogode), neki se praktički jednaki (npr. kvar vozila, ali bez zastoja), dok neki mogu biti znatno veći (npr. požar ili zastoj vozila). Većina rizika u tunelima posljedica je činjenice da se opasni događaj zbiva u prostoru koji je gotovo posve zatvoren i koji je s otvorenim prostorom najčešće povezan samo putem dvaju otvora (portala) tunela. Efekti „zatvorenog prostora“ naročito su izraženi u dugačkim tunelima ako je mjesto akcidenta udaljeno od portala. Pri razmatranju opasnih događaja u tunelima pažnja se usmjerava na one koji se specifični, odnosno one koji zbog okolišnih uvjeta u tunelu postaju posebno rizični. Npr. banalno zaustavljanje vozila na zaustavnoj traci autoceste na otvorenom, može, u tunelu koji nema zaustavnu traku, bitno povećati vjerojatnost naleta i rizik od posljedica koje će time nastati.

Zaštita od požara u tunelima zahtijeva specifičnu primjenu općih principa protupožarne zaštite, vatrogasne tehnike i taktike, sustava vatrodojave, te sustava i opreme za gašenje. Upravljanje radom sustava ventilacije, napose u uvjetima požara, zahtijeva integrativni pristup i sintezu brojnih multidisciplinarnih znanja koja nisu lako dostupna [73]. Požarno opterećenje u tunelu se kontinuirano mijenja i nemoguće je predvidjeti kakvo će biti upravo u trenutku izbijanja požara. Načelno je uvijek prisutna mogućnost da veličina požara bude značajno veća nego što je to nekakav „prosjek“ u normalnim zgradama, gdje je požarno opterećenje i rizike u pravilu moguće unaprijed relativno precizno odrediti. Za razliku od komercijalnih i industrijskih zgrada i postrojenja, u cestovnim tunelima nema mogućnosti sektorizacije, tj. tunel nije moguće podijeliti na požarne sektore, što gašenje, evakuaciju i spašavanje ljudi čini znatno težima [93]. S velikom se vjerojatnošću može očekivati da će se cijela prisutna ljudska populacija koju treba spasiti nalaziti u istom sektoru zajedno s požarom, a budući da je tunel linearna građevina, požar se može gasiti jedino s mjesta koja se nalaze u tom istom sektoru, u najboljem slučaju s dviju nasuprotnih strana. Ovako suženi pristup mjestu akcidenta negativno se reflektira na mogućnost intervencije i spašavanja pri svakoj vrsti akcidenta u tunelu.

Analiza mogućih realističkih događaja u tunelu, koji su specifični i koji mogu biti uzrok teških posljedica, ukazuje na sljedeće grupe scenarija:

- požar,
- ispuštanje opasnih (toksičnih) tvari i
- eksploziju.

Detaljnijom analizom scenarija, oni se mogu dalje razvrstati na način prikazan u tablicama 4.1 i 4.2. Budući da eksplozija kao fenomen predstavlja samo vrlo brzo izgaranje, požar i eksplozije prikazani su zajednički.

Tablica 4.1. Opasni scenariji sa zapaljivim i eksplozivnim tvarima

Opasnost	**Zapaljiva ili eksplozivna tvar**		
Događaj	Požar i/ili eksplozija		
Fizikalno/agregatno stanje tvari	Krutina	Tekućina	Komprimirani plin/ukapljeni plin
Događaj - efekt	- Požar krutine - Eksplozija prašine - Eksplozija (eksploziva)	- Požar lokve - Prelijevanje tanka - Požar tanka (spremnika) - Požar mlaza (baklja)	- Požar mlaza/otparka[73] (baklja) - Deflagracija oblaka para/plina[74] - Vatrena lopta BLEVE[75]

Tablica 4.2. Opasni scenariji s ispuštanjem opasnih (toksičnih) tvari

	Utjecajna veličina	**Presudni parametar**
Osobina ispuštanja	- Vrsta ispuštanja i ukupna količina - Protok - Veličina (površina) lokve - Brzina evaporacije - Trenutno (flash) otparavanje	- Fizikalno/agregatno stanje - Brzina evaporacije
Događaj - efekt	- Koncentracija polutanta/toksične tvari - Vrijeme izlaganja	-Veličina izvora - Gustoća (u odnosu na zrak) - Dimenzije tunela - Strujanje zraka - Akutna toksičnost - Zapaljivost - Eksplozivnost - Reaktivnost (s vodom)
Posljedice	- Osobe - Okoliš	- Broj izloženih osoba - Vrijeme izlaganja - Stupanj zaštite - Kanalizacijski sustav - Broj osoba u okolini portala

Ako nakon ispuštanja toksičnih tvari nema dodatnih opasnih događanja kao što su požar i/ili eksplozija, tada su za procjenu posljedica važne samo navedene utjecajne veličine i presudni parametri. Ako se pak ispušteni medij može zapaliti i/ili eksplodirati, tada i ove osobine treba uzeti u obzir pri procjeni i rizici se mogu povećati. U slučaju da veličina scenarija prelazi određene granice, u smislu veličine požara, eksplozije ili ispuštanja toksične tvari, tada zapravo ne postoje realne mogućnosti za intervenciju i spašavanje.

[73] Pri naglom padu tlaka tekućine koja se prvobitno nalazila u ravnotežnom (tekućem) stanju pri povišenom tlaku dolazi do trenutnog otparavanja dijela medija (instantaneous vaporization, flash vaporization, steam flashing).

[74] Deflagracija oblaka plina/para načelno može biti „neograničena“, tj. na otvorenom prostoru (UVCE – Unconfined Vapour Cloud Explosion) ili „ograničena“, tj. u zatvorenom prostoru (VCE - Vapour Cloud Explosion). Deflagracija u tunelu biti će mnogo sličnija ovoj drugoj.

[75] BLEVE – akronim od Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion.

4.1 Procjenjivanje rizika i princip ALARP[76]

Da bi se procijenili rizici koji mogu dovesti do opasnih i štetnih događaja u tunelima, razvijene su posebne metode korištenjem kako rezultata eksperimentalnih istraživanja, tako i proučavanjem posljedica mnogobrojnih događaja pri stvarnim akcidentima u tunelima. Predmet dosadašnjih istraživanja bili su prvenstveno bitni parametri koji utječu na postizanje najvažnijih ciljeva, a to su:

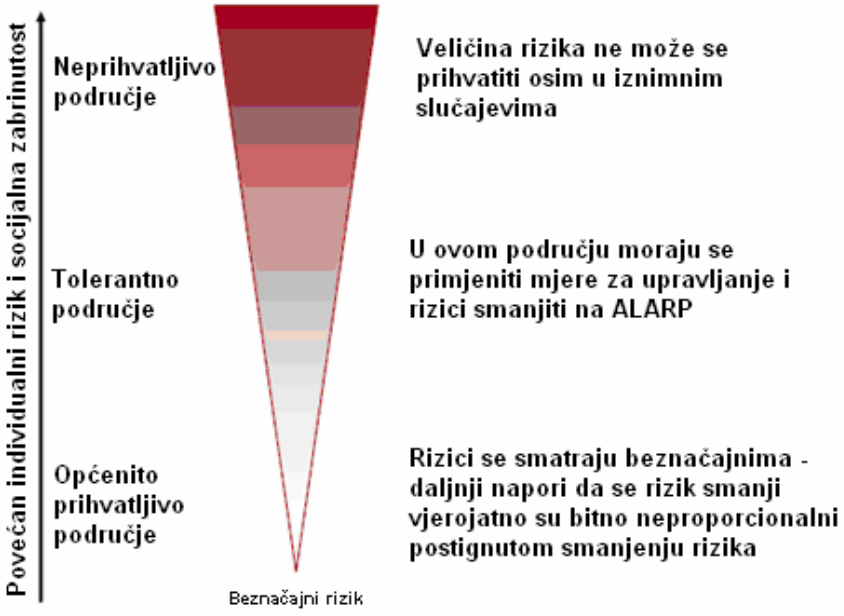
- Smanjenje rizika za osobe u tunelu, te njihova sigurna i brza evakuacija i spašavanje iz zone rizika.
- Održavanje integriteta tunelske građevine uz utvrđivanje graničnih i dozvoljenih opterećenja stijenki i stropa tunela.
- Usavršavanje ventilacijskog sustava, koji (pri akcidentu) prvenstveno služi za odvođenje toksičnog dima i topline izgaranja iz zone boravka ljudi, uključivši i razvoj tehničke opreme tunelskih sustava.
- Povećanje stupnja sigurnosti korisnika tunela pružanjem mogućnosti za samospašavanje, što uključuje evakuacijske izlaze za nuždu, poprečne prijelaze, izlazne koridore, nužnu rasvjetu, detekciju požara, prijenosne vatrogasne aparate, komunikacijski sustav, sustav označavanja, telefone za slučaj nužde itd.
- Unaprjeđenje učinkovitosti sustava detekcije požara i stacionarnih sustava za gašenje/supresiju/kontrolu požara u cilju poboljšanja mogućnosti za samospašavanje ljudi, smanjenja snage i temperature požara, te očuvanja tunelske građevine.

Eksperimentalna istraživanja izvedena su korištenjem različitih vozila, maketa vozila i tereta te simulatora požara tekućina (tava). Kao gorivo korištena su stara vozila, materijali od kojih su vozila izrađena, tereti koje vozila najčešće prevoze te goriva koja služe za pogon vozila (benzin, diesel-gorivo), odnosno njihove kombinacije. Istraživanja su bila provedena u pravom mjerilu, u umanjenom i u laboratorijskom mjerilu. Najvažnija takva istraživanja prikazana su u prethodnom tekstu. Korištenjem numeričkih simulacijskih modela dobro su proučeni pojedini utjecajni faktori. Time je postignuta relativno visoka razina poznavanja kompliciranih procesa koji se tijekom akcidenata događaju u tunelu, pa je bilo moguće razviti niz scenarija događanja koji su rezultirali uspostavljanjem međunarodno prihvatljivog niza od 13 tipičnih i reprezentativnih opasnih događaja [94]. Ti scenariji događanja koriste se kao osnovni tipični rizici pri prijevozu opasnih tvari u postojećim tunelima i u projektima budućih tunela za izradu kvantitativne procjene rizika (QRA[77]), odnosno pri analizi i procjeni rizika kod prijevoza opasnih tvari kroz tunele, gdje su takvi rizici i najveći. Pritom se koristi tzv. ALARP[78] princip, koji rizike pri kvantitativnoj analizi i upravljanju rizicima dijeli u tri kategorije [95]:

- Kategoriju (područje) beznačajnog (zanemarljivog) i općenito prihvatljivog (tolerabilnog) rizika, u kojoj nisu potrebni dodatni napori za smanjenje rizika jer su tu rizici već dovoljno mali.
- Kategoriju (područje) neprihvatljivog (prekomjernog) rizika. U ovoj kategoriji rizici koji postoje smatraju se neprihvatljivo visokima (intolerabilnima) i moraju se što prije smanjiti, čak ako su troškovi nerazmjerno visoki. Cilj je da se rizici dovedu barem u područje prihvatljivosti, a ako to nije moguće, aktivnost se mora prekinuti.

[76] ALARP je akronim od As Low As Reasonably Practicable (koliko god je razumno prihvatljivo/moguće).
[77] QRA je akronim od Quantitative Risk Assessment.
[78] Uz ALARP postoje i slični izrazi: SFAIRP – akronim od So Far As Is Reasonably Practicable i ALARA – akronim od As Low As Reasonably Achievable - koliko god je razumno moguće. Iako se stječe dojam da su oni međusobno identični, u pravnim formulacijama vezanima za uklanjanje rizika mogu imati znatno različito značenje i posljedice.

- Kategoriju (područje) prihvatljivog (tolerabilnog) rizika. U ovoj kategoriji, koja se nalazi između neprihvatljivog i općenito prihvatljivog rizika, rizici se mogu smanjiti, pa je potrebno poduzeti mjere za smanjivanje rizika. Ipak, troškovi ovih zahvata trebaju se nalaziti unutar razumnih granica (ALARP).



Slika 4.1. Okvir za rizike i njihovu prihvatljivost [95]

Britanski Health and Safety Executive (HSE) već se niz godina bavi pitanjem sigurnosti i rizika [95, 96]. U spomenutim dokumentima predložen je univerzalni okvir za donošenje odluka vezanih sa sigurnošću, koji su prihvatile brojne rizične industrije širom svijeta. U ovima i u nizu drugih dokumenata, pisci kojih su evidentno prihvatili stajališta HSE, navode se sljedeći numerički podaci za definiranje triju kategorija fatalnih rizika (smrti), koje su u takvom ili malo izmijenjenom obliku prihvatile i mnoge zemlje i različite organizacije:

- *Općenito prihvatljiv rizik*: Rizik smrtne žrtve manji od 10^{-6} godišnje, koji nastupa zbog nekog određenog uzroka, smatra se kao zanemariv i općenito prihvatljiv individualni rizik za stanovništvo.
- *Neprihvatljiv rizik*: Rizik smrtne žrtve veći od 10^{-4} godišnje smatra se neprihvatljivim pod normalnim okolnostima kao individualni rizik za stanovništvo. Za gornju granicu tolerantnog individualnog rizika za radnike određen je (viši) rizik smrtne žrtve od 10^{-3} godišnje[79].
- *Tolerabilni rizik (zona ALARP)*: To je područje rizika smrtne žrtve između 10^{-4} i 10^{-6} godišnje.

Koncept ALARP pružio je praktičan alat za procjenu tolerabilnosti rizika time što je postavio princip da ako trošak smanjivanja rizika značajno prelazi benefite, tada se rizik može smatrati tolerabilnim. Pojednostavljeno, postupak određivanja da je rizik smanjen koliko je god to razumno moguće (ALARP) uključuje:

[79] Prihvatljivi rizik je manji za stanovništvo jer je to u širem društvenom interesu. Stanovništvo nije obrazovano i nije u mogućnosti poduzimati mjere za smanjivanje rizika, a nema niti jasne veze između rizika i benefita kao kod radnika koji su plaćeni za svoj rad.

- Procjenu rizika koji se želi izbjeći.
- Procjenu žrtve (novčane, vremenske ili smetnje) koja nastaje provođenjem mjera za smanjivanje ili izbjegavanje toga rizika.
- Usporedbu ovih dviju vrijednosti i donošenje odluke o tome da li mjere provesti ili ne. Pri odlučivanju se često koristi faktor disproporcionalnosti D, koje predstavlja kvocijent troška u odnosu na benefit, a sam postupak se naziva analiza troška i benefita[80]. Ako je faktor (D) veći od neke unaprijed definirane i općenito prihvaćene vrijednosti[81], tada se može smatrati da su troškovi jako neproporcionalni (grossly disproportionate) u odnosu na benefite, pa se može izjaviti da određena mjera za smanjenje rizika nije razumno prihvatljiva. Kao sljedeće bitno pitanje postavlja se pitanje vrijednosti benefita, ljudskog života, tj. pripisivanje određene novčane vrijednosti ljudskom životu. U tu se svrhu koristi tzv. vrijednost za sprječavanje smrtnog ishoda od oko 1 000 000 GBP [95][82].

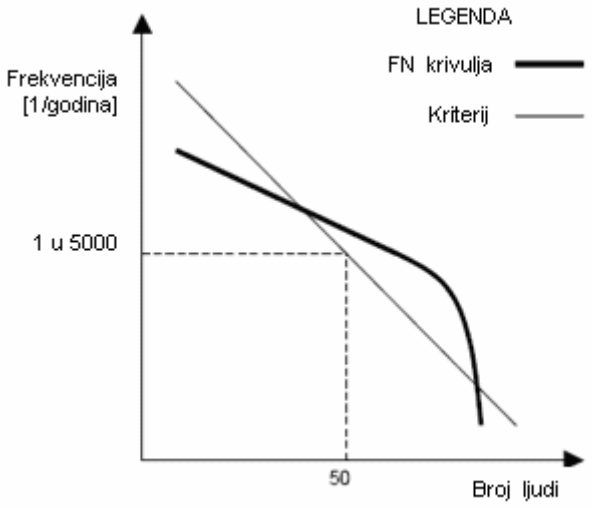
Osim individualnog rizika, postoji i pojam societalnog (društvenog) rizika. Societalni rizik se odnosi na opasnost koja, ako se realizira, može imati značajniji utjecaj na društvo i time izazvati društvene i/ili političke posljedice. Vrednovanje societalnog rizika bavi se izračunavanjem vjerojatnosti da će pri nekom akcidentu istovremeno biti oštećeno više osoba (više nego jedna). Kao posljedica nastupa rizika obično se pojavljuje broj mrtvih ili ozlijeđenih ljudi u nekom vremenu. Iako u tehničkom smislu societalni rizik samo daje odnos između frekvencije i broja ljudi koji su pretrpjeli određenu razinu štete zbog neke određene opasnosti (obično u vremenskom periodu od godinu dana), [94], mnogi ljudi societalni rizik shvaćaju u širem smislu, kao npr. društvene i političke posljedice koje će se pojaviti nakon većeg akcidenta.

Societalni rizik se obično prikazuje FN krivuljom, koja daje kumulativnu frekvenciju (F) za različite scenarije akcidenata u ovisnosti o broju žrtava (N) koje su posljedice toga akcidenta. To znači da je za svaku frekvenciju parametar N broj žrtava, koji može biti upravo jednak N ili veći. Žrtve se obično određuju kao osobe s fatalnim povredama, pa onda N prikazuje broj ljudi koji bi mogli biti usmrćeni u incidentu. „Linija kriterija“ na FN krivulji predložena je kao način da se definiraju rizične zone odnosno kategorije. HSE [95] definira samo jednu točku [N = 50, F(N) = 1/5000 godišnje], kao vjerojatnost da će 50 ili više ljudi stradati jednom u 5000 godina i to daje kao kriterij (ne)prihvatljivosti. Ako se ova točka ucrta u FN dijagram i kroz nju potegne linija s koeficijentom nagiba od -1 u log-log mjerilu, dobiva se „linija kriterija“. Ova se linija može koristiti tako da se u isti dijagram ucrta i stvarno izračunata FN krivulja za neki objekt/akcident, pa ako bilo koja točka stvarne krivulje prelazi „liniju kriterija“, time će ona pokazati da je neprihvatljiva [98]. U Nizozemskoj se npr. prihvatljivim rizikom za korisnike tunela smatra individualni rizik $< 1 \cdot 10^{-7}$/km·osoba i societalni rizik $< 1 \cdot 10^{-1}/N^2$ po km godišnje [99].

[80] Cost benefit analysis (CBA).

[81] Jasno je da faktor D ne može biti < 1. HSE [97] navodi da „…ne postoji precizan zakonski faktor ili HSE algoritam za određivanje velike nerazmjernosti…“, ali ipak daje uputu za određivanje faktora D na sljedeći način: „Za rizike koji se odnose na stanovništvo, ovaj će faktor ovisiti o razini rizika i tamo gdje su rizici mali (posljedice ili vjerojatnost), predlaže se faktor od oko 2, no ako su rizici visoki, ovaj bi faktor trebao biti oko 10. … Za našu svrhu, smatra se da faktor manji od 10 vjerojatno nije prihvatljiv u blizini područja neprihvatljivog rizika, dok za opasnosti koje mogu prouzročiti značajne posljedice, ovaj faktor može biti još veći.“

[82] Value for preventing a fatality (VPF), vrijednost za spriječavanje smrtnog ishoda od oko 1 000 000 GBP (trenutno oko 1 150 000 Eura) definirana je 2001. godine pa se s protekom vremena revalorizira (4% godišnje). Jasno se navodi da VPF nije vrijednost koju su društvo ili sudovi spremni dodijeliti kao odštetu za smrt neke stvarne osobe ili kojom bi se nadoknadio gubitak nastao njenom smrću, već je to samo novčana vrijednost koja se uzima pri provođenju CBA [95]. Druge zemlje mogu imati i često imaju drugačije vrijednosti VPF.



Slika 4.2. Primjer FN krivulje s ucrtanim kriterijem (točkom i linijom) iz HSE [95], prema HSE [98]

4.2 Scenariji i vjerojatnost opasnih događaja

Ozbiljan akcident s opasnim tvarima u tunelu može imati vrlo visoku cijenu mjereno brojem ljudskih žrtava, oštećenjem tunela i prekidom prometa, kao i štetom za prirodni okoliš. S druge strane, nepotrebno zabranjivanje prometa opasnim tvarima kroz tunele može stvoriti neopravdane ekonomske troškova. Ono također može natjerati prijevoznike da koriste alternativne rute s još većim opasnostima i rizicima, kao što je npr. vožnja kroz gusto naseljena područja ili gradove, s krajnjoj posljedicom povišenja ukupnog rizika u prometu. Zabrana prijevoza opasnih tvari koje se smiju prevoziti na otvorenim cestama kroz tunele može se opravdati samo tamo gdje su rizik i posljedice ozbiljnih akcidenata u tunelu (npr. broj žrtava ili neprihvatljivo oštećenje tunela) veći u tunelu nego na otvorenoj alternativnoj ruti. Da bi se olakšalo i unificiralo izvođenje kvantitativnih procjena rizika, OECD i PIARC su zajednički pokrenule projekt OECD (2001) - *Safety in Tunnels - Transport of Dangerous Goods through Road Tunnels*, putem kojeg je napravljena studija nacionalnih i internacionalnih propisa o prijevozu opasnih tvari kroz tunele, razvijen sustav za harmoniziranje tunelskih propisa na međunarodnoj razini, razvijeni alati za procjenu rizika i pomoć pri procesu odlučivanja, razmotrene mjere za smanjenje rizika i vrednovana njihova učinkovitost. Model QRA bazira se na sljedećim koracima [100]:

1. Odabiru relativno malog, ali reprezentativnog broja roba u prijevozu.
2. Odabiru relativno malog, ali reprezentativnog broja scenarija akcidenata s tim robama.
3. Određivanju fizikalnih učinaka ovih scenarija, na otvorenoj cesti i u tunelu.
4. Određivanju fizioloških učinaka ovih scenarija na sudionike prometa na cesti i na lokalno stanovništvo (smrtni slučajevi i ozljede).
5. Određivanju izgleda za bijeg iz ugrožene u sigurnu zonu i/ili u skloništa.
6. Uzimanju u obzir različitih mjera za smanjivanje rizika.
7. Određivanju odgovarajućih vjerojatnosti događanja.

Odabrano je 13 tipičnih i reprezentativnih scenarija s opasnim tvarima, prikazanih u tablici 4.3, koji su podijeljeni u pet grupa (A – E) prema očekivanim opasnostima koje će se pojaviti

njihovim nastupanjem (eksplozija, ispuštanje toksičnih plinova ili isparljivih toksičnih tekućina i požar). Procjena rizika prometovanja tim opasnim tvarima za svaki pojedini tunel trebala bi, u skladu s njegovim karakteristikama i karakteristikama prometa kroz njega, dati odgovor na pitanje koji se tereti smiju, kada i pod kojim uvjetima prevoziti kroz tunel. Krajnji rezultat predstavlja uniformno označavanje tunela u smislu dopustivosti prometovanja teretima tih grupa i olakšavanje provođenja prakse sigurnosti za sve dionike uključene u proces: operatore tunela, prijevoznike, vlasnike roba, inspekcije, upravne organe itd.

Tablica 4.3. Scenariji opasnih događaja u tunelima, OECD [94]

Scenarij	Opis događaja	Količina opasne tvari	Veličina ispusta, mm	Maseni protok, kg/s	Grupa tereta	Karakteristika tereta
1	Požar HGV 20 MW (krutina, zapaljiva)	-	-	-	E	Neopasna tvar, normalan gorivi teret
2	Požar HGV 100 MW (krutina, zapaljiva)	-	-	-	E	Neopasna tvar, normalan gorivi teret
3	BLEVE UNP plina (tekućina), boca plina	50 kg	-	-	D	Opasna tvar, požar s eksplozijom (ukapljeni plin)
4	Požar lokve motornog benzina (tekućina)	28 t	100	20,6	C	Opasna tvar, požar
5	VCE motornog benzina (tekućina, isparenje)	28 t	100	-	C	Opasna tvar, požar s eksplozijom para
6	Ispuštanje klora (tekućina, isparenje)	20 t	50	45	B	Opasna tvar, toksično ispuštanje
7	BLEVE tanka UNP (tekućina, isparenje)	18 t	-	-	A	Opasna tvar, požar s eksplozijom (ukapljeni plin)
8	VCE tanka UNP (tekućina, isparenje)	18 t	50	36	A	Opasna tvar, požar s eksplozijom (ukapljeni plin)
9	Požar mlaza UNP iz tanka (isparenje)	18 t	50	36	A	Opasna tvar, požar
10	Amonijak, ispuštanje (tekućina, isparenje, zapaljivo, toksično)	20 t	50	36	B	Opasna tvar, toksično ispuštanje
11	Akrolein, ispuštanje iz tanka (tekućina, zapaljivo, toksično)	25 t	100	24,8	B	Opasna tvar, toksično ispuštanje
12	Ispuštanje akroleina, boca plina	100 L	4	0,02	D	Opasna tvar, toksično ispuštanje
13	BLEVE ukapljenog CO_2 (toksični učinci nisu uključeni)	20 t	-	-	B	Opasna tvar, fizikalno ispuštanje

Legenda: BLEVE = Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion; UNP = Ukapljeni Naftni Plin; VCE = Vapour Cloud Explosion

U tablici 4.3 s ukupno 13 scenarija, nalaze se dva požarna scenarija s normalnim ali gorivim teretom (1 i 2), te jedanaest scenarija s opasnim tvarima. Tih jedanaest scenarija uključuje: jedno fizikalno (eksplozivno) ispuštanje opasne tvari (13); dva različita požarna scenarija s opasnim tvarima (4 i 9); četiri scenarija s požarom i eksplozijom (3, 5, 7 i 8); i četiri scenarija s ispuštanjem toksičnih kemikalija (6, 10, 11 i 12).

Glavne posljedice ovih opasnosti, kao i učinkovitost mogućih mjera za njihovo ublažavanje, mogu se u grubo prikazati kako slijedi:

- **Velike eksplozije.** Razlikuju se dvije vrste velikih eksplozija:
  - *„Vrlo velike" eksplozije*, s tipičnim primjerom eksplozije punog velikog spremnika UNP-a pod utjecajem požara (BLEVE), što dovodi do formiranja vatrene lopte i što se često naziva „hot BLEVE". Slične posljedice mogu imati i druge eksplozije.
  - *„Velike" eksplozije,* s tipičnim primjerom eksplozije punog velikog spremnika nezapaljivog komprimiranog plina pod utjecajem požara (BLEVE bez vatrene lopte), što se često naziva „cold BLEVE".

    „Vrlo velika" eksplozija („hot BLEVE" ili ekvivalent) će vjerojatno usmrtiti sve ljude koji se zateknu po čitavoj duljini tunela ili na znatnoj duljini tunela i izazvati ozbiljna oštećenja tunelske opreme, a moguće i građevine. Posljedice „velike eksplozije" („cold BLEVE" ili ekvivalent) biti će manje, napose u odnosu na tunelsku građevinu. Općenito gledano, ne postoje mogućnosti za ublažavanje ovih posljedica, posebno ne u prvom slučaju.

- **Veliko ispuštanje toksičnog plina.** Ovo ispuštanje može nastati zbog curenja iz velikog spremnika koji sadrži toksični plin (komprimiran, ukapljen ili otopljen) ili lako isparljivu toksičnu tekućinu. Posljedice će biti vjerojatno usmrćivanje svih ljudi koji se zateknu u blizini ispuštanja, kao i u zoni u koju ventilacija (prirodna ili prisilna) odvodi plin. Dio tunela se možda može zaštititi, ali nemoguće je zaštititi cijeli tunel, posebno ne u prvim minutama nakon akcidenta.

- **Veliki požar.** Ovisno o geometriji tunela, prometu, opremi i spremnosti osoblja, veliki požar imati će više ili manje ozbiljne posljedice, koje mogu biti u rasponu od nekoliko žrtava i ograničene materijalne štete, pa do nekoliko desetaka žrtava i ozbiljnog oštećenja tunela[83].

Redoslijed ovih opasnosti: eksplozija, ispuštanje toksičnih tvari (plina ili isparljive toksične tekućine), požar, ukazuje redom na smanjene posljedice akcidenta i na povećanu učinkovitost mogućih intervencijskih mjera. Na bazi ovih pretpostavki izveden je sustav s pet grupa tereta [94], rangiranih od A do E, u smislu povećanih ograničenja u odnosu na prijevoz opasnih tvari dozvoljenih u tunelima (tablice 4.4 i 4.5).

Iz ove raspodjele vidi se da je klasifikacija rizičnih scenarija u tunelima izvedena tako da po uzlaznom redu rizika grupe obuhvaćaju:

- „normalne požare" - „neopasnih" tereta	1 i 2 (E)
- eksploziju malog oblaka para i ograničeno ispuštanje toksičnih tvari	3 i 12 (D)
- veliki požar zapaljivih tekućina i eksploziju para (odgođeno paljenje)	4 i 5 (C)
- ispuštanje toksičnih ukapljenih plinova i veliku „eksploziju" oblaka para (plina) bez paljenja i toksičnosti (nezapaljivi i netoksični plinovi)	6, 10, 11 i 13 (B)
- velike požare (eksplozije) ukapljenih plinova	7, 8, i 9 (A).

Ovakav pristup u skladu je s Europskim sporazumom o međunarodnom cestovnom prijevozu opasnih tvari [101]. U skladu sa starijim izdanjem ADR-a[84], svi tuneli trebali su biti kategorizirani do konca 2009. godine. Ograničenja u prijevozu podijeljena su na pet kategorija, uzimajući u obzir svojstva tunela, rizike, alternativne putne pravce i upravljanje prometom.

[83] Ovdje nije u obzir uzeta mogućnost postavljanja FFFS u tunel, koji bi mogao bitno poboljšati situaciju i smanjiti broj žrtava.
[84] ADR iz 2007.

Tablica 4.4. Raspodjela opasnih scenarija u tunelima za QRA

Grupa tereta	Reprezentativni teret za QRA	Scenarij
Grupa E	- Požar HGV bez opasnih tvari (20 MW) - Požar HGV bez opasnih tvari (100 MW)	1 2
Grupa D	- Scenariji u grupi E, plus: - BLEVE UNP plina (tekućina), u bocama pod tlakom (50 kg) - Ispuštanje akroleina iz tlačne boce	 3 12
Grupa C	- Scenariji u grupi D, plus: - Požar lokve motornog benzina (tekućina) iz cisterne - VCE motornog benzina (tekućina) iz cisterne	 4 5
Grupa B	- Scenariji u grupi C, plus: - Ispuštanje amonijaka iz cisterne - Ispuštanje klora iz cisterne - Ispuštanje akroleina iz cisterne - BLEVE ugljičnog dioksida iz cisterne bez toksičnih učinaka	 10 6 11 13
Grupa A	- Scenariji u grupi B, plus: - BLEVE UNP-a iz cisterne - VCE UNP-a iz cisterne - Požar mlaza UNP-a iz cisterne	 7 8 9

Tablica 4.5. Kategorije ograničenja za promet opasnih tvari u tunelima, ADR [101]

Kategorija tunela	Ograničenja
A	Bez ograničenja za opasne tvari (za UN 2919 i 3331, prema ADR 8.6.3.1)
B	Ograničenje za opasne tvari koje mogu dovesti do: - vrlo velike eksplozije
C	Ograničenje za opasne tvari koje mogu dovesti do: - vrlo velike eksplozije - velike eksplozije - velikog ispuštanja toksičnih tvari
D	Ograničenje za opasne tvari koje mogu dovesti do: - vrlo velike eksplozije - velike eksplozije - velikog ispuštanja toksičnih tvari - velikog požara
E	Ograničenje za opasne tvari osim UN 2919, 3291, 3331, 3359 i 3373[85]

[85] UN 2919 – Radioaktivni materijali, transport prema posebnim sporazumima, nefisioni i fisiono izuzeti
UN 3291 – Klinički otpad, nespecificiran ili (bio)medicinski otpad
UN 3331 – Radioaktivni materijal, transport prema posebnim sporazumima, fisioni
UN 3359 – Fumigacijska transportna jedinica
UN 3373 – Dijagnostički uzorci

Ova kategorizacija očigledno se bazira na vrednovanju da su:
- Mala opasnost: Požar tvari bez deklaracije (kao opasne tvari)
- Umjerena opasnost: Veliki požar zapaljivih tekućina
- Velika opasnost: Veliko ispuštanje toksičnih tvari
- Vrlo velika opasnost: Velike i vrlo velike eksplozije.

Stvarnu vjerojatnost (frekvenciju) mogućih budućih opasnih događaja s teškim posljedicama u nekom tunelu vrlo je teško precizno predvidjeti u praksi. Za procjenjivanje frekvencije pojedinih događaja u budućnosti normalno se koriste statistički podaci o takvim i/ili sličnim događajima iz prošlosti, na istim ili sličnim mjestima. Za mnoge karakteristične događaje prikupljaju se statistički podaci, pa ako tih događaja ima dovoljan broj, moguće je relativno točno izračunati njihovu frekvenciju u prošlosti, te taj podatak na neki način ekstrapolirati na budućnost. Podaci o akcidentima u tunelima ne prikupljaju se sustavno i uniformno na široj bazi (npr. nacionalnoj, europskoj ili svjetskoj). Mnogi spektakularni događaji u tunelima vrlo su dobro poznati iz mnoštva objavljenih informacija, ali je broj takvih događaja relativno mali. Istodobno manje spektakularni događaji ne nalaze svoje mjesto u medijima javnog informiranja i službenim statistikama, pa je o njima poznato vrlo malo detalja. Zbog svega toga, baza podataka je relativno mala, pa se često za predviđanje frekvencije i vrste budućih akcidenata koriste podaci koji su relativno stari (tehnologija vozila i prometa se mijenja), ili se, da bi se obuhvatio dovoljan broj događaja, koriste podaci sakupljeni tijekom višegodišnjeg perioda. Uz to se ponekad podaci koji su relevantni za neke zemlje (npr. skandinavske), koriste za neke druge zemlje (npr. mediteranske), što njihovu reprezentativnost i aplikabilnost čini upitnom.

U cilju dobivanja odgovarajućih vjerojatnosti opasnih događaja u pojedinim tunelima, izvode su različite analize rizika. Za primjer su prikazani rezultati primjene QRA modela na Tauern tunel u Austriji. U tablici 4.6 prikazane su očekivane vrijednosti (EV[86]) za različite scenarije događaja s pojedinim mjerama za ublažavanje posljedica. Očekivana vrijednost je integral ispod odgovarajuće F/N krivulje. Novi ventilacijski sustav (Novo 1) smanjuje očekivanu vrijednost svih scenarija s HGV, s i bez opasnih tvari, za gotovo 30%. Najveća mogućnost smanjivanja rizika izračunata je za scenarij s toksičnim tvarima (preko 80%), dok je najniža ona za propan u cisterni (jedva 2%). Organizacijskim mjerama, tj. promjenama u ponašanju vozača HGV (zaustavljanje na povećanoj udaljenosti od vozila ispred njih u slučaju zastoja), očekivana vrijednost smrtnih slučajeva će se dalje smanjiti (svi scenariji, za 40% do 57%).

Tablica 4.6. Redefiniranje vjerojatnosti (EV) za Tauern tunnel [100]

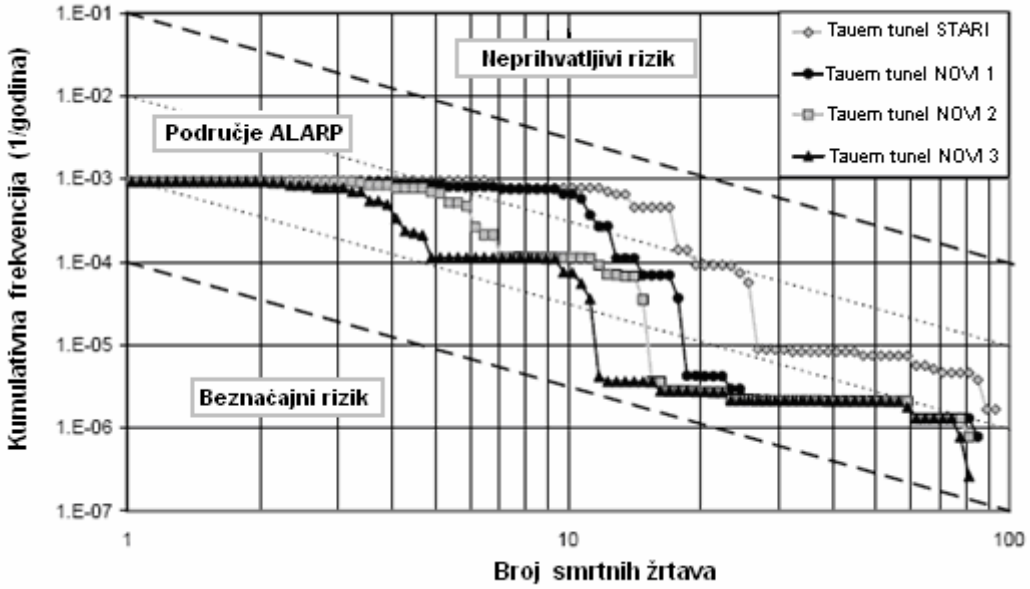
Scenarij	**Vjerojatnost smrtnog slučaja/godina**			
	Prije[87]	Novo 1[88]	Novo 2[89]	Novo 3[90]
Svi scenariji (Σ)	$1{,}428 \cdot 10^{-2}$	$9{,}807 \cdot 10^{-3}$	$5{,}901 \cdot 10^{-3}$	$4{,}177 \cdot 10^{-3}$
Požar 20 - 100 MW	$1{,}046 \cdot 10^{-2}$	$7{,}688 \cdot 10^{-3}$	$4{,}146 \cdot 10^{-3}$	$2{,}766 \cdot 10^{-3}$
Zapaljive tekućine	$3{,}143 \cdot 10^{-3}$	$1{,}853 \cdot 10^{-3}$	$1{,}501 \cdot 10^{-3}$	$1{,}175 \cdot 10^{-3}$
Toksične tvari	$5{,}008 \cdot 10^{-4}$	$9{,}367 \cdot 10^{-5}$	$8{,}691 \cdot 10^{-5}$	$7{,}335 \cdot 10^{-5}$
Propan u cisterni	$1{,}764 \cdot 10^{-4}$	$1{,}728 \cdot 10^{-4}$	$1{,}677 \cdot 10^{-4}$	$1{,}627 \cdot 10^{-4}$

[86] EV je akronim od Expected Value (očekivana vrijednost).
[87] Prije rekonstrukcije ventilacije.
[88] Nakon rekonstrukcije ventilacije.
[89] Nakon rekonstrukcije ventilacije + razmak HGV do vozila ispred njega (u zastoju) $\geq$ 50 m.
[90] Nakon rekonstrukcije ventilacije + razmak HGV do vozila ispred njega (u zastoju) $\geq$ 100 m.

Pri tome scenariji požara od 20 – 100 MW i požara zapaljivih tekućina imaju najvišu mogućnost za smanjivanje rizika (prvi 46% - 64%, drugi 19% - 37%). Propan u autocisterni ponovno ima najmanju mogućnost smanjivanja rizika (3% - 6%).

F/N krivulje za različite scenarije ublažavanja posljedica (slika 4.3) pokazuju i da se poboljšanje mogućnosti novog ventilacijskog sustava uglavnom odnosi na akcidente s velikim brojem žrtava, dok organizacijske mjere (povećanje razmaka) gotovo da ne utječu na visoki broj smrtnih slučajeva. Najveći potencijal ovih mjera je smanjivanje rizika pri akcidentima sa srednjim brojem žrtava.

Za scenarije s opasnim tvarima OECD [94] daje vjerojatnost događanja prema tablici 4.7.



Slika 4.3. Rezultati QRA različitih scenarija za Tauern tunel[91] [100]

Tablica 4.7. Vjerojatnosti događaja [94]

Scenarij	Karakteristika scenarija			Vjerojatnost nastupa događaja/god.			
	Scenarij broj	Klasa opasne tvari	Teret	U gradu	Izvan grada	Tunel u gradu	Tunel izvan grada
BLEVE propan u bocama	3	2	mali	$4{,}3 \cdot 10^{-4}$	$8{,}0 \cdot 10^{-4}$	$1{,}7 \cdot 10^{-3}$	$5{,}1 \cdot 10^{-3}$
Požar lokve benzina	4	3	veliki	$2{,}7 \cdot 10^{-3}$	$4{,}5 \cdot 10^{-3}$	$2{,}8 \cdot 10^{-3}$	$2{,}0 \cdot 10^{-2}$
VCE benzin	5	3	veliki	$2{,}7 \cdot 10^{-4}$	$4{,}5 \cdot 10^{-4}$	$2{,}8 \cdot 10^{-4}$	$2{,}0 \cdot 10^{-3}$
Ispuštanje klora	6	1	veliki	$3{,}1 \cdot 10^{-2}$	$5{,}4 \cdot 10^{-2}$	$3{,}1 \cdot 10^{-2}$	$5{,}4 \cdot 10^{-2}$
BLEVE propan u cisterni	7	2	veliki	$2{,}3 \cdot 10^{-4}$	$4{,}2 \cdot 10^{-4}$	$2{,}8 \cdot 10^{-4}$	$2{,}0 \cdot 10^{-3}$
VCE propan u cisterni	8	2	veliki	$2{,}3 \cdot 10^{-4}$	$4{,}2 \cdot 10^{-4}$	$2{,}8 \cdot 10^{-4}$	$2{,}0 \cdot 10^{-3}$
Slobodni mlaz propana iz cisterne	9	2	veliki	$2{,}3 \cdot 10^{-3}$	$4{,}2 \cdot 10^{-3}$	$2{,}8 \cdot 10^{-3}$	$2{,}0 \cdot 10^{-2}$
Ispuštanje amonijaka	10	1	veliki	$3{,}1 \cdot 10^{-2}$	$5{,}4 \cdot 10^{-2}$	$3{,}1 \cdot 10^{-2}$	$5{,}4 \cdot 10^{-2}$

[91] Crtkane linije prikazuju prijedlog kriterija za prihvaćanje rizika. Iznad gornje linije nalazi se područje neprihvatljivog rizika,a ispod donje linije je područje zanemarljivog rizika. Između dviju linija je područje ALARP, gdje je, na temelju procjene, rizike potrebno smanjiti na troškovno učinkovit način.

5. Scenariji događanja

5.1 Požari u tunelima

5.1.1 Uvjeti ventilacije i izgaranja u tunelima

Tunel je cijev otvorena s dvije strane koja načelno ima prirodnu ventilaciju ili vlastiti sustav prisilne ventilacije. U normalnom radu, svrha ventilacijskog sustava je da postojeći zrak u cijevi zagađen ispušnim plinovima vozila nadomjesti svježim zrakom. Osim prirodne i prisilne ventilacije, na gibanje zraka u tunelu utječe i „stapni efekt", što je posljedica gibanja vozila. Da bi u slučaju nezgode bilo moguće hitro reagirati, uzdužna ventilacija u tunelu pri redovitom radu treba održavati minimalnu brzinu zraka od 1 m/s, dok polupoprečna i poprečna ventilacija trebaju funkcionirati tako da osiguraju najmanje 4 izmjene zraka na sat [87]. Ipak, u tunelima u redovitom radu česte su i veće brzine gibanja zraka, od 7-8 m/s. U slučaju požara, potrebno je u skladu sa člankom 4.3.4 [87] koristiti brzine koje su barem jednake kritičnima (2,3-3,6 m/s), što je dovoljno da ne nastupi backlayering[92].

Protok zraka kroz tunel pruža trajni izvor kisika za izgaranje u slučaju požara. Količina zraka koja stoji na raspolaganju za oksidaciju u nekom presjeku tunela ovisi o površini poprečnog presjeka tunela i o brzini strujanja, čime je određena i količina toplinske energije koja se može osloboditi. Stoga je temeljem masenog protoka atmosferskog kisika za svaku poziciju u tunelu moguće izračunati maksimalnu toplinsku snagu požara (HRR_{max}). Pri potpunom izgaranju najčešćih organskih tvari, uobičajeno se računa da se po svakom kg potrošenog kisika oslobađa energija od E_{O2} = 13,1 MJ. Faktor od 13,1 MJ/kg[93] dobro je poznat iz mnogih kalorimetrijskih mjerenja požarnih laboratorija [102]. Na bazi potpunog utroška raspoloživog kisika, može se vidjeti da li pri normalnim operativnim uvjetima u tunelu ima dovoljno kisika u svim presjecima. Do sada izmjerene ili izračunate *HRR* u tunelima ukazuju da je izgaranje bilo nepotpuno (podventilirano) samo u vrlo rijetkim slučajevima, kad je požarno opterećenje bilo suviše veliko.

Za jednostavan termodinamički proračun mogu se koristiti sljedeće relacije:

Maseni protok kisika:

$$\dot{m}_{O_2} = \rho_{O_2}\dot{V}_{O_2} = 0{,}21 \cdot \rho_{O_2} V_a = 89{,}1 \cdot u \frac{A_{tun}}{T_a} \tag{5.1}$$

[92] Kritične brzine zraka pri odimljavanju date su za pravokutni i za kružni oblik tunela putem tablice koja obuhvaća 3 snage požara (30, 50 i 100 MW), te 3 uzdužna nagiba (0-1%, 1-3% i 3-6%) [87]. Kritične brzine rastu s povećanjem snage i nagiba tunela. U vezi s pozitivnom korelacijom između brzine strujanja zraka i *HRR*, što pokazuju mnogobrojna istraživanja prikazana u daljnjem tekstu, te činjenicu da je stratifikaciju dima moguće zadržati samo s manjim brzinama zraka (1-1,5 m/s), opravdano se postavlja pitanje da li je ovakav pristup optimalan s gledišta osiguranja najbolje sigurnosti u tunelu. Prednost osiguravanju stratifikacije dima u odnosu na osiguravanje od backlayeringa u početnoj fazi požara zagovara i Drakulić [73], navodeći da kontrolu uzdužnog strujanja zraka treba obaviti u „režimu odimljavanja", usprkos uobičajenoj praksi da se odimljavanje vrši sa svim rapoloživim ventilatorima, tj. s maksimalnom mogućom uzdužnom brzinom.

[93] Hugget [103] je izračunao da je E_{O_2} = 12,72 ± 3% kJ/g kisika za tipične organske tekućine i plinove, a E_{O2} = 13,02 ± 4% kJ/g kisika za tipične polimere.

Faktor 81,9 izračunat je uvrštavanjem normalnog tlaka zraka od $1{,}01325 \cdot 10^5$ Pa i plinske konstante od 259,8 J/kg K za kisik.

Toplinska snaga izgaranja s potpunim iskorištenjem kisika:

$$Q = HRR = \dot{m}_{O_2} E_{O_2} = 13{,}1 \ \dot{m}_{O_2} = 3{,}93 \ u \ A_{tun} \tag{5.2}$$

Faktor 3,93 dobiven je uvrštavanjem normalne temperature zraka od 0^0 C (T_a = 273 K)[94].

Masa izgorjelog goriva biti će:

$$\dot{m}_f = \frac{Q}{H_c} \tag{5.3}$$

Površina na kojoj gorivo izgara iznosi:

$$A_f = \frac{\dot{m}_f}{0{,}9\dot{m}''_f} \tag{5.4}$$

Pri tome je $\dot{m}''_f$ brzina regresije goriva, odnosno masena brzina izgaranja okomito na površinu izgaranja (brzina „trošenja“) goriva. Faktor uvećanja površine izgaranja (0,9) uzet je u obzir uz pretpostavku da brzine regresije goriva na otvorenom važe i za izgaranje u zatvorenom prostoru, mada to nije posve točno, jer jedan dio isparenih produkata ne izgori u potpunosti.

Uvrštavanjem nekoliko karakterističnih površina poprečnog presjeka tunela i brzina strujanja zraka u jednadžbu (5.2), mogu se dobiti indikativne toplinske snage požara (*HRR*). Brzina strujanja od 1 m/s prikladna je za prikaz, jer se iz nje za svaku veću ili manju brzinu lako može odrediti odgovarajuća *HRR* množenjem s faktorom proporcionalnosti, dok je brzina od 2,6 m/s odabrana kao brzina pri kojoj se tipično onemogućava „backlayering“. Poprečni presjek od 10 m^2 također je prikladan za množenje s faktorom proporcionalnosti. Za orijentaciju se navodi da većina postojećih tunela u RH ima poprečni presjek između 50 i 60 m^2, dok novi tuneli ponekad imaju presjek od oko 80 m^2. U tablici 5.1 date su vrijednosti za slučaj idealnog stehiometrijskog izgaranja, kao i za slučaj da je efikasnost izgaranja (stupanj iskorištenja kisika) η = 75%, odnosno da je pretičak zraka λ = 1,33.

Tablica 5.1. Moguće toplinske snage požara

Presjek tunela (m^2)	***HRR* pri brzini zraka 1 m/s, MW**		***HRR* pri brzini zraka 2,6 m/s, MW**	
	η = 1	η = 0,75	η = 1	η = 0,75
10	39,3	29,5	102,2	76,7
50	196,5	147,4	510,9	383,3
60	235,8	177,9	613,1	459,9
80	314,4	235,8	817,4	613,2

[94] Normalno (normno, standardno) stanje u termodinamici je toplinsko stanje definirano tlakom $1{,}01325 \cdot 10^5$ Pa i temperaturom 0 ^{0}C [104].

Vidi se da se već pri minimalnoj brzini zraka od 1 m/s, pri idealnom iskorištenju kisika, *HRR* od 200 MW postiže u tunelu presjeka 51 m^2, dok se ista snaga pri iskorištenju kisika od 75% postiže u tunelu presjeka 67,5 m^2. Svako povećanje brzine strujanja zraka, do kojeg će neizostavno doći pri odvođenju dimnih plinova u slučaju požara (zbog onemogućavanja backlayeringa), dovesti će dodatnu količinu zraka za izgaranje. Pri približno minimalnoj kritičnoj brzini za onemogućavanje backlayeringa (2,6 m/s), u tunelu tipičnog presjeka 50-60[95] m^2, *HRR* se penje na čak 400-600 MW.

Iz ogrjevnih vrijednosti tvari koje izgaraju moguće je odrediti njihove količine koje će izgorjeti u jedinici vremena. Donje ogrjevne vrijednosti (H_c) tipičnih goriva u tunelu prema Babrauskas iznose [38]:

- Benzin 43,7 MJ/kg,
- Polietilen (PE) 43,28 MJ/kg,
- Polipropilen (PP) 43,31 MJ/kg,
- Polistiren (PS) 39,85 MJ/kg,
- Drvo (europska bukva) 16,6 MJ/kg (samo isparljivi dio).

U tablici 5.2 date su količine goriva koje izgara u minuti za nekoliko karakterističnih *HRR* uz pretpostavku da je efikasnost izgaranja 90%, tj. da 10% goriva ostane neizgoreno. Za umjetne plastične mase, koje sa značajnim udjelom sudjeluju u masi modernih vozila i njihovih tereta, kao reprezentant je uzet PE, budući da je PE najčešća umjetna masa u uporabi i da su ogrjevne vrijednosti ostalih često korištenih umjetnih masa vrlo slične veličine.

Tablica 5.2. Izgorjela količina goriva $\dot{m}_f$ (kg/min) za neke *HRR*

Gorivo	**50 MW**	**100 MW**	**200 MW**	**400 MW**
Benzin	76,3	152,5	305,1	610,0
Polietilen	77,0	154,0	308,0	616,0
Drvo	200,8	401,6	803,2	1606,4

Jasno je da tvari s velikom ogrjevnom vrijednošću raspoloživi kisik troše s manjim utroškom vlastite mase. Nakon paljenja, proces izgaranja sam podržava transport mase iz kondenzirane faze[96] u zonu izgaranja. Bitan faktor pri tome je toplinsko zračenje (reradijacija) plamena i donekle okolnih vrućih površina natrag na vanjsku površinu kondenzirane faze (u tunelu). Kod izgaranja na otvorenom prostoru općenito je prihvaćeno da se oko 1/3 energije izgaranja u obliku toplinskog zračenje prenosi na okolinu u svim smjerovima [105, 106, 107]. Oko 12% energije stiže do površine goriva, od čega se tipično 40% ponovno zrači natrag u okoliš, pa za isparivanje i pirolizu[97] kondenzirane faze, kao procese endotermne prirode, na raspolaganju ostaje svega oko 7% energije izgaranja [37, 108]. Kod tekućih je goriva za to potreban manji udio energije, jer dobar dio tih goriva zahtijeva samo isparivanje (faznu promjenu), a ne i pirolizu. Ako su u pitanju lako zapaljive tekućine, energija zagrijavanja tekućine kroz njenu slobodnu površinu do točke vrenja i energija isparivanja (uplinjavanja) su male. Teška

[95] Površina poprečnog presjeka tunela Učka je 54 m^2, a tunela Tuhobić 56,5 m^2 (podaci dobiveni od službi zaštite BINA Istra i ARZ).
[96] Tekuća i kruta goriva normalno se u prirodi nalaze u „kondenziranoj“ fazi. Izgaranju plinovite faze većine goriva plamenom (teški tekući ugljikovodici, ugljen, drvo, plastične mase) prethodi piroliza goriva.
[97] Pirolizom (toplinskim raspadom goriva) se veće molekule raspadaju na manje molekule i nastaje pirolizat koji izgara.

mineralna ulja zahtijevaju više energije za zagrijavanje do (višeg) vrelišta i za isparivanje, a energija se troši i na pirolizu spojeva od kojih su sastavljena. Da bi krute (taljive) gorive tvari prešle u plinovito stanje, potrebno ih je najprije rastaliti, zatim zagrijati do vrelišta i na koncu tekućinu ispariti. Kod nekih dolazi i do kemijske dekompozicije, a neke se ne tale nego raspadaju pirolizom. Pritom su temperature dekompozicije odnosno pirolize obično više nego temperature vrenja. Ovisno o napretku dekompozicije, može biti potrebna i dodatna energija za daljnju dekompoziciju, sve dok se ne ispari čitav isparljivi udio izvorne kondenzirane gorive tvari, a što ovisi o sposobnosti te tvari za prelazak u plinovitu fazu. Nakon toga ostaje kondenzirani ostatak tvari koji ne gori plamenom, ali može izgarati tinjanjem (žarenjem) na kontaktnoj površini u interakciji s atmosferskim kisikom. Tinjajući ugarci su posebno prisutni kod tvari koje imaju visok sadržaj ugljika, no njihovo dogorijevanje u požaru tunela nema veliki značaj, jer je u pitanju relativno mali dio ukupne energije koji se sporo oslobađa.

Krute umjetne tvari (PE) i tekući benzin imaju gotovo jednaku toplinu izgaranja, pa je stoga i masena brzina trošenja goriva uz dovoljnu količinu kisika praktički jednaka za istu *HRR* žarišta. No karakteristike njihove kondenzirane faze značajno se međusobno razlikuju, ali isto se tako karakteristike drva značajno razlikuju od ovih dviju tvari. Kod tvari s malom ogrjevnom moći i s visokom energijom pirolize može se očekivati da će teško izgarati ako na njih ne djeluje neko dodatno toplinsko zračenje. Za razliku od toga, krute gorive tvari s velikom ogrjevnom moći i istom ili manjom energijom pirolize lako će podržavati vlastito izgaranja, dok kod požara zapaljivih tekućina to neće predstavljati nikakav problem.

Ovakvo razmišljanje može se potkrijepiti kroz teoretski prikaz procesa izgaranja.

Brzina izgaranja općenito je [37]:

$$\dot{m}''_f = \frac{\dot{Q}''_{tot} - \dot{Q}''_L}{L_v} \tag{5.5}$$

U slučaju kada ne postoji nezavisan toplinski tok,

$$\dot{Q}''_{tot} = \dot{Q}''_f$$

Brzina regresije goriva tada je:

$$R = 60 \cdot 10^3 \, \frac{\dot{Q}''_f - \dot{Q}''_L}{\rho L_v} \tag{5.6}$$

Brzina masene regresije pri izgaranju tekućih goriva na otvorenom u ovisnosti o veličini površine (lokve) može se odrediti iz relacije:

$$\dot{m}''_f = \dot{m}''_\infty \, (1 - \mathrm{e}^{-k\beta D}) = \frac{\rho \cdot R}{60 \cdot 10^3} (1 - \mathrm{e}^{-k\beta D}) \tag{5.7}$$

Pri tome su k i β dvije empiričke konstante, koje se normalno daju tablično kao produkt za pojedina tekuća goriva. Faktor veličine lokve, D, ima vrlo mali utjecaj na brzinu regresije goriva za lokve uobičajene veličine, pa je tako npr. brzina regresije za lokvu promjera 2 m

svega 1,5% manja od one za lokvu beskonačnog promjera. Brzina regresije za veliku lokvu benzina $\dot{m}''_{f\infty}$ iznosi 0,055 kg/m^{2}s, a slične je veličine i za druge tekuće ugljikovodike.

Za razliku od tekućih goriva, koja najčešće izgaraju u obliku horizontalne lokve, krute tvari mogu gorjeti tako da im je površina na kojoj izgaraju u bilo kojem položaju. Termoplastične umjetne mase (sintetički polimeri) normalno se u požaru tale i teku, poprimajući konačno oblik sličan horizontalnoj lokvi. Relacija (5.5) ponovno određuje bitne utjecajne faktore. Površinska temperatura gorućih krutih plastika biti će bitno viša nego površinska temperatura tekućina[98] (tipično > 350 ^{0}C), pa će i gubici topline zračenjem biti značajni. Toplina isparivanja krutih plastičnih masa mnogo je veća nego toplina isparivanja tekuće faze (L_v), budući da se energija troši na kemijsku dekompoziciju. Kao primjer se može navesti da je za istu tvar, polistiren, toplina stvaranja para L_v = 1,76 kJ/kg za kruti PS, dok je za tekući stiren monomer L_v = 0,64 kJ/kg [109]. Nadalje, kod tvari koje pri izgaranju stvaraju kruti ostatak (PVC, neke smole), na površini se formira sloj žara koji štiti gorivo što se nalazi ispod njega. To uzrokuje još više površinske temperature i mijenja proces izgaranja. Relacija (5.5) može se napisati i tako da se $\dot{Q}''_{tot}$ rastavi da dvije komponente: $\dot{Q}''_f$ toplinski tok reradijacije[99] plamena i na $\dot{Q}''_E$ toplinski tok iz vanjskih izvora:

$$\dot{m}''_f = \frac{\dot{Q}''_f + \dot{Q}''_E - \dot{Q}''_L}{L_v} \tag{5.8}$$

Iz ove je relacije očigledno da tvar kojoj je odlazni toplinski tok kroz goruću površinu (gubici, $\dot{Q}''_L$) veći od dolaznog toplinskog toka plamena (dobici, $\dot{Q}''_f$) neće gorjeti, osim ako je izložena dodatnom toplinskom toku iz nekih vanjskih izvora ($\dot{Q}''_E$), koji će barem pokriti negativnu razliku. Iz podataka (flammability parameters) za umjetne plastične mase, tekuća goriva i drvo koji su objavljeni za L_v, $\dot{Q}''_f$ i $\dot{Q}''_L$ [109] može se jasno vidjeti da postoje sintetičke plastične mase koje bez dodatne topline neće gorjeti (npr. vatrootporna fenolna smola, kruti polikarbonati itd.). Za ocjenu „potencijala izgaranja“ može poslužiti i omjer $\dot{Q}''_f / L_v$. Još je indikativniji omjer topline izgaranja i topline isparivanja (H_c / L_v), koji se kreće u rasponu od 2,96 (hrastovina), preko 5,14-30,02 (različite plastične mase), pa do 92,83 (heptan) [110]. Pri izgaranju krutih tvari treba voditi računa i o tome da će goruće površine često biti vertikalne ili kose. Pri takvom će izgaranju plamen „lizati“ površinu, te će zbog uzgona stalno dovlačiti svježi zrak na goruću površinu. U stvarnom požaru prisutno je međusobno zračenje između plamenova i gorućih površina, što ubrzava brzinu izgaranja i brzinu širenja požara. Pri izgaranju termoplastičnih masa, proces izgaranja zbiva se na horizontalnim i na nehorizontalnim površinama, što uzrokuje dodatnu žestinu požara.

Za razliku od sintetičkih polimera, drvo je nehomogeni materijal s anizotropnim osobinama. Stoga mnoge osobine drva ovise o smjeru u kojem se mjerenja rade, ali isto tako i od vrste drva koje izgara. Drvo je kompleksna mješavina prirodnih polimera velike molekularne mase, od kojih su najvažniji celuloza (≈ 50%), poluceluloza (≈ 25%) i lignin (≈ 25%) [111]. Goruće drvo ima površinsku temperaturu > 450 ^{0}C, a oko 15-25% mase ostaje u žarećem ostatku koji štitu masu drva ispod sebe (usporava izgaranje). Iz iskustva je opće poznato da debeli balvan drva neće gorjeti ako nema dodatnog dovođenja topline zračenjem ili konvekcijom iz drugog

[98] Površinska temperatura goruće tekućine je nešto malo manja nego njezino vrelište.
[99] Kod velikih gorućih površina, toplinsko zračenje čini dominantan udio u prijelazu topline.

izvora (npr. obližnjih gorućih površina). To je u skladu s mjerenjima koja su pokazala da su npr. za američku smreku[100] dobici topline od plamena teoretski upravo dovoljni da pokriju gubitke pri izgaranju $\dot{Q}''_f \approx \dot{Q}''_L$ [109]. Za brzinu izgaranja (regresije) drva u literaturi se navode dosta različiti podaci: 0,6 mm/min (BS 476, dio 8), ≈ 2 mm/min [109], ili pak $R = 2{,}2 \cdot 10^{-2} \cdot \dot{Q}_R$ mm/min, pri čemu je $\dot{Q}_R$ toplinsko zračenje u kW/m^2 [112]. Pri pojavi visokih temperatura u zatvorenom prostoru (npr. 1100 ^{0}C), odgovarajuće zračenje crnoga tijela dosiže 200 kW/m^2, što uvrštenjem u ovu relaciju rezultira brzinom izgaranja drva od čak R = 4,4 mm/min.

U tablici 5.3. prikazane su površine izgaranja benzina, PE i drva u tunelu za dosizanje *HRR* od 100 MW, kao i relativno povećanja površine izgaranja PE i drva u odnosu na benzin za istu *HRR*.

Tablica 5.3. Površine izgaranja u tunelu i požarni potencijal reprezentativnih goriva

Gorivo	**Ogrjevna moć (H_c), MJ/kg**	**Brzina izgaranja($\dot{m}''_f$), kg/m^{2}s**	**Toplinska snaga (Q"), MW/m^2**	**Površina izgaranja (A) za 100 MW, m^2**	**Relativna površina %, m^2/m^2**
Benzin	43,7	0,055 [38]	2,40	41,7	1
Polietilen	43,28	0,026 [108]	1,13	88,5	2,12
Drvo	16,6	0,02	0,332	301,2	7,22

Ovi rezultati vrlo jasno pokazuju požarni potencijal nekih odabranih goriva, jer je za dosizanje iste *HRR* potrebna površina izgaranja PE više od 2 puta veća od površine (lokve) benzina, dok je potrebna površina drva čak 7 puta veća. To znači da, ako se kao gorivo pojavljuje drvo (npr. palete kao teret), za dosizanje velike toplinske snage potrebno je da u požaru sudjeluje HGV s vrlo velikim teretom drva ili sličnog materijala[101], što ipak nije česti slučaj. Kod sintetičkih polimera, rizici su veći, a najveći su kod lako hlapljivih tekućih goriva.

U stvarnom požaru tekućeg i/ili krutog goriva, imajući u vidu da na raspolaganju stoji dovoljna količina kisika, *HRR* će biti određena distribucijom goriva u prostoru, ali i toplinskim zračenjem plamena i okolnih ugrijanih površina natrag na kondenziranu fazu. Proces izgaranja biti će određen vrstom goriva i brzinom oksidacije goriva, što znači da *HRR* signifikantno ovisi o vrsti goriva. Ako je poznato gorivo, bitan faktor toplinske snage izgaranja postaje odavanja para, što ovisi o veličini površine kondenzirane faze goriva koja je izložena toplinskom zračenju plamena i okolnih površina. Kod tekućeg goriva, površina goriva u kontaktu sa zrakom u pravilu je horizontalna (lokva), dok je kod trodimenzionalne kondenzirane faze površina reakcije određena površinom oplošja. Količina (masa) prisutnog goriva određuje pak ukupnu energiju koja se izgaranjem može osloboditi.

Rezultati mnogobrojnih ispitivanja za različite materijale daju brzine regresije goriva u kg/m^{2}min, u što su uključene brzine pirolize i izgaranja, pa je poznavanjem toplinske snage požara moguće približno odrediti površinu izgaranja. Ova pretpostavka naravno važi uz uvjet da poznato gorivo tijekom čitavog vremena izgara u približno jednakim uvjetima.

[100] Douglas fir.

[101] To drvo ili sličan materijal mora biti tako raspoređeno da ima veliku slobodnu površinu na kojoj će izgarati i da prostor između njegovih sastavnih dijelova dozvoljava dostatno snabdijevanje zrakom za izgaranje.

Ispitivanja u Runehamaru 2003. godine pokazala su da se i pri požaru krutih goriva u tunelu (drvo i sintetički polimeri) mogu razviti toplinske snage do 200 MW, iako se dotad uglavnom smatralo da će se *HRR* ove veličine razviti jedino pri požaru auto-cisterne s tekućim ugljikovodicima. Pri nekim od tih ispitivanja uočena je pojava nestabilnosti izgaranja, što upućuje na zaključak da je pri izgaranju vjerojatno došlo do pojave podventiliranosti, tj. da je omjer količine goriva i zraka, barem lokalno, padao ispod stehiometrijskoga ($\lambda < 1$). U četiri izvedena eksperimenta, pri kojima je *HRR* varirala od 67 do 202 MW, uočeno je da do pulsacija plamena dolazi jedino pri *HRR* > 130 MW, tijekom eksperimenata T1 i T2. Pulsacije su bile periodičke, pojavile su se na nizvjetrenoj strani od požara, a pritom su zabilježene uzdužne brzine strujanja plinova bile između 1 m/s i 5 m/s. Amplituda pulsacija mijenjala se u skladu s promjenama *HRR*, tj. veličina pulsacija se povećavala s povećanjem *HRR* [114]. Koncentracije O_2, CO i CO_2 na mjernoj stanici oko 460 m nizvjetreno od mjesta požara, upućivale su na zaključak da gorenje nije podventilirano. Ipak, time nije isključena mogućnost za uspostavu lokalnih podventiliranih zona u požaru. Visoke temperature plinova u odlaznoj struji plinova pružile su naime mogućnost da je do oksidacije CO došlo naknadno, a ne u samom požaru [114]. Uočavanje ove pojave u stvarnoj situaciji znači da pulsacije odlaznih plinova, koje se pri intervenciji vatrogasaca mogu uočiti kao gibanje dima naprijed-natrag, upućuju na dodatni rizik naknadnog paljenja dimnih plinova. Slična pojava dobro je poznata pri vatrogasnim intervencijama na normalnim zgradama[102], ali i na otvorenom.

5.1.2 Razvoj požara u tunelu

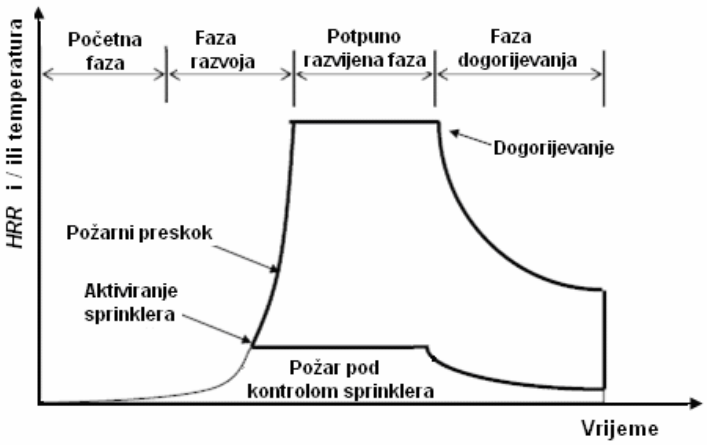
Općenito je prihvaćena tvrdnja da je u ranim fazama tunelskih požara uvijek na raspolaganju dovoljna količina kisika. To znači da se prisutno gorivo u reakciji izgaranja gotovo u cijelosti transformira u plinovitu fazu, da se oslobađa cjelokupna raspoloživa toplinska energija i da maksimalne temperature izgaranja nastaju u zoni izgaranja. Budući da je udaljenost između stropa tunela i goruće tvari relativno mala, plamenovi u središtu požara vrlo brzo dosižu do stropa. Toplinska energija tada prelazi na građevinu ili se putem dimnih plinova transportira u smjeru toka zraka. I energija prenesena na strop i energija vrućih plinova uzrokuju toplinsko zračenje natrag na goruću tvar, što ubrzava zagrijavanje kondenzirane faze i pridonosi bržem razvoju požara. Pojava ubrzanog razvoja dobro ventiliranih požara u malim zatvorenim prostorima poznata je i u teoriji i u vatrogastvu. Brzina izgaranja ovdje nije upitna jer na raspolaganju ima dovoljno kisika, ali je važno odrediti brzinu pirolize, jer ona određuje maseni protok plinovite faze iz kondenzirane faze u zonu izgaranja. Kao što je već istaknuto, ovaj maseni protok bitno ovisi o toplinskom zračenju plamenova i ploha koje okružuju gorivu tvar. Za opisivanje izgaranja različitih goriva u zatvorenim prostorima već niz godina postoje standardne temperaturne krivulje[103] koje određuju ovisnost temperature o vremenu izgaranja dobivene na temelju ispitivanja reprezentativnih goriva. Oblik tih krivulja ovisan je o gorivu i o okolišu u kojem ono izgara. Načelno i u općem slučaju, razvoj požara u zatvorenom prostoru može se podijeliti na sljedeće faze:

- Inicijalnu fazu – koja bitno ovisi o vrsti goriva, njegovom obliku i rasporedu masa, izvoru paljenja itd., a požar započinje ili tinjanjem ili izgaranjem plamenom.

[102] Ovu pojavu vatrogasci nazivaju backdraft. Prema [50, 115], backdraft je vrlo brzo izgaranje plamenom uzrokovano naglim uvođenjem zraka u zatvoreni prostor u kojem je prisutan manjak kisika, a taj prostor sadrži vruće produkte nepotpunog izgaranja. U nekim slučajevima ovi uvjeti mogu dovesti do eksplozije. Primjer za nastup backdrafta je slučaj razbijanje prozora ili otvaranje vrata toga prostora. Backdraft predstavlja ozbiljnu opasnost za vatrogasce.

[103] Projektna požarna krivulja pokazuje ovisnost temperature (i intenziteta požara, *HRR*) u funkciji vremena.

- Fazu razvoja – koja obuhvaća širenje gorenja do trenutka razbuktavanja požara (flashover[104]), odnosno do nastupa razvijenog požara.
- Potpuno razvijenu fazu – čija značajka je približno konstantna brzina izgaranja i toplinska snaga požara, što se može događati pri potpunom izgaranju[105] ili pri nepotpunom izgaranju[106].
- Fazu dogorijevanja – koja obuhvaća period opadajuće žestine požara.
- Fazu gašenja – kada prestaje oslobađanje topline zbog nestanka goriva.



Slika 5.1. Shematski prikaz faza razvoja požara[107] [117]

Do danas su razvijene projektne krivulje požara za gotovo sve građevine i situacije kao i brzine rasta požara. Prema NFPA 204 [118], brzine porasta požara razdijeljene su u 4 kategorije (tablica 5.4).

Tablica 5.4. Vrijednosti koeficijenta rasta požara ($\alpha_{g,q}$) [118]

Brzina rasta	**Koef. rasta požara ($\alpha_{g,q}$)**	**Vrijeme (s) do Q = 1000 kW**
	kW/s^2	s
Ultra brza (UF)	0,178	75
Brza (F)	0,0444	150
Srednja (M)	0,0111	300
Spora (S)	0,00278	600

Budući da su tuneli ipak specifični objekti, za procjenu požarnih rizika u tunelima bitno je odrediti tzv. „projektnu krivulju požara“. Ta se krivulja matematički može izraziti na različite načine. Rast i razvoj požara u ovisnosti o vremenu može se načelno aproksimirati linearnom

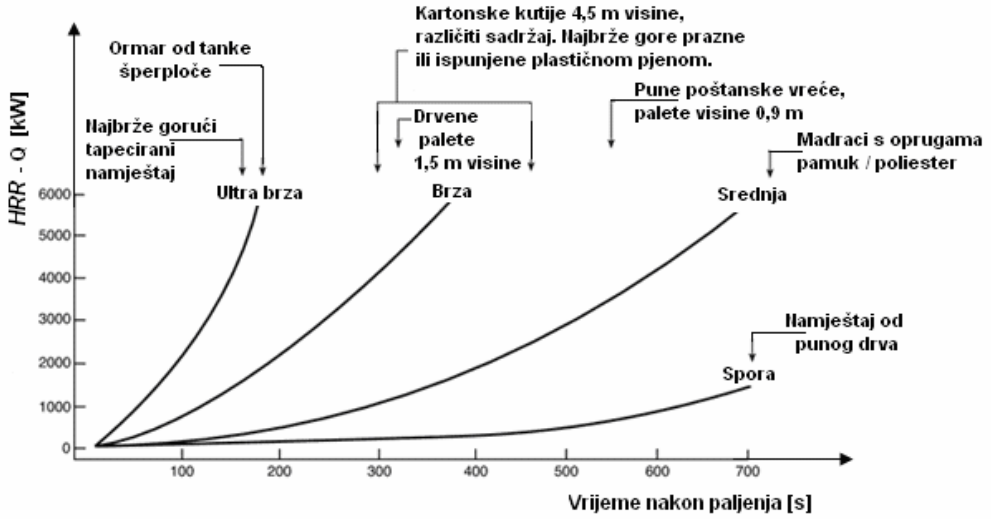
[104] Prema [115], flashover je prijelaz požara u fazu gdje su površine gorivih tvari potpuno zahvaćene gorenjem u nekom zatvorenom prostoru. Prema [116] flashover je faza razvoja požara u zatvorenom prostoru pri kojoj sve izložene površine dosižu temperaturu (samo)zapaljenja više ili manje istodobno, pa se požar naglo širi kroz taj prostor. Flashover normalno nastupa pri temperaturi plinova od oko 600 ^{0}C i pri toplinskom toku od oko 20 kW/m^2 u razini poda.

[105] Potpuno izgaranje se često naziva „fuel controlled fire“. Faktor pretička zraka $\lambda > 1$, pa količina i raspored goriva određuju *HRR*..

[106] Nepotpuno izgaranje se često naziva „ventilation controlled fire“. Faktor pretička zraka $\lambda < 1$, pa količina zraka određuje *HRR*..

[107] Na slici je prikazan razvoj požara bez sprinklera i sa sprinklerom (ili sličnim sustavom za gašenje, npr. vodenom maglom) koji kontrolira/supresira požar. Ako sprinkler ili neki drugi FFFS ugase požar, temperatura i *HRR* će pasti na nulu.

ovisnošću ($HRR = f(t)$), kvadratnom ovisnošću ($HRR = f(t^2)$) ili pak eksponencijalnom ovisnošću ($HRR = f(1 - e^{-t})$)[108]. Ove funkcije rasta mogu se povezati s vršnom *HRR* vrijednošću (Q_{max}) i s funkcijom dogorijevanja, uzimajući njenu ovisnost o vremenu kao linearnu ili kao eksponencijalnu (proporcionalnost s $-t$ ili e^{-t}). Za razliku od požarnog projektiranja zgrada, gdje se obično razmatra samo krivulja rasta požara, kod tunela je važna čitava krivulja njegovog razvoja.



Slika 5.2. Oslobađanje toplinske energije kod različitih brzina rasta požara prema NFPA [118]

U skladu s ovim mogućnostima, vremenski tijek *HRR* pri zaštiti tunela od požara može se prema Ingason [120] opisati na više načina i to kao:

- **Linearni rast:** Francuske preporuke za požarnu ventilaciju [121] tunela daju linearni rast požara u periodu 0 do t_{max}, zatim konstantnu maksimalnu *HRR* do trenutka t_D i konačno linearni pad od maksimalne vrijednosti do nule (trenutak t_d)[109].
- **Kvadratni rast:** Za požare različitih vrsta vozila, Ingason [55] je predložio kvadratni rast krivulje požara (*HRR*) od trenutka 0 do t_{max}, zatim konstantnu maksimalnu *HRR* do trenutka t_D i konačno eksponencijalni pad *HRR* od maksimalne vrijednosti do nule u beskonačnom vremenu.
- **Eksponencijalni rast – nepotpuno izgaranje:** Ingason [122, 123] je predložio aproksimaciju krivulje *HRR* u vidu jedinstvene eksponencijalne vremenske funkcije (umjesto 3 funkcije), počevši od trenutka početka razvoja požara pa do potpunog dogorijevanja. Ovaj pristup bazira se na radu Numajiri i Furukawa [124] i primjenjiv je jedino za nepotpuno izgaranje. Osim vršne *HRR* (Q_{max}) i ukupno razvijene topline E_{tot}, pojavljuje se parametar n bez fizikalnog značenja, te parametri r i k, temeljem kojih se izračunavaju t_{max} i t_d. β_d je omjer između energije oslobođene do trenutka t_d ($E_{tot,td}$) i ukupne energije oslobođene u požaru (E_{tot}) i može se po volji odabrati između 0,97-0,99.
- **Eksponencijalni rast – potpuno izgaranje:** Ingason [123] je razvio krivulju požara s konstantnim središnjim periodom zbrajajući dvije eksponencijalne krivulje s primjenom samo za nedvojbeno potpuno izgaranje.

Izrazi koji opisuju *HRR* na različite načine navedeni su u tablici 5.5.

[108] Heskestad [124] je predložio da se faza razvoja požara aproksimira izrazom $HRR = Q = \alpha t^n$.
[109] Koeficijenti linearnog rasta ($\alpha_{g,L}$) i pada ($\alpha_{D,L}$) požara izračunati su iz podataka u francuskim preporukama.

Tablica 5.5. Izrazi koji opisuju cijelu projektnu krivulju HRR za tunele [115]

Metoda	HRR kao funkcija od t, s	Vremenski Interval, s	Vrijeme do HRR_{max}, s	Vrijeme do početka dogorijevanja t_D i/ ili trajanja požara t_d, s	Ostali uvjeti
Linearni rast [116]	$HRR = \alpha_{g,L} \cdot t$	$0 \le t_{max}$	$t_{max} = \frac{Q_{max}}{\alpha_{g,L}}$	$t_D = t_d - \sqrt{\frac{2}{\alpha_{D,L}}\left(\frac{\alpha_{g,L}}{2} t_{max}^2 + Q_{max}(t_d - t_{max}) - E_{tot}\right)}$	
	$HRR = \alpha_{g,L} \cdot t_{max} = Q_{max}$	$t_{max} < t \le t_D$			
	$HRR = Q_{max} - \alpha_{D,L}(t - t_D)$	$t_D < t < t_d$			
Kvadratni rast [55]	$HRR = \alpha_{g,q} \cdot t^2$	$0 \le t_{max}$	$t_{max} = \sqrt{\frac{Q_{max}}{\alpha_{g,q}}}$	$t_D = \frac{\chi \cdot E_{tot}}{Q_{max}} + \frac{2}{3} t_{max} - \frac{1}{\alpha_{D,q}}$	Ako je $t_D \le t_{max}$ nema konstantnog perioda, pa je $Q_{max} \approx \chi \alpha_{D,q} E_{tot} \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{D,q}^{3/2}}{6}\sqrt{\frac{\chi \cdot E_{tot}}{\alpha_{g,q}}}\right)^2$ i $t_{max} = \sqrt{\frac{Q_{max}}{\alpha_{g,q}}} = t_D$
	$HRR = \alpha_{g,q} \cdot t_{max}^2 = Q_{max}$	$t_{max} < t < t_D$			
	$HRR = Q_{max}\, e^{-\alpha_{D,q}(t - t_D)}$	$t \ge t_D$			
Eksponencijalni rast, potpuno izgaranje [117, 118]	$HRR = Q_{max} \cdot n \cdot r \cdot (1 - e^{-k \cdot t})^{n-1} \cdot e^{-k \cdot t}$	$t \ge 0$	$t_{max} = \frac{\ln n}{k}$	$t_d = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{1}{1 - \beta_d^{1/n}}\right)$	$r = \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{1-n}$ $k = \frac{Q_{max}}{E_{tot}} \cdot r$
Eksponencijalni rast, nepotpuno izgaranje [118]	$HRR = Q_{max} \cdot \left[18{,}96 \cdot e^{-10 t/t_d} \cdot \left(1 - e^{-10 t/t_d}\right)^7 + 37{,}59 \cdot e^{-7 t/t_d}\left(e^{-7 t/t_d} - 1\right)^{20}\right]$	$t \ge 0$	$t_{max} = 0{,}24 \cdot t_d$	$t_d = 2{,}03 \cdot \frac{E_{tot}}{Q_{max}}$	

U tablici 5.6 dati su dodatni podaci bazirani na korištenju francuske projektne krivulje, pri čemu su koeficijent linearnog rasta požara ($\alpha_{g,L}$) i linearni koeficijent dogorijevanja ($\alpha_{D,L}$) izračunati iz izvornih podataka zbog prilagođavanju parametrima iz tablice 5.5.

Tablica 5.6. Dodatni podaci na bazi francuskih propisa [125, 121]

Vrsta vozila	E_{tot}[110], GJ	Q_{max}, MW	t_{max}, min.	t_D, min.	t_d, min.	$\alpha_{g,L}$, MW/min	$\alpha_{D,L}$, MW/min	Količina dima, m^3/s
2-3 automobila (slobodna visina tunela < 2,7 m)	17	8	5	25	45	1,6	0,4	30
1 furgon natovaren (slobodna visina tunela 2,7-3,5 m)	38	15	5	35	55	3	0,75	50
1 HGV (slobodna visina tunela >3,5 m), bez opasnih tvari	144	30	10	70	100	3	1	80
1 HGV (slobodna visina tunela >3,5 m), s velikim sadržajem topline	450	100	10	70	90	10	5	?
1 autocisterna (slobodna visina tunela >3,5 m), opasne tvari	960	200	10	70	100	20	6,7	300[111]

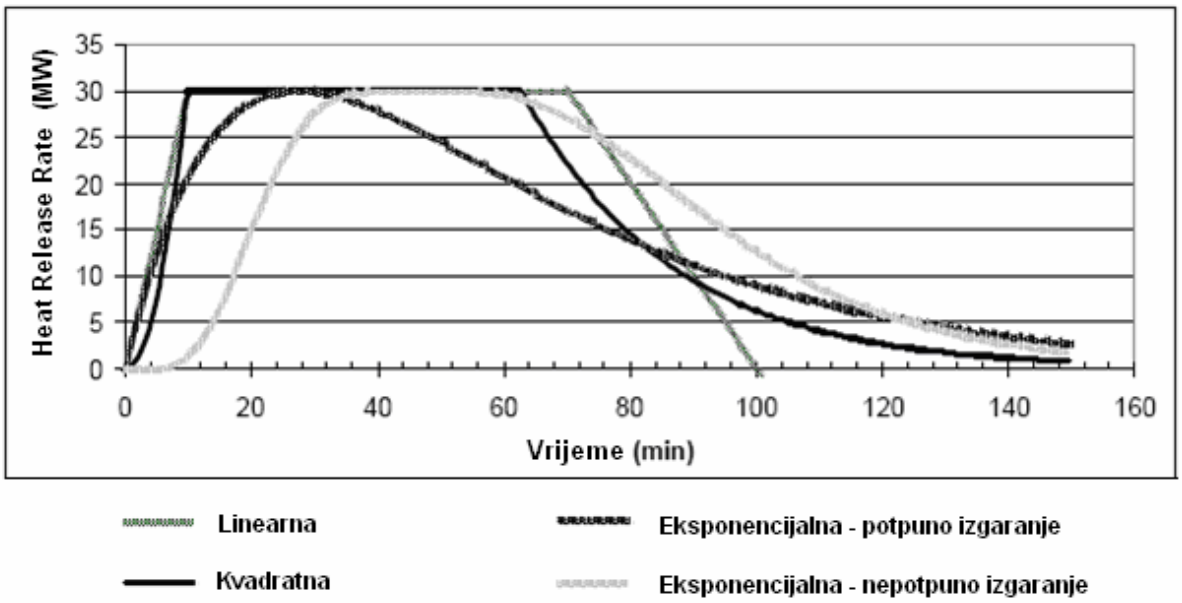
Ingason [55] je predložio da se za projektiranje koriste parametri po kvadratnoj metodi (tablica 5.7), s time da se numerički podaci korigiraju temeljem naknadnih eksperimenata. Pritom nije uzet u obzir mogući preskok požara među vozilima, kao niti mogući utjecaj nepotpunog izgaranja na rast *HRR*. Podaci u tablici 5.7 izračunati iz izvornih podataka zbog prilagođavanju parametrima iz tablice 5.5.

Tablica 5.7. Predloženi parametri za odabir projektnog požara u tunelu [55]

Vrsta vozila	Q_{max}, MW	$\alpha_{g,q}$, MW/min^2	$\alpha_{D,q}$, MW/min^2
Automobil	4	0,036	0,06
Autobus	30	0,36	0,042
HGV[112]	15-130	-	-

Za usporedni prikaz uporabe različitih relacija iz tablice 5.5, odabran je kao primjer HGV bez opasnih tvari iz tablice 5.6, što je prikazano na slici 5.3. Za izračun svih krivulja korišteni su podaci: E_{tot} = 144 GJ i vršni Q_{max} = 30 MW. Ostali podaci bili su: linearni t_d = 100 min, $\alpha_{g,L}$ = 3 MW/min, $\alpha_{D,L}$ = 1 MW/min; kvadratni: $\alpha_{g,q}$ = 0,3 MW/min^2, $\alpha_{D,q}$ = 0,042 MW/min^2; eksponencijalni: n = 2, β_d = 0,99. Površina pod svim krivuljama (E_{tot}) je jednaka. Neovisno o ostalim razmatranjima, može se zaključiti da eksponencijalna krivulja (bez lomova) daje najrealističniji prikaz stvarne snage požara.

[110] E_{tot} za prva tri reda modificirana je tako da odgovara relaciji u Tablici 5.5.
[111] U Francuskoj se ova količina dima općenito ne uzima u obzir za projektiranje (polu-) poprečne ventilacije čak i ako je dozvoljen promet opasnim tvarima.
[112] Zbog vrlo širokog raspona tereta HGV, Q_{max}, $\alpha_{g,q}$ i $\alpha_{D,q}$ nisu mogli biti određeni



Slika 5.3. Prikaz krivulja za aproksimaciju promjene *HRR* s protekom vremena [120]

Činjenica da je koeficijent rasta požara $\alpha_{g,q}$ visok prilikom požara zapaljivih tekućina (B-klasa požara) opće je poznata. Općenito je također smatra dokazanim da koeficijent rasta požara može biti relativno visok i pri izgaranju gorivih krutih tvari (A-klasa požara), kao što je to utvrđeno pri eksperimentima u tunelu Runehamar [64]. Vrijeme do vršne *HRR* kretalo se u rasponu od 8 do 18,5 minuta od paljenja. Rast brzine požara u rasponu od 5 do 100 MW (u T4 do 70 MW) bio je linearan u svim testovima. Laboratorijski testovi izvedeni prethodno zbog procjene vršne *HRR* u stvarnim testovima pokazali su dobru preciznost i bez velikih su odstupanja predvidjeli konačne rezultate. Ipak, u daljnjem tekstu dokazuje se da su uvjeti eksperimenta u tunelu Runehamar bili postavljeni tako, da zaključci o brzini raste vjerojatno nisu reprezentativni za većinu požara A-klase u tunelu, tj. da su pokazali prebrzi razvoj požara za tipični požar A-klase.

Tablica 5.8. Vršne *HRR* i brzina rasta požara u testovima Runehamar [64]

Test	**Vrijeme od paljenja do vršne *HRR*, s**	**Koef. linearnog rasta požara $\alpha_{g,L}$ (linearni regresijski koeficijent), kW/s**	**Vršna HRR_{max}, MW**	**Procjena HRR_{max} iz laboratorijskih testova bez ciljnog objekta (sa ciljnim objektom), MW**
T1	1110	342 (0,997)	203 (prosjek)	186 (217)
T2	858	483 (0,991)	158 (prosjek)	167 (195)
T3	624	283 (0,998)	124,9	-
T4	462	295[113] (0,996)	70,5	79 (95)

Za procjenu utjecaja požara na tunel i na osobe u njemu koristi se nekoliko standardnih krivulja požarnih temperatura prikazanih na slici 5.4.

1- ISO temperaturna krivulja (tzv. celulozna krivulja ili jedinstvena krivulja temperatura-vrijeme, ETK[114]). Služi za standardne požarne testove kojima se ispituju uzorci materijala i građevinskih konstrukcija. Definira je ISO [126] i prihvaćena je u mnogim

[113] Od 5 MW do 70 MW.
[114] ETK, Einheitstemperaturzeitkurve.

nacionalnim normama (BS 476:dio 20, DIN 4102, AS 1530 itd.). Bazira se na brzini izgaranja uobičajenih građevnih materijala zgrada i njihovog sadržaja (npr. drva). Od svih krivulja koje se koriste za tunele ima najblaže zahtjeve.

Opisuje se izrazom: $\vartheta = 20 + 345 \log(8t + 1)$[115]* (5.9)

2- HC (Hydrocarbon) temperaturna krivulja koristi se tamo gdje su brzine izgaranja tvari i porast temperature znatno veći od onih koje opisuje celulozna krivulja. To je slučaj pri požarima nafte i derivata te kemikalija u petrokemijskoj industriji, gdje su građevine i materijali izloženi znatno bržem rastu požara i višim temperaturama nego što je to npr. slučaj kod požara drva. Ovamo pripadaju i požari goriva iz rezervoara automobila, autocisterni i nekih sintetičkih polimera.

Opisuje se izrazom: $\vartheta = 20 + 1080(1 - 0{,}325\, e^{-0{,}167t} - 0{,}675\, e^{-2{,}5t})$* (5.10)

2b- HCM (Hydrocarbon Modified) krivulja izvedena je iz gore spomenute HC krivulje u skladu s francuskim propisima, tako da maksimalna temperatura ove krivulje iznosi 1300 ^{0}C umjesto 1100 ^{0}C kao kod HC krivulje. Porast temperature u prvih je nekoliko minuta požara jednako tako oštar kao kod svih krivulja baziranih na ugljikovodicima (RWS, HCM, HC), što može stvoriti toplinski udar na betonsku konstrukciju s ljuštenjem betona kao posljedicom.

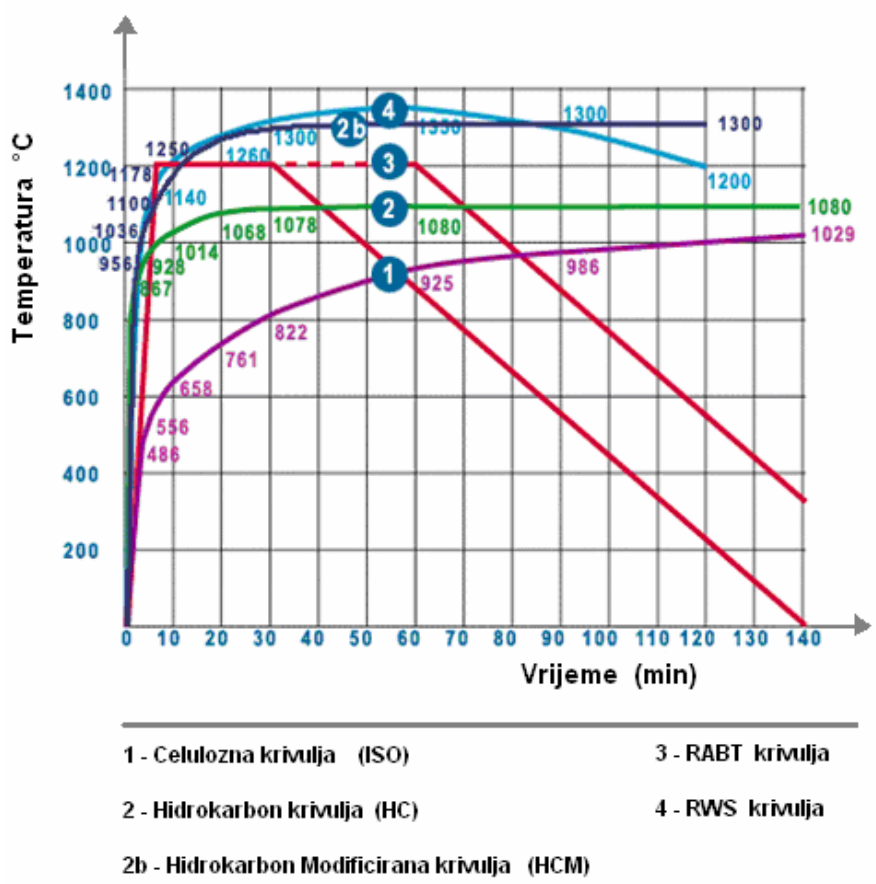
Opisuje se izrazom: $\vartheta = 20 + 1280\,(1 - 0{,}325\, e^{-0{,}167t} - 0{,}675\, e^{-2{,}5t})$* (5.11)

3- RABT-ZTV krivulja razvijena je u Njemačkoj kao rezultat serija testova, uključujući projekt EUREKA. Rast temperature pri razvoju požara je vrlo brz i dosiže 1200 ^{0}C unutar 5 minuta. Trajanje konstantne maksimalne temperature od 1200 ^{0}C je kraće nego kod ostalih krivulja i završava 30 minuta po paljenju požara (za cestovna vozila), odnosno 60 minuta (za željeznička vozila). Period hlađenja je u oba slučaja 110 minuta.
Ovaj test traži da temperatura armature ne prijeđe 300 ^{0}C.

4- RWS krivulju je razvilo Rijkswaterstaat, nizozemsko Ministarstvo transporta, temeljem rezultata testiranja koje je TNO[116] izveo 1979. u Nizozemskoj. Bazira se na pretpostavci najgoreg mogućeg slučaja: požar autocisterne s 50 m^3 benzina ili loživog ulja, toplinske snage 300 MW u trajanju od 120 minuta. Testovi u Runehamaru potvrdili su ispravnost RWS krivulje i u slučaju slobodnog izgaranja HGV s teškim teretom klase A.
Ovaj test traži da površinska temperatura betona ne prijeđe 380 ^{0}C i da temperatura armature ne prijeđe 250 ^{0}C. Osim Nizozemske, RWS krivulju koriste i neke druge zemlje, napose ako se u tunelu predviđa promet opasnih tvari.

Iz svih se prezentiranih krivulja (osim ISO krivulje) može vidjeti da se temperature od 1000 ^{0}C dosižu tijekom prvih 10 minuta razvoja požara. To znači da se u većini slučajeva može očekivati vrlo brz razvoj požara, odnosno da faza potpuno razvijenog požara nastupa unutar 5 - 10 minuta po paljenju. Isto potvrđuju Rhodes i sur. [127], navodeći da

[115]* U svim izrazima za izračun temperature na požarnoj krivulji vrijeme *t* se uvrštava u minutama.
[116] TNO je nezavisna nizozemska organizacija s 4300 zaposlenih koja se bavi primijenjenim istraživanjima.



Slika 5.4. Standardne projektne požarne krivulje za tunele [128]

intervencija vatrogasaca mora započeti najkasnije 10 minuta po izbijanju požara, jer je požar potpuno razvijen kroz 5-10 minuta. Ovako brzu intervenciju nije lako postići u praksi[117], posebno ako djelujući profesionalni vatrogasci nisu smješteni neposredno uz portale tunela.

Ingason [120] je povezao različite projektne požarne krivulje s primjerima požarnih scenarija, da bi se ostvarene temperature što bolje slagale s pojedinim krivuljama (tablica 5.9). Vidljivo je da se rast temperature pri požaru malih vozila znatno razlikuje od onog gdje u požaru sudjeluje velika masa goriva.

Pri razmatranju sigurnosti ljudi u procjeni rizika uzimaju se u obzir svi scenariji, od 5 MW pa do stvarno predvidivog projektnog požara, dok se pri razmatranju požarne otpornosti građevine koristi krivulja temperature projektnog požara. Kao što je već prije navedeno, preporučene brzine linearnog rasta požara su:

- Za vršni *HRR* požara ≤ 30 MW, $\alpha_{g,L}$ = 10 MW/min
- Za vršni *HRR* požara > 30 MW, $\alpha_{g,L}$ = 20 MW/min

Trajanje požara se određuje prema količini prisutne gorive tvari (E_{tot}), uzimajući u obzir 100% izgaranje uz 80% učinkovitost izgaranja.

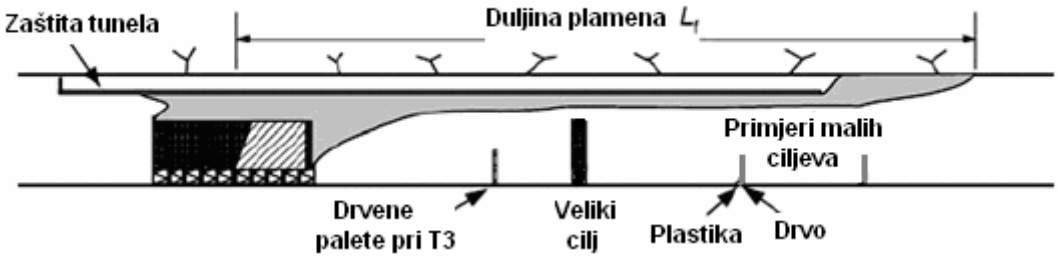
[117] Za usporedbu, pri požaru aviona intervencija vatrogasaca treba započeti unutar 60 sekundi po izbijanju, tzv. „golden 60 seconds“.

Tablica 5.9. Primjeri požarnih scenarija i njihova veza s krivuljama rasta temperature [120]

***HRR* (MW)**			**Primjer cestovnog vozila**	**Primjer željezničkog vozila**	**Primjer metro vozila**	**Krivulja temperature**
Rizik za život ljudi		5	1-2 osobna vozila			[126]
		10	2-3 osobna vozila, mali furgon	Električna lokomotiva	Putnički vagon (niska zapaljivost)	[126]
		20	Veliki furgon, javni autobus, nekoliko vozila		Putnički vagon (normalna zapaljivost)	[126]
		30	Autobus, prazan HGV	Putnički vagon	2 vagona	[126]
	Rizik za građevinu	50	Kamion s gorivim teretom	Otvoreni vagon s kamionima	Više od 2 vagona	[126]
		70	HGV, gorivi teret (oko 4 t)			HC
		100	HGV prosječni			HC
		150	HGV, lako zapaljivi teret (10 t)			RWS
		>200	Autocisterna, nekoliko HGV, djelomice nepotpuno izgaranje	Djelomice nepotpuno izgaranje		RWS

5.1.3 Prijenos (širenje) požara

Do sada je bio razmatran jedino razvoj požara na homogenoj strukturi i obliku gorive tvari, što odgovara razvoju požara po površini i strukturi vozila, njegovog tereta ili oslobođenog tereta (npr. lokva gorive tekućine). Ako se u tunelu tijekom požara zatekne više stacionarnih vozila, rizik prijenosa požara s vozila na vozilo postaje realna mogućnost.



Slika 5.5. Razmještaj goriva i ciljnih objekata u testu prijenosa požara u tunelu Runehamar[129]

Pri eksperimentima u tunelu Runehamar [129] ispitivan je i prijenos požara na „ciljne objekte“ na nizvjetrenoj strani od glavnog požara. U tu su svrhu postavljeni različiti ciljni objekti na nekoliko pozicija. Slika 5.5. daje načelni prikaz toga eksperimenta. Budući da su 4 izvedena eksperimenta bila međusobno različita, da su ciljni objekti također bili međusobno različiti i da su se udaljenosti ciljnih objekata od glavnog požara mijenjale, nisu moguće

direktne usporedbe rezultata prikazanih u tablici 5.10. Ipak, dokazano je da dugi plamenovi, odnosno konvekcijske perjanice dimnih plinova, sadrže dovoljno energije na dovoljno visokoj temperaturi da ispolje signifikantan utjecaj na gorivo ciljnog objekta, tj. da ga upale, pirolitički razgrade, pougljene ili deformiraju na udaljenostima od oko 50 m od centra žarišta.

Tablica 5.10. Utjecaj dimnih plinova na prijenos požara na ciljni objekt u tunelu Runehamar [129]

Udaljenost od centra žarišta, m	**Test T1**	**Test T2**		**Test T3**		**Test T4**	
	Plastike	Drvo	Plastike	Drvo	Plastike	Drvo	Plastike
20						+ + +	+
25						+ + +	+
27						+	+
35		+	+				
42				+	+	*	+
50		+	+				
52				+++	+		
53,5	+						
57						*	+
62				+++			
67						*	□
70		++	+				

Legenda: + Nestalo + + Čađa + + + Pougljenjeno □ Deformirano * Neoštećeno

Carvel i sur. [13] istaknuli su da je u mnogim tunelskim požarima sudjelovalo po nekoliko vozila i u priloženoj tablici naveli 19 požara u periodu između 1978 - 2004. godine u kojima je sudjelovalo više vozila i gdje je istodobno bilo smrtnih žrtava[118]. Iz tih se podataka može zaključiti da se pri potpuno razvijenom požaru u većini slučajeva može očekivati prijenos požara na ostala vozila koja se nalaze u nizvjetrenoj struji dimnih plinova, posebno ako u požaru izgara HGV.

Na temelju procjene požara auto-vlaka u Eurotunelu između Francuske i Velike Britanije godine 1996., Liew i sur. [130] te Rew i Deaves [131] su utvrdili da su uzroci koji doprinose vjerojatnosti prijenosa požara na vozila na nizvjetrenoj strani, a koje su Carvel i sur., [13] djelomice korigirali, sljedeći:

- razvoj požara,
- širenje dimenzija požara,
- samozapaljenja (razbuktavanje, analogno flashoveru u zatvorenim prostorima),
- prijenos gorenja na daljinu, što uključuje prijenos putem isteklih gorućih tekućina i letećih ugaraka,
- eksplozija.

Korištenjem nekoliko varijanti modela Fire-Sprint, Carvel i sur. [13] istražili su razvoj požara i samozapaljenje te utvrdili da je s povećanom brzinom uzdužnog strujanja zraka za zapaljenje na nizvjetrenoj strani potrebna povećana snaga požara.

Analizom testova izvedenih u tunelu Memorial pored Charlestona, dobivene su duljine plamena u tunelskim požarima [59]. Kao granični kriterij plamena usvojena je temperatura

[118] Svih 19 požara iz ref. [13] uključeno je u tablicu 1.1.

plinova od 600 ^{0}C na visini od 4 m. Kroz seriju različitih testova određene su duljine plamena i vjerojatnosti paljenja gorivih tvari u tunelima, te je za toplinsku snagu > 128 MW ustanovljeno da u svim tunelima može generirati plamenove koji mogu upaliti kamion na udaljenosti do 20 m. Požar snage između 64 i 128 MW također je u mogućnosti upaliti udaljene gorive tvari, ali je u tunelima s dvije vozne trake prijenos požara manje vjerojatan na udaljenost veću od 10 m. U slučaju požara snage 32 do 64 MW, učinci plamena su dosta različiti i u tunelima s dvije trake vjerojatnost zapaljenja na udaljenosti većoj od 10 m je mala, dok je u tunelu s jednom trakom ona relativno visoka, posebno pri većim brzinama strujanja zraka. Pri požaru snage od 16 do 32 MW, vjerojatnost zapaljenja je mala, osim u slučaju male međusobne udaljenosti vozila, ili kod veće brzine strujanja zraka u tunelu s jednom trakom. Ipak, zbog stohastičke prirode fenomena, prijenos požara na druga vozila pri akcidentu s gore spomenutim snagama požara nije nikada moguće posve isključiti.

Osim širenja i prijenosa požara konvekcijom putem dimnih plinova i zračenjem topline, ozbiljan rizik za prijenos požara je istjecanja zapaljivih tekućina na kolnik, jer će se lokva prirodno uvijek širiti u smjeru nagiba, tj. prema mjestima s nižom geodetskom visinom. Jedno od mogućih, zasad nerealiziranih rješenja, je primjena „poroznog“ ili permeabilnog gazećeg sloja asfalta ili sličnog materijala. Prema rezultatima ispitivanja Van Vliet i sur. [132], primjenom apsorbirajućeg gazećeg sloja moguće je *HRR* smanjiti za faktor 5 pa i više. Pritom bi trebalo riješiti i niz drugih problema, kao što su mehanička stabilnost i trajnost takvoga sloja, ali također ustanoviti koliku količinu tekućine ovakav sloj može apsorbirati prije nego što se zasiti.

5.1.4 Utjecaj različitih načina ventilacija

Ventilacija tunela pri današnjem je stanju tehnike vjerojatno najvažniji način aktivnog utjecanja na efekte opasnih događaja koji se odnosi na cjelokupnu građevinu, a dinamika i količina proizvedenog dima najvažniji je parametar za projektiranje požarne ventilacije. Načelno gledano, ventilacija tunela može biti prirodna, bez uporabe ventilatora, ili prisilna (mehanička), s uporabom ventilatora. Vozila koja se gibaju induciraju strujanje zraka u smjeru vlastitog gibanja, a stojeća vozila i vozila koja se gibaju u suprotnom smjeru, koče takvo strujanje. Razlika tlakova zraka između oba portala (ulaznog i izlaznog) pospješuje ili koči strujanje. Faktori koji određuju vremenski promjenjivu brzinu zraka u tunelu su prema Modic [133] sljedeći:

- razlika tlakova zraka između dvaju portala (meteorološki uvjeti),
- broj i smjer vožnje gibajućih vozila u tunelu,
- broj stojećih vozila u tunelu,
- aerodinamičke karakteristike vozila,
- struktura prometa (udio različitih vrsta vozila),
- geometrijski parametri tunela (duljina, veličina i oblik poprečnog presjeka, nagib tunelske cijevi, hrapavost stijenki itd.) i
- potisna sila ventilatora u uzdužnom smjeru.

Uz nepromjenjive ostale faktore, djelovanje prirodne ventilacije bazira se prvenstveno na tzv. stapnom efektu gibanja vozila kroz tunel, čime se inducira strujanje zraka u smjeru gibanja vozila, a u posebnim slučajevima i na povoljnim meteorološkim uvjetima koji omogućavaju prirodnu ventilaciju tijekom znatnog dijela vremena rada tunela. U slučaju jednosmjernog prometa, prirodna ventilacija može biti vrlo učinkovita i jeftina metoda smanjivanja koncentracije štetnih sastojaka ispušnih plinova vozila u zraku tunela. Modic [133] je pokazao

da je na taj način moguće efikasno ventilirati tunele s tekućim jednosmjernim prometom u redovnom pogonu do duljine od 2500-3500 m (ovisno o prometnim i lokalnim uvjetima), a u posebnim slučajevima i do 4500 m[119]. Imajući u vidu sve strože propise o sadržaju polutanata u ispušnim plinovima motornih vozila kao i smanjivanje specifične potrošnje goriva, može se očekivati da će se potrebe za mehaničkom ventilacijom tunela u redovnom pogonu u budućnosti smanjivati i time proširiti vremenski period korištenja prirodne ventilacije. Ipak, pri nepovoljnim meteorološkim i prometnim uvjetima, biti će potrebno uključiti u rad prisilnu ventilaciju, što je izvedivo uz prikladan sustav upravljanja.

Budući da prirodnom ventilacijom nije moguće upravljati, što je posebno važno u slučaju požara ili duljih perioda stajanja vozila u tunelu, u tunele veće duljine normalno se ugrađuju ventilacijski sustavi. Sustavi mehaničke ventilacije mogu biti [9]:

- uzdužni (strujanje zraka je paralelno s uzdužnim smjerom tunela). Polutanti se odvode od jednog portala prema drugome (ili do izlaznih okana), što znači da je njihova koncentracija postepeno raste i da je najveća na izlaznom portalu (na izlaznom oknu),
- poprečni[120] (strujanje zraka je uniformno, okomito na uzdužni smjer tunela, u pravilu odozdo prema gore), pa je koncentracija polutanata jednaka uzduž tunela,
- polupoprečni (dobava zraka uobičajeno je putem uzdužnog dovodnog kanala, a odvod putem obaju portala i/ili putem izlaznih okana). U slučaju požara sustav se često može reverzirati (reverzibilan polupoprečni), pri čemu zrak ulazi kroz portale, a odsis ide putem kanala.
- kombinacija nekih od osnovnih sustava, npr. djelomičan (pseudo) poprečni sustav.

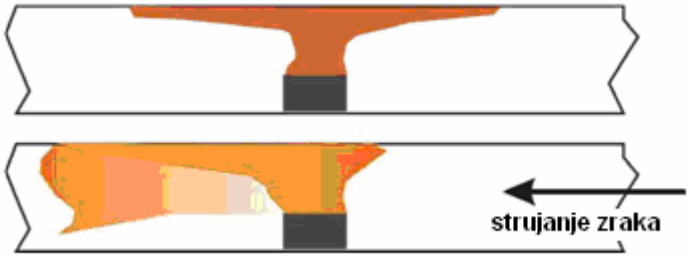
Prikazani načini ventilacije odnose se na normalan rad tunela. Sustav ventilacije najveći je potrošač električne energije pri eksploataciji cestovnog tunela, pa je korištenje prirodne ventilacije u zajednici s promjenjivim protokom zraka (frekventno regulirani ventilatori) vjerojatno najekonomičnija varijanta u normalnom radu[121], Drakulić i Brodar [134]. U slučaju požara, sustav ventilacije u pravilu se prebacuje na „požarni režim“, kojim se nastoje stvoriti što bolji uvjeti za preživljavanje osoba u tunelu i za smanjivanje šteta od požara.

Kao što je već spomenuto, u slučaju požara ventilacija se podešava tako da se postigne potpuno izgaranje kondenzirane faze gorive tvari u tunelu. To dalje znači da će u zoni izgaranja prevladavati optimalni uvjeti gorenja i da će temperature na mjestu požara tijekom faze razvijenog požara doseći temperature više od 1000 ^{0}C. Rezultat će biti gotovo potpuno izgaranje i niska toksičnost dima, tj. koncentracija CO biti će slična njegovoj koncentraciji pri požarima na otvorenom prostoru. Osnovni ciljevi ventilacije su da se:

- U tunelu stvori kontrolirano usmjereno strujanje i zona bez dima na uzvjetrenoj strani od žarišta (brzina zraka viša od kritične).
- Vrući dimni plinovi što brže odvedu iz građevine, zbog smanjenja oštećenje stijenki i opreme uzrokovanog zagrijavanjem.
- Omogući evakuacija ljudi, tj. samospašavanje ljudi iz tunela.
- Olakša ili potpomogne gašenje požara vatrogascima.

[119] Za granične koncentracije CO, NO_x i čađe uzete su redom 100 ppm, 25 ppm i koeficijent ekstinkcije svjetla od 0,007 m^{-1}.
[120] Ovaj sustav sa 100% dovodnim i 100% odsisnim zrakom nazive se i „puni poprečni“, engl. fully transverse.
[121] Frekventna regulacija u sustavu ventilacije posebno je prikladna za tunele s izrazito promjenjivim prometnim intenzitetom (gradski tuneli) i za tunele u specifičnim klimatskim područjima (s vjetrovima promjenjivog smjera i brzine, npr. bura) [134]. Ipak, refuli bure mogu stvoriti značajne probleme pri ventilaciji tunela [135].

Najjednostavnija metoda za ventilaciju tunela je uzdužna ventilacija pomoću jet ventilatora [136]. Ako je brzina strujanja zraka dovoljno visoka, ova metoda jamči da će se zona tunela ispred mjesta požara (uzvjetrena strana) održavati bez dima. Ako nema strujanja zraka, plamen i vrući dimni plinovi vrlo će brzo doseći strop tunela i jednoliko se širiti na obje strane (ako tunel nema uzdužni nagib), no ispravno dimenzionirana ventilacija odvesti će dimne plinove u željenom smjeru. U skladu s općenito prihvaćenim eksperimentalnim i numeričkim podacima, brzine zraka između 2,3 i 3,6 m/s dovoljne su da onemoguće backlayering, tj. širenje dima u stranu suprotnu od smjera strujanja zraka, RABT [87]. Shematski je to prikazano na slici 5.6.



Slika 5.6. Shematski prikaz širenje dima bez i s uzdužnom ventilacijom

Zbog strujanja svježeg zraka, posebno u fazi razvoja požara, dolazi do hlađenja dimnih plinova koji se miješaju sa zrakom. Posljedica miješanja je smanjenje ili gubitak vidljivosti u struji mješavine dimnih plinova i zraka, što može vrlo negativno djelovati na ljude u tunelu. Stoga se režim požarne ventilacije normalno uključuje tek nakon određenog perioda zadrške, da bi se ljudima na nizvjetrenoj strani požara omogućilo sigurnije samospašavanje. RABT [87] i druge smjernice predviđaju posebne mjere za slučaj požara, dok Modic [137] ističe da brzine zraka manje od kritičnih mogu doprinijeti većoj sigurnosti jer pomažu održavanju bolje stratifikacije dima.

Osim sustava uzdužne ventilacije, za prozračivanje tunela koriste se i različite vrste polupoprečne i poprečne ventilacije. U tom slučaju tunel mora biti opremljen jednim ili više ventilacijskih kanala. Pri polupoprečnoj ventilaciji „dovodnog tipa“, svježi se zrak dovodi putem zračnog kanala smještenog nisko, uz pod jedne strane tunela, dok se otpadni zrak ispuhuje kroz portale u atmosferu. Otpadni zrak se isto tako može odvoditi kroz otvore ventilacijskog kanal smještenog pod stropom i odatle izbacivati u atmosferu. U tom slučaju se radi o „odvodnom tipu“ polupoprečne ventilacije, gdje se svježi zrak usisava kroz portale. Kod poprečne ventilacije, svježi se zrak normalno dovodi jednim uzdužnim kanalom smještenim ispod kolnika, a otpadni odsisava kroz otvore drugog uzdužnog kanala smještenog uza strop tunela i izbacuje u okoliš. Zbog visoke cijene, polupoprečni i poprečni sustav ventilacije normalno se grade samo u dugačkim tunelima kružnog poprečnog presjeka.

Ako tijek događaja vodi do potpuno razvijenog požara, napose ako u požaru sudjeluje i HGV, odvodni kanali moraju vruće dimne plinove odvoditi tijekom dugog perioda vremena. To znači da oni moraju vrlo visoke temperature izdržati dugo, pa je spušteni strop izložen iznimnim toplinskim naprezanjima. Analize akcidenata pokazuju da svi ventilacijski sustavi, uključujući i najsuvremenije, pri velikim požarima vrlo teško mogu odgovoriti zahtjevima za odvođenjem dimnih plinova stvorenih u požaru [74, 136]. Stoga je realistički očekivati da će, posebno u smjeru strujanja zraka, doći do značajnog smanjenja vidljivosti, pojave visokih temperatura i toksičnih produkata izgaranja u atmosferi tunela.

Iz podatka o toplinskoj snazi požara može se lako izračunati približna minimalna količina proizvedenog dima ako se usvoje neka ograničenja i prihvate sljedeće pretpostavke:

- Potpuno izgaranje gorive tvari, tako da se može odrediti masa goriva koje izgara u ovisnosti o toplinskoj snazi.
- Pretičak zraka se ne uzme u obzir ($\lambda = 1$).
- Odredi se temperatura stvorenih dimnih plinova. Osnova toga je temperatura dimnih plinova od 600 ^{0}C, koja je usvojena u skladu s [13], zato što je prihvaćeno da pri toj temperaturi dolazi do prijelaza svjetlećeg plamena u nesvjetleće dimne plinove.

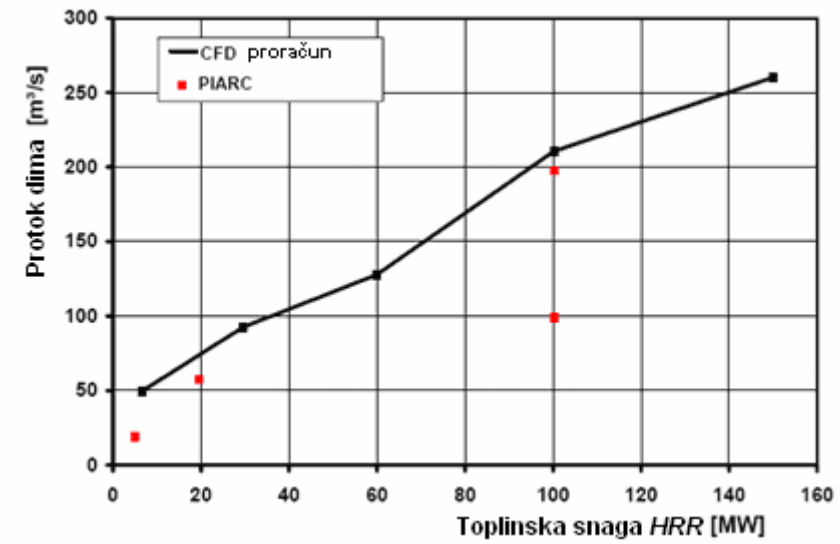
U takvom se slučaju za referentnu snagu požara od npr. 100 MW mogu izračunati minimalne stehiometrijske količine dimnih plinova za reprezentativna goriva, tablica 5.11.

Tablica 5.11. Približna količina dimnih plinova u tunelskom požaru

Gorivo	**Min. količina dimnih plinova uz *HRR* = 100 MW pri 600 ^{0}C, m^3/s**
Benzin	100,7
Polietilen	87,7
Drvo	113,3

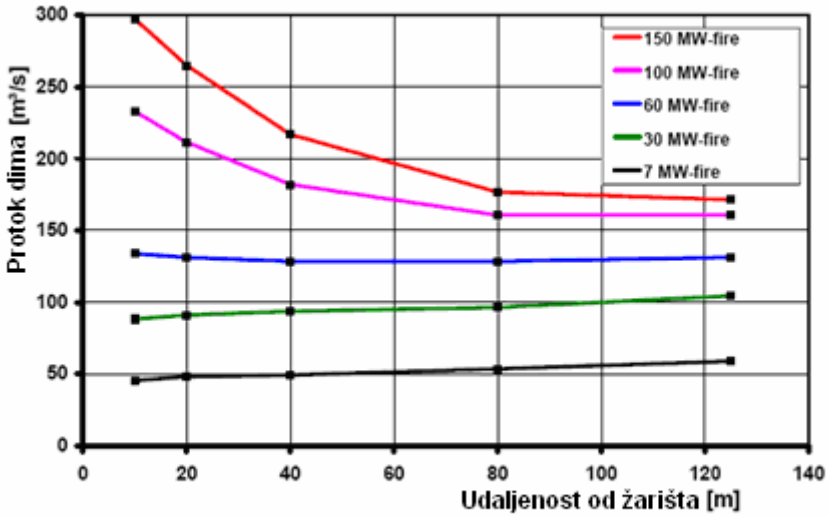
Stehiometrijski izračunate količine dima, bez uzimanja u obzir pretička zraka, s pretpostavljenom temperaturom od 600 ^{0}C i potpunim izgaranjem goriva mogu poslužiti jedino kao orijentacijska vrijednost za procjenu najmanjeg očekivanog protoka. Zbog visoke temperature, dimni se plinovi hitro uzdižu do stropa tunela i nastoje širiti u oba smjera. Oni se pri gibanju hlade, pa se postepeno miješaju gornji vrući sloj dimnih plinova i donji hladni sloj zraka, te će na udaljenosti od 200-300 m niz vjetar od žarišta oba sloja biti međusobno izmiješana. U toj će zoni smanjenje vidljivosti biti maksimalno.

Ovako izračunate količine dima osjetno su manje od eksperimentalno određenih vrijednosti i vrijednosti izračunatih korištenjem numeričkih modela. Odstupanja se mogu pripisati različitim ulaznim podacima. Haack i sur. [117] su na temelju istraživanja Lacroix [121] predložili podatke o količini dima prema slici 5.7, iz kojih se vidi da količina dima raste približno linearno od cca 50 m^3/s pri 10 MW do cca 250 m^3/s pri 150 MW, što se približno poklapa i s podacima iz posljednje kolone tablice 5.6.



Slika 5.7. Količina proizvedenog dima ovisno o *HRR* [121]

Za uvid u promjene volumena dima u tunelu pri uzdužnom strujanju zraka zanimljivi su rezultati prikazani na slici 5.8, koji pokazuju da se za *HRR* > 60 MW volumen dimnih plinova smanjuje s povećavanjem njihove udaljenosti od požara. Za snagu požara do 60 MW, volumen dima ostaje gotovo konstantan barem do udaljenosti od 120 m, budući da se plinovi hlade i sažimaju, ali inducirani svježi zrak nadoknađuje to smanjenje volumena. Kod požara veće snage, od 100-150 MW, inducirani svježi zrak nije u stanju kompenzirati smanjenje volumena dimnih plinova zbog hlađenja na udaljenosti do cca 80 m od požara.



Slika 5.8. Promjena volumnog protoka dimnih plinova s udaljenošću [121]

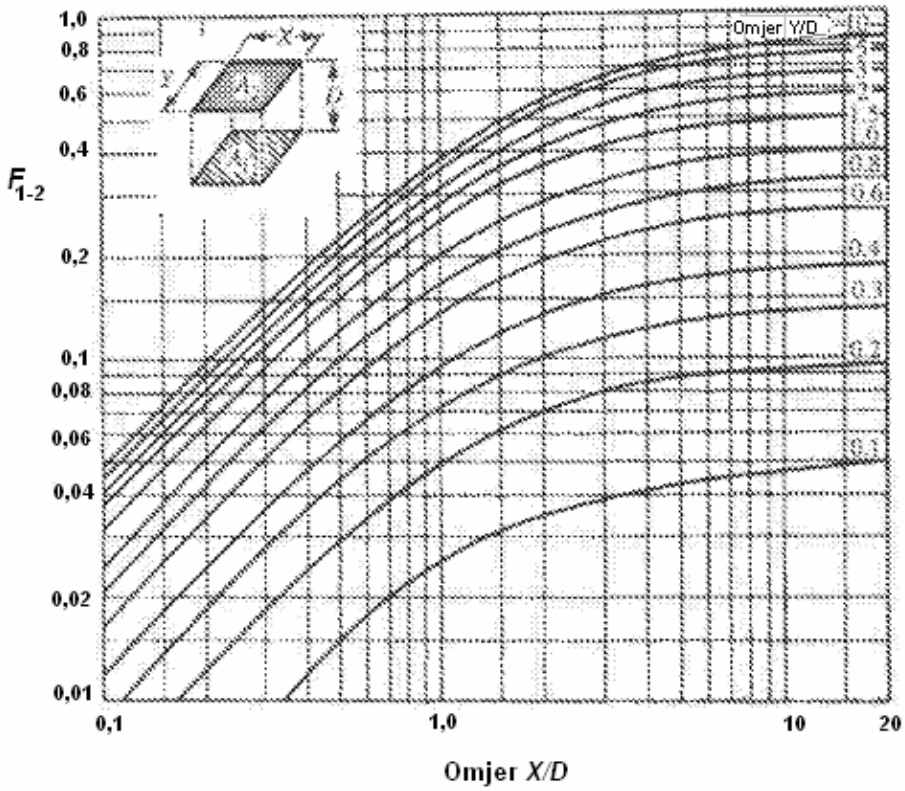
5.1.5 Zračenje topline

Uz nekoliko iznimaka (npr. metanol), tekućine i krutine gore svjetlećim difuzijskim plamenom. Visoke temperature izgaranja uzrokuju toplinsko zračenja čestica čađe i heteronuklearnih molekula kao što su CO_2, H_2O, CO i HCl, pri čemu se kontinuirani spektar toplinskog zračenja čestica čađe u području od cca 0,4 - 100 μm superponira na emisiju molekularnih emitera kao što su H_2O i CO_2 [37]. Karakteristična žuta boja svjetla posljedica je emisije topline sićušnih čestica ugljika približnog promjera 10 - 100 nm stvorenih u plamenu, uglavnom na strani goriva u zoni reakcije. Tok radijacijske topline požara određen je temperaturom i emisijskim svojstvima sloja vrućih plinova (plamena ili okoline), što je ovisno o reakciji izgaranja. Stvarna kemijska reakcija oksidacije gorive tvari kisikom ograničena je na relativno mali volumen u kojem je omjer koncentracija obiju komponenti u približno stehiometrijskom odnosu, pa je brzina reakcije maksimalna. Prijelaz topline unutar sloja plina i prijelaz te topline na okoliš su vrlo brzi, a temperaturu amorfne mase dimnih plinova moguće je izmjeriti standardnim termoparovima. Zbog snažnog uzgona i turbulencije uzrokovane visokom temperaturom plinova, izmjerene temperature su približno jednake u svim elementima prostora. Nastali svjetleći plamen nije homogen u smislu sastava niti u smislu energijske razine. Ipak, srednja temperatura plamena može se iskoristiti za približan proračun toplinskog zračenja. Ako je debljina plamena dovoljno velika, što je u požaru normalan slučaj, izračeni toplinski tok približno odgovara zračenju crnog odnosno sivog tijela. Za određivanje topline izmijenjene zračenjem između površina dvaju toplinski sivih

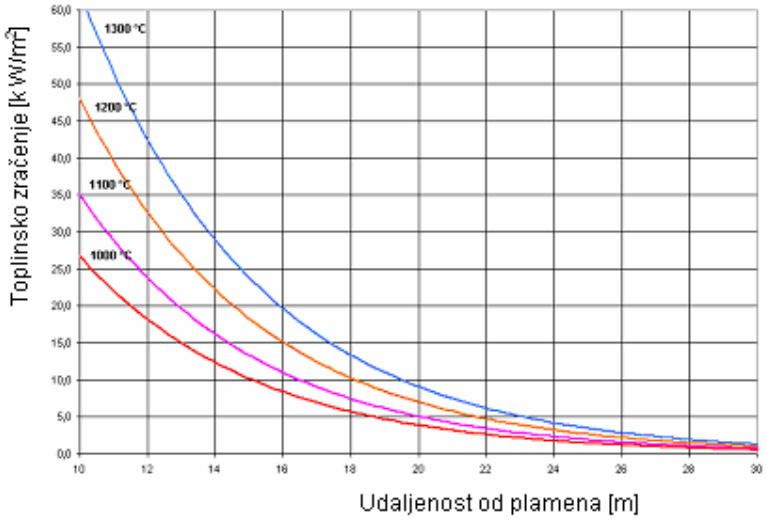
tijela (1 i 2) može se iskoristiti jednadžba (5.12), koja je izvedena iz Stefan-Boltzmannovog zakona [104]:

$$Q_{1,2} = A_1 F_{1,2} \varepsilon_1 \sigma \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \tag{5.12}$$

Za određivanje faktora oblika $F_{1,2}$ između dviju jednakih paralelnih pravokutnih ploha može se upotrijebiti npr. dijagram na slici 5.9. Faktore oblika za razne druge geometrijske situacije nalaze se u literaturi [37, 138].



Slika 5.9. Faktor oblika za izmjenu topline zračenjem između dviju jednakih planparalelnih ploha [139]



Slika 5.10. Toplinsko zračenje pri različitim udaljenostima i temperaturama plamena [140]

Maksimalno toplinsko zračenje na različitim udaljenostima od plamena može se odrediti uz pomoć dijagrama na slici 5.10. [140]. Dijagram je napravljen tako da je plamen u tunelu modeliran kao crno tijelo, zračenje je izračunato prema različitim temperaturama plamena od 1000-1300 ^{0}C, a faktori oblika uzeti su prema slici 5.9[122].
Dijagram prikazuje toplinski tok zračenja na udaljenosti većoj od 10 m, jer je na manjoj udaljenosti zračenje toliko intenzivno da u njemu niti vatrogasci ne mogu izdržati više od nekoliko sekundi[123]. Testovi provedeni s vatrogascima odjevenima u zaštitnu odjeću za strukturne požara pokazali su da će oni osjetiti bol nakon približno 5 minuta izlaganja toplinskom zračenju od 5 kW/m^2 [22]. Da bi vatrogasci mogli obavljati težak fizički posao u vremenu duljem od 5 minuta, toplinsko zračenje nedvojbeno treba biti manje od toga. Imajući u vidu rezultate ovih testova, koji povezuju veličinu toplinskog toka s vremenom izlaganja i utjecajem na čovjeka, može se zaključiti da se tijekom potpuno razvijenog požara niti ispravno zaštićeni vatrogasci ne mogu približiti žarištu na manje od 19-23 m u trajanju duljem od 5 minuta, ako se između njih i žarišta ne uspostavi učinkoviti zaštitni mlaz raspršene vode. Granice izlaganja toplinskom zračenju $\dot{q}''$ mogu se prema Kim i sur. [143] približno odrediti prema relaciji (5.13), na bazi toplinske snage Q i udaljenosti od stvarnog izvora topline (D/2):

$$\dot{q}'' = \frac{1}{3} \cdot \frac{Q}{\pi \cdot D^2} \tag{5.13}$$

Ako se pak pretpostavi da je tolerabilna razina toplinskog zračenja za vatrogasca 5 kW/m^2 i kao optimalna udaljenost za akciju usvoji udaljenost od 10 m od žarišta, izračun prema izrazu (5.13) daje *HRR* od oko 20 MW.

Najveći toplinski utjecaj na ljude koji se nađu u blizini požara, moguće žrtve ali i intervencijsko osoblje, imaju izlaganje toplinskom zračenju plamena, vrućih površina i dima, te konvekcija od vrućih plinova. Pojava bola i vjerojatnost nastanka opeklina kože pojavljuju se pri temperaturi atmosfere iznad približno 120 ^{0}C. Osim o temperaturi plinova, prijelaz topline na kožu ovisi o brzini strujanja, vlažnosti plinova te o zaštitnoj vrijednosti odjeće. Za nezaštićene dijelove tijela, kao što je npr. glava, relevantni su podaci o granicama tolerancije bola za golu kožu prikazani na slici 5.11, prema Purser [144]. Uzimajući u obzir prosječne vrijednosti krivulje između suhog i vlažnog zraka, može se izvesti izraz za „vrijeme onesposobljavanja“[124]:

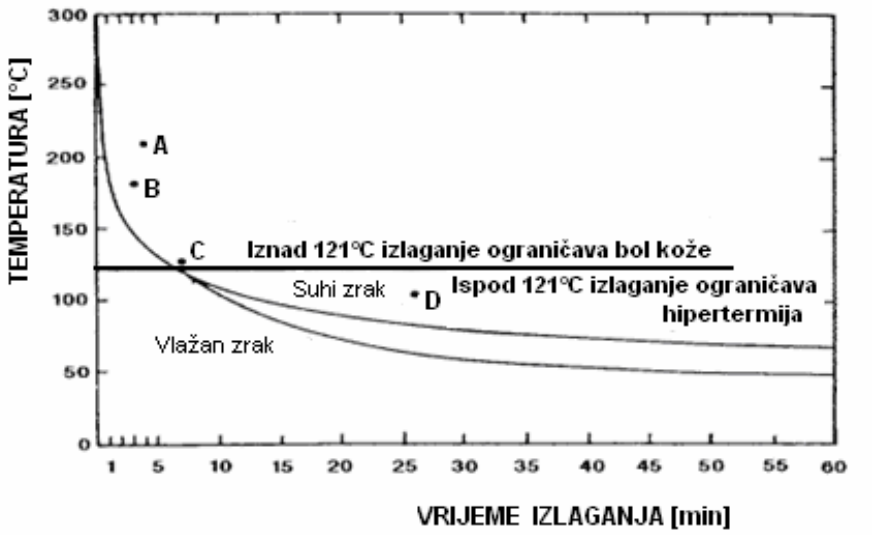
$$t_{Ih} = \mathrm{e}^{(5{,}1849 - 0{,}0273\,\vartheta)} \tag{5.14}$$

Iz vremena onesposobljavanja može se izračunati frakcionalna doza onesposobljenosti kao:

[122] Gotovo identični dijagram daje VDI [141].
[123] EN 469 [142], kao najteže (opcijsko) ispitivanje vatrogasnih odijela za strukturne požare predviđa ono na termo-manekenu opremljenom instrumentima, s ukupnim toplinskim tokom od 84 kW/m^2 tijekom 8 s. Njime se dokazuje da vatrogasac može preživjeti bez ili s malim % opeklina tijekom 8 s pri ovim uvjetima, a ne da može raditi. Približno 50% testnog toplinskog toka daje zračenje topline, a 50% konvekcijska toplina plamena.
[124] Vrijeme onesposobljavanja osobe (t_{Ih} time to incapacitation, heat) je produkt utjecaja (temperature) i vremena izlaganja osobe. Pri korištenju ovog modela, kao onesposobljenost toplinom smatra se točka pri kojoj izlaganje kože postaje bolno, nešto malo ispod granice opeklina, ili alternativno točka pri kojoj hipertermija tijela uzrokuje pogoršanje mentalnih sposobnosti i ugrožava preživljavanje. Sličan model vremena onesposobljavanja Purser [144] je razvio i za druge utjecajne parametre (npr. koncentraciju toksičnih kemikalija).

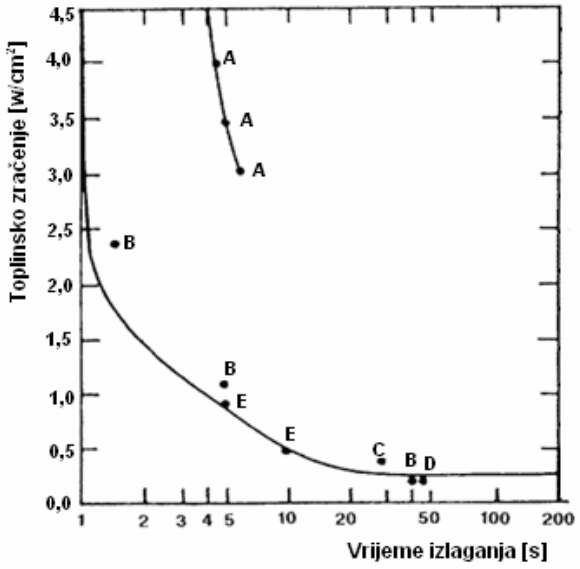
$$F_{DIh} = \frac{1}{t_{Ih}} \tag{5.15}$$

pri čemu F_{DIh} pokazuje koliki udio nesposobnosti je osoba zadobila u svakoj minuti izlaganja[125].



Slika 5.11. Vrijeme tolerancije neodjevenog čovjeka koji miruje na konvekcijsku toplinu zraka male brzine (do 0,5 m/s) [144][126]*

I kod topline zračenje odjeća značajno utječe na vrijeme tolerancije, no podaci za golu kožu su ponovno relevantni zbog mogućeg izlaganja nezaštićenih površina glave, šaka i sl. Veza između vremena do nastupa boli u koži i toplinskog toka zračenje prikazana je na slici 5.12 [144]. Krivulja tolerancije na toplinu zračenja pokazuje dosta jasno izraženu granicu od 2,5 kW/m^2 (0,25 W/cm^2 na slici), ispod koje se izlaganje može tolerirati barem nekoliko minuta.



Slika 5.12. Vrijeme do nastupa snažne boli u koži zbog toplinskog zračenja [144]*

[125] Ako je F_{DIh} = 1 ili 100%, to znači da je osoba potpuno onesposobljena.
[126]* Točke označene s A, B, C, D i E potječu iz mjerenja različitih autora (slike 5.11 i 5.12).

Podaci o mogućem vremenu djelovanja vatrogasaca i intervencijskog osoblja općenito u ovisnosti o toplinskom zračenju navedeni su u tablici 5.12. Pritom treba imati na umu da će vatrogasci pri intervenciji biti izloženi i toplini zračenja i konvekcijskoj toplini dimnih plinova, što znači da se ova dva utjecaja zbrajaju.

Tablica 5.12. Utjecaj toplinskog zračenja na osoblje vatrogasne postrojbe, Koinig [145]

Toplinsko zračenje, kW/m^2	**Učinak na ljude i na intervencijsko osoblje**
1	Maksimalno sunčevo zračenje na površini Zemlje
1,5	Osoblje može djelovati dulje vrijeme. Ima dovoljno vremena za postavljanje opreme.
4,5	Osoblje može djelovati nekoliko minuta u standardnim vatrogasnim odijelima prema EN 469 [142]
8	Osoblje može djelovati kratko vrijeme u specijalnim hlađenim odijelima ili u reflektirajućim odijelima prema EN 1486 [146]

CETU [147] navodi donekle drugačije podatke: 2 kW/m^2 kao maksimalno toplinsko zračenja koje čovjek može podnijeti nekoliko minuta i 5 kW/m^2 kao zračenje u kojem mogu djelovati opremljeni vatrogasci, što potvrđuju Vergnault i sur. [148] navodeći 5,0 kW/m^2 tijekom nekoliko minuta s temperaturom okoline od 100 ^{0}C kao prihvatljive uvjete za vatrogasce.

Lawson [149] specificira toplinski tok zračenja koji će izazvati opekline 2. stupnja u ovisnosti o vremenu izlaganja. Pri približno 5 kW/m^2 opekline 2. stupnja pojavit će se nakon 25 s izlaganja.

Tablica 5.13. Izlaganje ljudskog tkiva do opeklina 2. stupnja [149]

Vrijeme izlaganja, s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	25	30
Toplinski tok, kW/m^2	50	31	23	19	16	14	13	11,5	10,6	9,8	9,2	8,6	8,1	7,7	7,4	7,0	6,7	6,4	6,2	6,0	5,1	4,5

EN 469 Zaštitna odjeća za vatrogasce [142], detaljno opisuje opcijsko ispitivanje vatrogasnog intervencijskog odijela za strukturne požare na termo-manekenu u pravoj ljudskoj veličini (1,8 m visine) opremljenom instrumentima (najmanje 100 senzora na „koži“) pri ukupnom toplinskom toku od 84 kW/m^2 tijekom 8 s. Navedeni toplinski tok sastoji se od približno 50% toplinskog zračenja i 50% konvekcijske topline plamena. Pri mnogobrojnim ispitivanjima kojima je autor disertacije prisustvovao, ako su svi parametri ispitivanja bili ispravno određeni, a odjeća izrađena i certificirana prema navedenoj normi, ukupni postotak opeklina 2. i 3. stupnja prema ispisu računalnog programa za proračun opeklina redovito je bio u rasponu od 0 - 10%. Pri tome je termo-maneken bio „gol“ ispod zaštitnog odijela. Imajući u vidu da vatrogasci ispod odijela normalno nose barem još jedan sloj vlastite osobne odjeće, može se u grubo procijeniti da je izlaganje toplinskom toku od oko 80 kW/m^2 tijekom 8-10 s granica iznad koje se može očekivati pojava prvih opeklina 2. i/ili 3. stupnja na tijelu vatrogasca.

Da bi se izbjegao utjecaj topline zračenja u tunelu, intervencija bi trebala započeti što ranije, tijekom faze razvoja požara, dok su snaga požara i temperature relativno niske. Pri potpuno

razvijenom požaru veće snage, toplinsko zračenja i temperatura plinova u tunelu postaju faktor koji signifikantno utječe na akciju gašenja. Procjene vatrogasaca navode da će u takvim uvjetima na hlađenje i apsorpciju zračenja biti potrebno potrošiti najmanje 1/3 vode raspoložive za gašenja požara.

5.1.6 Toplinska snaga požara u tunelu (*HRR*)

Tijekom požarnih ispitivanja u tunelima, redovito se određuje toplinska snaga požara. Tablica 5.14 daje pregled podataka o snazi požara prikupljenih tijekom različitih međunarodnih ispitivanja i usporedbu s prihvaćenim preporukama, Haack i sur. [117].

Tablica 5.14. Toplinske snage požara: izmjerene vrijednosti i neke preporuke [117]

Kategorija požara	Toplinska snaga požara, *HRR*, MW									
	Preporuke institucija					Požarni testovi				Procjene prema velikim akcidentima
	PIARC		RABT (D)	CETU (F) prijedlog	NFPA 502 (USA)	EUREKA		Runehamar	Memorial: usvojene veličine požara	
	1987	1999	1994[127]	1996/97	1998	Stvarni testovi[128]	Izvještaj Ingason			
Osobni automobil	5	2,5-8	--	2,5	5	1,5-2	2,5-9	--	--	3-10
Osobni automobil (veliki)	--		--	5	--	--		--	--	
Putnički furgon (plastični)	--		--	--	--	5-6		--	--	
1-2 osobna automobila	--		5-10	--	--	--		--	--	
2-3 osobna automobila	--		--	8	--	--		--	--	
1 furgon	--	15	--	15	--	--	--	--	--	--
1 javni autobus	--	20	--	--	--	29-34	29-34	--	--	36
1 autobus ili kamion (bez opasnog tereta)	20	--	20-30	20	20	--	--	--	20	--
HGV	--	--	--	30	--	100-130	128	--	--	150-400
Autocisterna s benzinom, propuštanje	100	100	50-100	200	100	--	20-100	--	--	120-300
Zapaljiva lokva 400 L	--	--	--	--	--	--	--	--	50	--
Zapaljiva lokva 800 L ili opasne tvari	--	--	--	--	--	--	--	--	100	--
Miješani teret, 2844 kg (drvo, autogume, plastike)	--	--	--	--	--	15-17	--	--	--	--
Različiti tereti HGV	--	--	--	--	--	--	--	71-223	--	--
Željeznički vagon	--	--	--	--	--	--	12-47	--	--	3-100

[127] Novo izdanje RABT 2003 preporučuje požarno opterećenje samo za kamione, ovisno o prometu, od 30-100 MW.
[128] Sadržaj energije od cca 3 GJ (osobni automobil) do cca 90 GJ (HGV).

Ingason i Lönnermark [150] su sastavili tablicu 5.15 navodeći bitne parametre iz većeg broja požarnih ispitivanja.

Tablica 5.15. Bitni parametri požara u tunelima pri raznim testovima [150]

Tip vozila, model-godina, uzdužna brzina zraka *u*, m/s	**Ukupni sadržaj topline E_{tot}, GJ**	**Vršna *HRR*, MW**	**Vrijeme do vršne *HRR*, min.**	**Referenca**
Osobni automobili				
3 testa osobnih automobila-kasne 1970.	4	1,5; 1,8; 2	12; 10; 14	Mang, Keski-Rahkonen
Renault Espace -1988, EUREKA 499, u = 0,4 m/s	7	6	8	Steinert
Citroen BX -1986	5	4,3	15	Ship, Spearpoint
Austin Maestro - 1982	4	8,5	16	
Opel Kadett, u = 1,5 i 6 m/s	-	4,9; 4,8	11; 38	Lemaire i sur.
Test s 1. vozilom (Renault 5, Renault 18, Citroen, Ford) (1980/90)	2,1; 3,1; 4,1; 6,7	3,5; 2,1; 4,1; 8,3	10; 29; 26; 25	Joyeux
Test s 1. vozilom (Trabant, Austin, Citroen)	3,1; 3,2; 8	3,7; 1,7; 4,6	11; 27; 17	Steinert
2 vozila (Renault, Peugeot, Citroen, Ford, Opel, Fiat, VW) -1980/90)	8,5; 7,9; 8,4; -	1,7; 7,5; 8,3; 10	- ; 13; - ; -	Joyeux
2 vozila (Polo/Trabant, Peugeot/ Trabant, Citroen/Trabant, Jetta/ Ascona)	5,4; 5,6; 7,7; 10	5,6; 6,2; 7,1; 8,4	29; 40; 20; 55	Steinert
3 vozila (Golf, Trabant, Fiesta)	-	8,9	33	Steinert
Autobusi				
Školski autobus Volvo, duljine 12 m, 40 sjedala, EUREKA 499, u = 0,3 m/s	41	29	8	Ingason
Test, tunel Shimizu, u = 3-4 m/s	-	30	7	Kunikane i sur.
HGV				
Teret tegljača 10,9 t, drvene palete (82%), plastične palete (18%), Runehamar, T1, u = 3 m/s	240	202	18	Ingason, Lönnermark
Teret tegljača 6,8 t, drvene palete (82%), PUR madraci (18%), Runehamar, T2, u = 3 m/s	129	157	14	Ingason, Lönnermark
Tegljač 8,5 t, namještaj, pribor, autogume, Runehamar, T3, u = 3 m/s	152	119	10	Ingason, Lönnermark
Maketa tegljača 3,1 t, valoviti karton, plastične čaše (19%), Runehamar T4, u = 3 m/s	67	67	14	Ingason, Lönnermark
Leyland DAF kamion 310ATi, 2 t namještaj, EUREKA 499, u = 3 m/s	87	128	18	Grant, Drysdale
Teret tegljača, 72 drvene palete, 2. Benelux test, Test 14, u = 1 - 2 m/s	19	26	12	Lemaire i sur.
Teret tegljača, 36 drvenih paleta, 2. Benelux test, Test 8, 9, 10; u = 1,5; 5,3; 5 m/s	10	13; 19; 16	16; 8; 8	Lemaire i sur.
Maketa tereta kamiona, EUREKA 499, u = 0,5 m/s	63	17	15	Ingason

Lönnermark [22] je na bazi niza mjerenja sastavio tablicu 5.16, u kojoj su sumirani obrađeni bitni parametri koji se odnose na snagu, energiju i vrijeme razvoja požara.

Analizom raspoloživih podataka o *HRR* i ukupnom sadržaju topline, Lönnermark [22] je došao do zaključka da postoji korelaciju između ukupnog sadržaja topline E_{tot} i vršne *HRR* pri

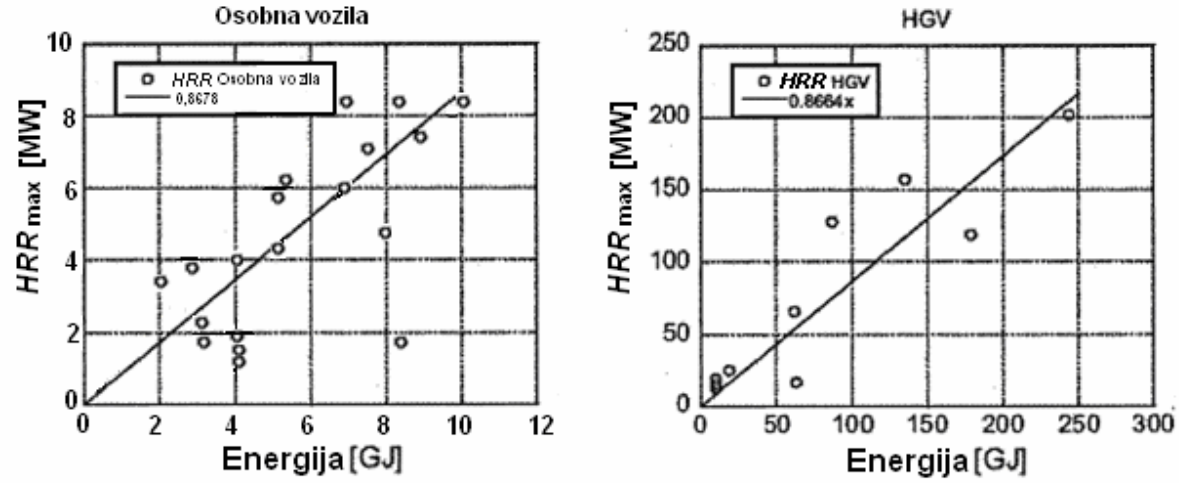
tunelskim požarima. Zbog razlike u redu veličine, korelacija je izvedena zasebno za osobne automobile (jedan ili više) i za HGV, ali se pokazalo da su izrazi za obje grupe vrlo slični. Za osobne automobile rezultat je bio HRR_{max}/E_{tot} = 0,868 MW/GJ (R = 0,840), a za HGV je HRR_{max}/E_{tot} = 0,866 MW/GJ (R = 0,910).

Tablica 5.16. Sumarni prikaz bitnih podataka o požarima na različitim vozilima [22]

Vozilo	Broj testova	Ukupni sadržaj topline E_{tot}, GJ	Vršna *HRR*, MW	Prosječna vršna *HRR*, MW	Vrijeme do vršne *HRR*, min.
Osobni automobil	15	2 - 8	1,5 – 8,5	4,1	10 - 38
2 osobna automobila	7	5 - 10	5,6 - 10	7,6	13 - 55
3 osobna automobila	1	-	8,9	8,9	33
Autobus	2	41[a)]	29 - 30	29,5	7 - 8
HGV tegljač	10	10 - 244	13 - 202	-[b)]	8 - 18

[a)] Informacija o sadržaju topline bila je poznata samo za jedan autobus. Veličina od 41 GJ odgovara za vršnu *HRR* od 29 MW.
[b)] Testovi su bili previše različiti za određivanje prosjeka.

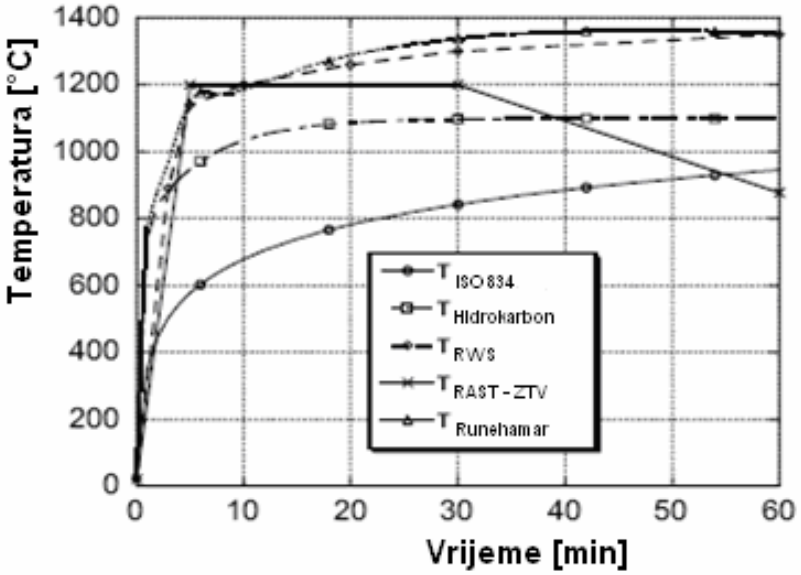
Za slučaj autobusa, na bazi samo jednog slučaja, odnos je približno 0,7 MW/GJ. Regresijske linije prolaze kroz ishodište, što se zbog ograničenog broja testnih podataka smatralo prihvatljivim. Jedna točka u dijagramu za osobna vozila značajno odstupa od regresijske linije. Ovdje se radilo o nepotpunom izgaranju, pa ova točka nije uzeta u obzir, ali to ujedno ukazuje na značaj ventilacije, te vrste i geometrije rasporeda goriva.



Slika 5.13. Veza između vršne *HRR* i sadržaja topline za osobne automobile i HGV [22]

Ovakav odnos toplinskih parametara doveo je Lönnermarka [22] do zaključka da povećani sadržaj topline izvora (žarišta) dovodi do povišenja temperature u požaru. Na bazi toga izvedena je temperaturna krivulja za testove u tunelu Runehamar (slika 5.14).
Evidentno je da je povećani sadržaj topline žarišta posljedica povećane mase gorivih tvari izvora, tj. da porast veličine vozila i mase tereta rezultira povećanjem toplinske snage požara i ostalih povezanih parametara. Povećanje opsega prometa na cestama stoga donosi i povećanje

rizika od požara u kojima sudjeluje nekoliko vozila. Prijenos (širenje) požara s vozila na vozilo signifikantno otežava gašenje požara i zato što se vatrogasci u takvim slučajevima ne mogu dovoljno približiti žarištu (koje se u takvom slučaju sastoji od nekoliko međusobno razmaknutih vozila-žarišta) i istodobno primijeniti sredstva za gašenja na čitavu površinu zahvaćenu gorenjem.



Slika 5.14. Usporedba krivulje Runehamar sa standardnim krivuljama požara [22]

Takvi požari stvaraju i osjetno veće vršne snage, što pokazuje i procjena *HRR* za neke od stvarnih tunelskih požara u kojima je sudjelovalo po nekoliko vozila. Tablica 5.17 [22] prikazuje procjene do kojih su došli [151] i [152]. Evidentno je da HGV imaju vrlo značajnu ulogu i da zapravo oni dobrim dijelom određuju tijek i ishod požara u tunelu.

Tablica 5.17. Procijenjeni sadržaj topline i snaga požara u stvarnim požarima s nekoliko HGV, Lönnermarka [22]

Događaj	Vrsta vozila	Procijenjeni sadržaj topline, GJ	Procijenjena snaga *HRR*, MW	Posljedice za	
				Osobe	Tunel
Eurotunnel	10 HGV	2200	370	30 ozlijeđenih	Oštećen strop
Mont Blanc	14 HGV, 9 automobila	5000 – 7000	380	39 mrtvih	3 godine zatvoren
Tauern	16 HGV, 24 automobila	4000 – 4500	300 – 400	12 mrtvih	3 mjeseca zatvoren
St. Gotthard	13 HGV, 10 automobila	1400 – 2700 [a)]	> 100	11 mrtvih	2 mjeseca zatvoren

[a)] Usvojeno: 100 do 200 GJ po HGV i 5 GJ po automobilu

5.1.7 Utjecaj prometa i tereta na tunelski požar

Kao što je već navedeno u uvodnom dijelu, opseg putničkog i teretnog prometa na europskim cestama uporno i stalno raste, iako pritom broj smrtnih žrtava i ozlijeđenih osoba kontinuirano

opada. Studija prometa izvedena za norveške tunele [107] pokazala je da su tuneli jednako tako sigurni kao autoceste, iako se to često dovodi u pitanje, što je vjerojatno posljedica činjenice da veći akcidenti u cestovnim tunelima privlače naročitu pažnju medija masovnih komunikacija. Mnogi vozači i putnici osjećaju nelagodu i zabrinutost za svoju sigurnost pri ulasku u tunel, a ponašanje vozača je jedan od bitnih faktora za projektiranje i uspješno djelovanje sustava sigurnosti u tunelima. Navedena PIARC studija [107] pokazala je velika odstupanja u frekvenciji incidenata (Ar[129]) na različitim lokacijama tunela, pa ta frekvencija, mjerena brojem godišnjih akcidenata na milion prevezenih vozilo-kilometara, iznosi:

- Za čitav prometni potez (tunel plus 100 m izvan tunela) $Ar = 0,52$
- Tranzicijska zona (po 50 m na obje strane oba portala tunela) $Ar = 0,86$
- Središnja zona (tunel minus po 50 m uz portale) $Ar = 0,17$

To znači da je frekvencija akcidenata u tranzicijskoj zoni po km prijeđenog puta 5 puta veća od one u središnjoj zoni. Glede lokacije akcidenata, napravljena je podjela na 4 grupe, koja je pokazala da se tranzicijska zona proteže na 75-100 m u dubinu tunela.

- Zona 1: prvih 50 m izvan portala tunela $Ar = 0,30$
- Zona 2: prvih 50 m unutar tunela $Ar = 0,23$
- Zona 3: sljedećih 100 m u dubinu tunela $Ar = 0,16$
- Zona 4: središnja zona (preostali dio tunela) $Ar = 0,10$

Neki drugi podaci, Beltzer ni sur. [153], pokazuju da je frekvencija akcidenata neposredno ispred ulaska u portal tunela oko 20% viša od prosječne na otvorenoj autocesti, dok joj vrijednost pada na 2/3 u unutrašnjem dijelu tunela. Za razliku od toga, u europskoj literaturi postoje jasni dokazi da je rizik smrti u tunelima približno dvostruko veći nego na otvorenoj cesti. Kako je istovremeno poznato da je vjerojatnost akcidenta u tunelu mnogo niža nego na autocestama, brzim i pokrajinskim cestama, nameće se zaključak da akcidenti u tunelima imaju mnogo teže posljedice. Kao i kod svake druge procjene rizika, veličina rizika, tj. „štete“ u nekom razdoblju, produkt je frekvencije štetnih događaja i prosječne „štete“, odnosno žestine događaja.

Pri istraživanju tunelskih akcidenata provedenih u Austriji, ustanovljeno je da je rizik nastupa smrtne žrtve u tunelu s dvosmjernim prometom gotovo dvostruko veći od onoga u tunelu s jednosmjernim prometom, tj. da je rizik:

- u tunelu s dvosmjernim prometom 17 smrtnih žrtava/10^9 km putovanja
- u tunelu s jednosmjernim prometom 8 smrtnih žrtava/10^9 km putovanja.

Istraživanje Trottet i sur. [154] na 170 tunelskih akcidenata pokazalo je da, iako su akcidenti u tunelima rjeđi nego na otvorenoj cesti, posljedice, posebno u slučaju požara, mogu biti mnogo teže. Za preživljavanje putnika presudno je događanje tijekom prvih 10 minuta nakon akcidenta, jer se u gotovo svim slučajevima tunel ispunjava gustim dimom unutar 3-10 minuta. Isti izvor u studiji pojedinačnih akcidenata navodi slične mehanizme koji se odnose na bitne događaje pri akcidentu:

- Broj sudionika i bitnih događaja pri akcidentu je ograničen.
- Između bitnih događaja pri akcidentu postoji uobičajena kauzalna veza.
- Tijek akcidenta značajno ovisi o paralelnim događanjima (npr. o razvoju požara i evakuaciji putnika tijekom požara).

Problemi nepravovremenog reagiranja i posljedičnog ugrožavanja ljudskih života pojavljuju se u 4 karakteristična scenarija događanja [154]:

[129] *Ar*, Accident rate, tj. učestalost akcidenta.

- Produljeno mirovanje vozila u tunelu.
- Mirovanje učesnika nakon sudara.
- Mirovanje uzrokovano početnim požarom.
- Mirovanje zbog percepcije opasne situacije.

Ukupno uzevši, dulje mirovanje, odnosno period neaktivnosti nakon akcidenta u slučaju emisije velike količine dima, toksičnih tvari ili ispuštanja tvari koje mogu dovesti do eksplozije značajno povećava rizike, dok hitro samospašavanje ljudi bez odgode može bitno smanjiti rizike. Pri simulaciji mehanizama takvih akcidenata potrebno je razmotriti njihovu dinamiku i porast temperature u funkciji vremena. Tu se kao vrlo važne mjere pokazuju monitoring situacije u tunelu, vrijeme dolaska intervencijskih ekipa i intervencije u režimu rada ventilacijskog sustava ovisno o stvarnim okolnostima.

Dodatni faktor rizika u tunelima predstavlja i povećanje požarnog opterećenja. Optimiranje prijevoza zbog smanjivanja troškova doprinosi boljem iskorištenju tovarnog prostora vozila, odnosno do prakse krcanja teretnih vozila do njihovog maksimalno dozvoljenog opterećenja. Tome se može pridodati i uporaba sve većih HGV i postepeni nestanak malih kamiona s duljih ruta na autocestama. U slučaju tegljača s poluprikolicom koji prevozi 25-30 t tereta s toplinskim sadržajem od 18 GJ/t, ukupno požarno opterećenje iznositi će 450-540 GJ. Korištenjem veze između raspoložive energije za izgaranje i vršne *HRR* [22], očekivana maksimalna toplinska snaga požara može tada doseći 400-500 MW. Pri ovakvoj toplinskoj snazi, lako može doći do promjene režima izgaranja iz potpunog u nepotpuno i do s time povezanih negativnih utjecaja. Ovakav trend promjena će se vjerojatno nastaviti s daljnjim porastom prometa i još većim iskorištavanjem prometne infrastrukture. Kao što je već spomenuto u uvodnom dijelu, tako se umjesto dosadašnje maksimalne veličine HGV mase do 44 t i duljine 16,5 m (18,75 m s prikolicom)[130], u EU se razmatra uvođenje novih poluprikoličara (LHV) ukupne mase do 60 t i duljine do 25,25 m zbog povećanja učinkovitosti prijevoza i smanjenja troškova[131], što su neke zemlje EU već prihvatile.

Sljedeći problem predstavlja rizik zagušenja prometa nakon akcidenta. Pod terminom zagušenje podrazumijeva se sporo gibanje vozila u koloni, povremeni zastoji ili povremeni prekidi gibanja s duljim stajanjima. Parametri kojima se obično definira kvaliteta cestovnog prometa su:

- prometno opterećenje ili volumen prometa (vozila/sat),
- gustoća prometa (vozila/km),
- brzina (km/h).

Zbog potencijalnih posljedica zagušenosti prometa u slučaju akcidenta, kvaliteta prometa mora biti glavni kriterij monitoringa prometa, kako bi se detektirali kritični periodi zagušenosti i pripremile mjere kojima se može utjecati na kvalitetu prometa općenito i u trenucima zastoja. Rizik akcidenta posebno je visok u fazi stvaranja zastoja. Visoka gustoća prometa nesporno povećava razinu rizika i razumno je očekivati da će ona prouzrokovati da u akcidentu sudjeluje veći broj vozila nego kod niske gustoće prometa. Iz već prezentiranih podataka o većim akcidentima u tunelima [12] vidi se da je u najvećem broju takvih slučajeva u akcidentu sudjelovalo po nekoliko vozila.

[130] U pojedinim zemljama EU ima manjih odstupanja od ovih (najčešćih) granica.
[131] As of January 2009, the European Union was considering the conclusions of an European Commission (EC) instigated report, which recommended raising limits EU wide to 60-tonnes and 25,25m, for reasons of cost-effectiveness. This would require approval of the EU Council of Ministers and the European Parliament. http://www.waterside.kuumaa-suhdetta-deitti.info/p-Longer_Heavier_Vehicle

5.1.8 Požar zapaljivih tekućina

Požar zapaljive tekućine[132] u tunelu, klasa 3 prema ADR [101], dobro je poznat iz stvarnih događaja i iz eksperimenata. Scenarij događanja pri ovom požaru donekle je sličan scenariju komprimiranih ili ukapljenih zapaljivih plinova i kao krajnju konsekvenciju može imati eksploziju oblaka para (VCE). Ipak, najčešće to neće biti slučaj.

Požar zapaljive tekućine, čak i kod tekućina s visokim plamištem, ima karakteristiku vrlo brzog razvoja. Za procjenu razvoja ovih požara koriste se HC ili HCM krivulja[133], koje nakon ≈ 30 minuta u potpuno razvijenom požaru pokazuju temperature od 1100 ^{0}C odnosno 1300 ^{0}C u zoni plamena. Ako je u pitanju velika količina zapaljivih tvari, obično se koristi HCM ili RWS krivulja (s porastom temperature do cca 1350 ^{0}C u potpuno razvijenom požaru). Ova temperatura postignuta je i u eksperimentima u Runehamaru. Najveća količina zapaljivih tekućina u cestovnom prometu sastoji se od uobičajenih goriva: naftnih derivata (benzin, diesel-gorivo, EL-loživo ulje, kerozin) i alkohola. Ostali dio uglavnom su različite industrijske kemikalije, koje se obično prevoze u spremnicima za zapaljive opasne tekućine. Spremnici za ove kemikalije su posebno zaštićeni, da se rizik probijanja što više smanji.

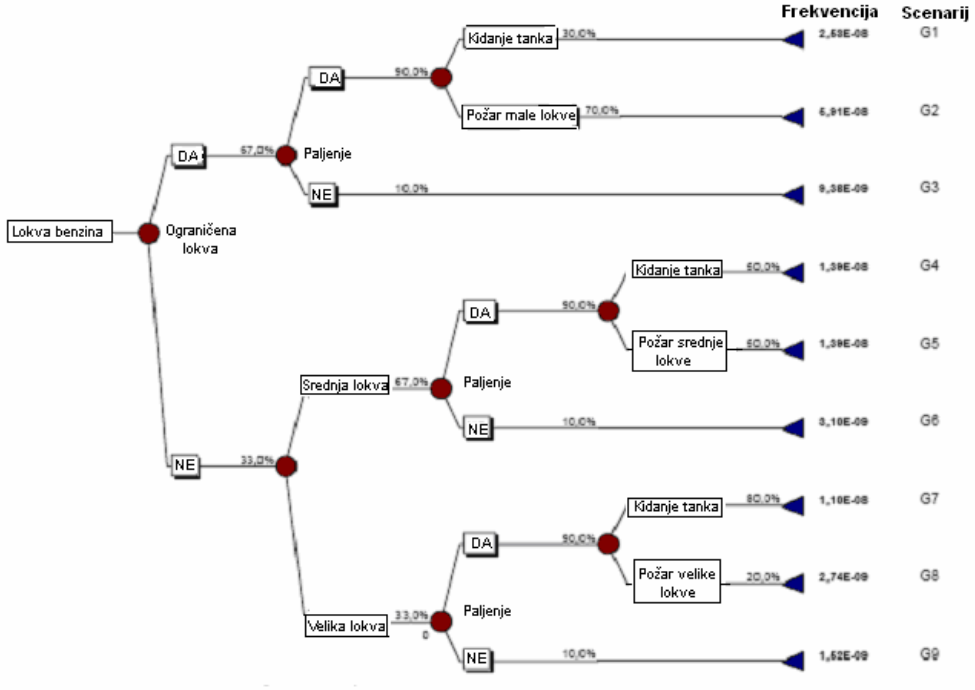
Spremnici autocisterni za motorna goriva, loživo ulje, alkohole i brojne druge kemikalije moraju se projektirati i izraditi u skladu s poglavljem 6.8 ADR [101], što znači da se za njihovu izradu koriste adekvatni materijali (nehrđajući čelik, aluminijske legure). Za te se materijale navode odgovarajuće debljine, a za specijalne kemikalije su u poglavlju 6.8.4 navedeni posebni zahtjevi. Tako npr. školjka spremnika za ukapljene plinove mora biti izrađena od nehrđajućeg čelika kao tlačna posuda, ali nema zahtjeva za dvostrukom stijenkom. Podaci o tehničkoj opremi za autocisterne mogu se naći i u TRbF 60 [157] – mobilni spremnici. Ako u akcidentu sudjeluje autocisterna, ispuštanje zapaljivih tekućina ovisiti će prvenstveno o stupnju i mjestu oštećenja spremnika na vozilu. Požari i drugi akcidenti autocisterni na autocestama i na normalnim cestama nisu neuobičajeni događaji.

Na slici 5.15 prikazan je primjer kvantitativne analize rizika za procjenu rizika pri prometu opasnih tvari (zapaljivih tekućina), Persson [158], primijenjen na svaki od scenarija u „event tree[134]“ analizi izrađenoj prema uzorku koji je razradio Rasmussen godine 1994[135]. U „event tree“ su svakom od primjenjivih scenarija dodijeljene odgovarajuće vjerojatnosti. Karakteristike požara lokve opisane su u tablici 5.18. Neovisno o tome što je vjerojatnost nastupa svakog od scenarija relativno niska, očekuje se da bi u slučaju sudara jedan od scenarija opisanih u „event tree“ bio realiziran.

Tablica 5.18. Parametri požara lokve u „event tree“ analizi [158]

Opis/veličina lokve	Površina lokve, m^2	Toplinska snaga *HRR*, MW
Mala lokva	10	17
Srednja lokva	30	50
Velika lokva	100	170
Kidanje spremnika	180	300

[132] *Zakon o zapaljivim tekućinama* [155] i *Pravilnik o zapaljivim tekućinama* [148] zapaljive tekućine dijele na lako zapaljive (plamište ≤ 38 ^{0}C) i gorive tekućine (plamište > 38 ^{0}C).
[133] Standardne krivulje porasta temperature u požaru tunela prikazane su na slici 5.6.
[134] Stablo događanja.
[135] Projekt Södra Länken u Stockholmu, Rasmussen, 1994.



Slika 5.15. „Event tree“ za scenarije s benzinom [158]

Proračunom je *HRR* određena prema izrazu (5.16) tako što je usvojeno da je $\dot{m}''_f = \dot{m}''_{f\infty} = 0{,}055$ kg/m^{2}s (za velike lokve), a efikasnost izgaranja $\eta = 0{,}7$.

$$HRR = \eta \, \dot{m}''_f A_f H_c \tag{5.16}$$

Iz tablice 5.18 vidi se da požar male lokve benzina prema toplinskoj snazi odgovara za *HRR* = 17 MW, što je približno jednako toplinskoj snazi furgona i osjetno je više od *HRR* pri požaru osobnog vozila. Gašenje požara razlivene lokve površine 100 m^2, snage 170 MW, monitorom za pjenu zahtijeva prema EN 13565-2 [159] gustoću primjene od 6-12 L/m^{2}min tijekom najmanje 30 minuta, tj. protok otopine pjene od 600-1200 L/min, što u uvjetima tunela predstavlja težak zadatak za vatrogasnu službu.

5.2 Eksplozije zbog ispuštanja plina ili stvaranja para

5.2.1 BLEVE i VCE eksplozija

Terminom BLEVE naziva se fenomen naglog kidanja tlačne posude u kojoj se nalazi zapaljiva tekućina/para pri temperaturi koja je znatno viša od njenog vrelišta pri normalnom atmosferskom tlaku, a u ukapljenom stanju nalazi se zbog toga što je pod povišenim tlakom. Nagli pada tlaka snižava vrelište tekućine na temperaturu koja je niža od temperature okoline, pa tekućina počinje žestoko ključati i isparivati sve dok se ne ohladi do vrelišta koje odgovara atmosferskom tlaku, kada nastavlja s normalnom evaporacijom. Ako je tlačna posuda izložena zagrijavanju u požaru[136], u njoj će narasti temperatura i tlak, što će uzrokovati

[136] Tlačna se posuda može raskinuti i zbog vanjskog mehaničkog udara ili korozije, no u tunelima su to znatno rjeđi slučajevi nego požar.

otvaranje sigurnosnog ventila i postepeno ispuštanje sadržaja uz približno konstantni tlak. Sve dok unutarnju površinu plašta posude koja je izvana u kontaktu s plamenom oplakuje tekuća faza, tekućina će apsorbirati toplinu, isparivati i odušivati se kroz sigurnosni ventil. Kad se razina tekućine dovoljno spusti, tako da unutarnja površina plašta koja je izvana izložena plamenu bude u kontaktu s parnom fazom, hlađenje više nije dovoljno intenzivno i temperatura materijala plašta počinje rasti. Nakon što se materijal plašta zagrije do točke popuštanja, koja prema API 2021 [160] za čelik iznosi 425-480 ^{0}C, spremnik će se gotovo trenutno raskinuti na tom mjestu. Kidanje cilindričnog plašta u pravilu se nastavlja kružno po obodu, a plašt se rastavlja na dva dijela. Pritom će doći do naglog pada tlaka tekućine koja se prvobitno nalazila u ravnotežnom (tekućem) stanju pri povišenom tlaku i do trenutnog otparavanja medija[137], što će stvoriti oblak para. Ako je tekućina zapaljiva, oblak će se zapaliti, a požar prenijeti na čitav sadržaj spremnika i stvoriti ogromnu vatrenu loptu. Fragmenti spremnika će se razletjeti kao dijelovi velike granate na udaljenosti i do nekoliko stotina metara ako su na otvorenom prostoru. U slučaju direktnog izlaganja plamenu, vrijeme do kidanja nehlađene neizolirane površine spremnika obično iznosi 10-30 minuta [160].

Masa otparka se uz pretpostavku adijabatske promjene stanja može odrediti pomoću izraza (5.17), Knežević [161]:

$$m_{otp} = m_{tek} \cdot \frac{h_{tek} - h_{otp}}{r_{isp}} \tag{5.17}$$

U konkretnom slučaju, tlak tekućine je prvobitni tlak medija u spremniku neposredno prije trenutka kidanja i približno je jednak tlaku otpuštanja sigurnosnog ventila, a konačni tlak je jednak okolnom atmosferskom tlaku. Udio otparka u masi sadržaja spremnika predstavljen je za propan i za n-butan na slici 5.16.

Za tekućine i ukapljene plinove čije je vrelište pri atmosferskom tlaku niže od cca - 57 ^{0}C, može se smatrati da će se u otparak pretvoriti praktički cjelokupni sadržaj spremnika, Nelson [162]. Eksperimenti Hasegawa i Sato [163] potvrdili su da će čitava masa fluida u spremniku izgorjeti u BLEVE vatrenoj lopti ako je količina otparenog fluida veća od 36%. Isti autori razvili su i korelaciju između mase ugljikovodika u posudi i osobina vatrene lopte (veličina lopte, trajanje i intenzitet zračenja).

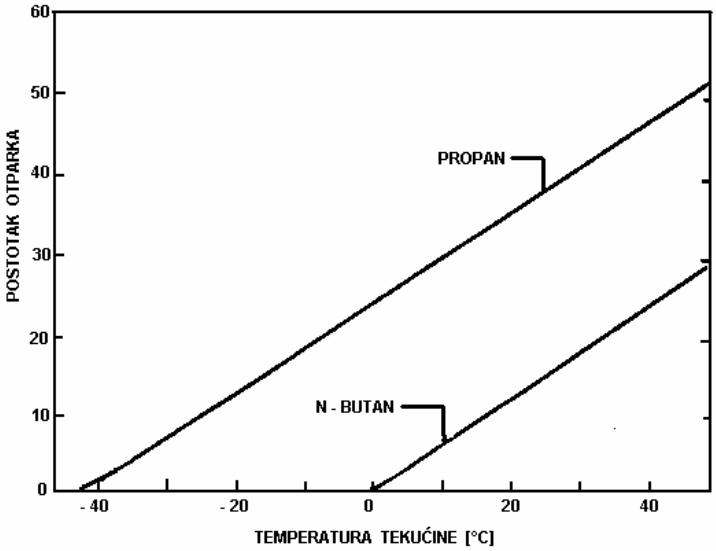
Za zaštitu tlačnih posuda od djelovanja požara i kidanja postoje 4 najvažnije metode:

- Nagib terena podloge takav da tekućina otječe i ne izgara ispod spremnika. Primjena ove metode moguća je pri gradnji prometnice u tunelu.
- Toplinska izolacija spremnika. Primjena ove metode moguća je pri gradnji autocisterne.
- Ispuštanje medija. Primjena ove metode praktički je nemoguća u tunelu.
- Zalijevanja vodom površine spremnika izvana.

Posljednja metoda u stvarnosti jedina koju intervencijsko osoblje i vatrogasci mogu koristiti pri akcidentu u tunelu. Bitno je da se hlađenje primijeni što ranije i da se upravo površine izložene direktno plamenu hlade s najmanje 10 L/m^{2}min, Kletz [164]. Ako to nije moguće postići, intervencijsko osoblje može biti izloženo neprihvatljivo visokom riziku, pa je voditelj intervencije u teškoj situaciji da na temelju redovito manjkavih podataka donese dalekosežnu odluku: intervencija ili povlačenje. Budući da je tunel zapravo zatvoreni prostor, posljedice

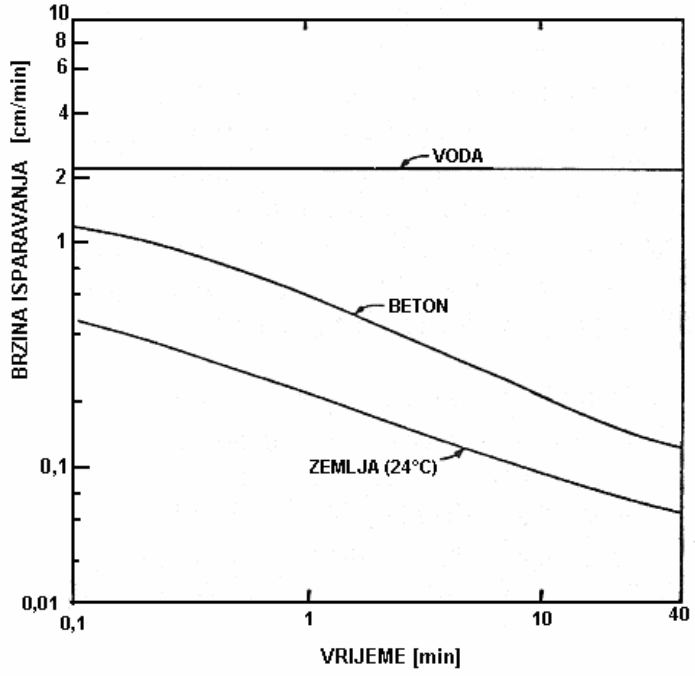
[137] Instantaneous vaporization, flash vaporization, steam flashing.

BLEVE vatrene lopte teško je zamisliti drugačije nego kao totalni gubitak ljudskih života u tunelu.



Slika 5.16. Postotak otparka (adijabatski) u odnosu na temperaturu tekućeg medija [165]

Ispuštanje bilo koje zapaljive tekućine može uzrokovati stvaranje oblaka zapaljivih para (tj. mješavine para i zraka s koncentracijom između donje i gornje granice zapaljivosti), ako je temperatura tekućine viša od njenog vrelišta. Vrelišta uobičajenih tekućina obično su viša od normalnih temperatura okoline, pa će se stvoriti samo ograničena količina para, ovisno o parnom tlaku tekućine. Eksplozija oblaka para (VCE) može nastati samo ako je isparjela dovoljna količina para zapaljive tekućine da sa zrakom stvori eksplozivnu smjesu.



Slika 5.17. Brzina isparivanja lokve propana na različitim podlogama [165]

Rizici s ukapljenim plinovima su bitno veći nego s tekućinama, budući da se oni gotovo uvijek pohranjuju i transportiraju pri temperaturama višim od njihovog vrelišta i plamišta[138]. Stoga će svaki ukapljeni plin ispušten u atmosferu stvoriti oblak zapaljivih para. Koji će dio oblaka para biti zapaljiv, ovisi o brzini oslobađanja para u atmosferu, osobinama para, vremenskim prilikama i specifičnim uvjetima okoliša. Kod istjecanja rashlađenih ukapljenih plinova, brzina isparivanja ovisit će uglavnom o brzini prijelaza topline s površine terena na tekućinu. Indikativne brzine isparivanja su na slici 5.17, Martinsen i sur. [165].

Paljenje i eksplozija ne moraju nastupiti odmah, već će se to dogoditi tek kada oblak para dođe do izvora paljenja. Kako se u tunelu redovito nalazi veći broj vozila pogonjenih motorom s unutarnjim izgaranjem, izvora zapaljenja ima u izobilju i eksplozija je neizbježna. Što je period između početka istjecanja i paljenja dulji, istekla količina para ili plina biti će veća, a eksplozija jača. Da bi do paljenja uopće došlo, plamište isparenog fluida mora biti niže od temperature zraka, no to je redovito slučaj. Niže plamište obično je vezano s višim parnim tlakom pri nekoj temperaturi okoline, pa će se u takvim uvjetima eksplozivna koncentracija mješavine para-zrak lokalno stvoriti brže i sigurnije. Vezu između parnog tlaka i okolne temperature daje Clausius-Clapeyronova jednadžba, Kanury [166]:

$$\ln \frac{p_{otp}}{p_{tek}} = \frac{h_{isp}}{R_T \left(1/T_{tek} - 1/T_{otp}\right)} \tag{5.18}$$

Za mnoge nepolarne organske tekućine utvrđeno je da je specifična molna entropija isparivanja univerzalna empirijska konstanta. Posljedica toga je da postoji nepromjenjiv empirijski omjer između normalne topline vrenja i temperature isparivanja, pa je:

$$\frac{h_{isp}}{R_t T_{isp}} \approx \text{konstanta} = 10{,}18 \tag{5.19}$$

Ovo je poznato kao Troutonovo pravilo, koje omogućava da se toplina isparivanja odredi uz poznatu temperaturu isparivanja i molekularnu masu tekućine [166]. Od ovog pravila odstupaju jake polarne tekućine (npr. voda, alkoholi), tj. Troutonova konstanta je za alkohole veća od 10,18, a za kiseline manja.

Isparivanje prolivene tekućine (za uobičajene tekućine, kojima je vrelište više od normalnih temperatura okoline) biti će to brže, što je temperatura tekućine u lokvi viša, tj. bliža vlastitom vrelištu. Budući da je tunel djelomice otvorena građevina u kojoj uvijek postoji strujanje zraka, biti će potrebno više vremena da mješavina para i zraka dođe do donje granice eksplozivnosti nego u zatvorenom prostoru. Za intervencijsko je osoblje bitno da zna da akcident koji uključuje prolijevanje zapaljive tekućine može uvijek biti uzrok eksplozije. Stoga je vrlo važno mjeriti koncentraciju para u struji zraka nizvjetreno od mjesta akcidenta, no to treba izvoditi uz dužne mjere opreza.

5.2.2 Opasnosti eksplozije oblaka para

Ispuštanje veće količine zapaljivog plina ili para u atmosferu tunela uzrokovati će, barem privremeno, stvaranje zapaljivog oblaka. Paljenje oblaka plina/para može rezultirati

[138] Plinovi koji se transportiraju u pothlađenom stanju s temperaturom koja je približno jednaka njihovom vrelištu pri atmosferskom tlaku ponašaju se kao normalna vrlo hladna tekućina koja u toplom okolišu može hitro ispariti, ali neće doći do naglog otparavanja zbog pada tlaka.

deflagracijom ili detonacijom. Pod izvjesnim, ne posve poznatim uvjetima, rezultat paljenja biti će širenje plamena koje je dovoljno brzo da se stvore destruktivni tlakovi i udarni valovi. Kvalitativno gledano, uvjeti za nastanak eksplozije oblaka para su velika količina plina/para „spremna“ da eksplodira i snažan izvor paljenja ili vrlo „opstruktivan“ okoliš koji podržava ubrzavanje plamena inducirano turbulencijom. U svim poznatim eksplozijama oblaka para sudjelovalo je najmanje 100 kg zapaljivog plina, a količine od 1000-10000 kg bile su najčešće, Zalosh [167]. Analiza tlačnih valova stvorenih propagacijom plamena kroz oblak para upućuje na zaključak da je za nastanak eksplozije potrebna brzina plamena od najmanje 100 m/s da bi se time stvorili potencijalno destruktivni tlakovi veći od 0,1 bar, Lee i sur. [168]. Najvjerojatniji scenarij u tunelu bile bi brzine plamena od nekoliko stotina m/s, što dovodi do tzv. kvazidetonacije.

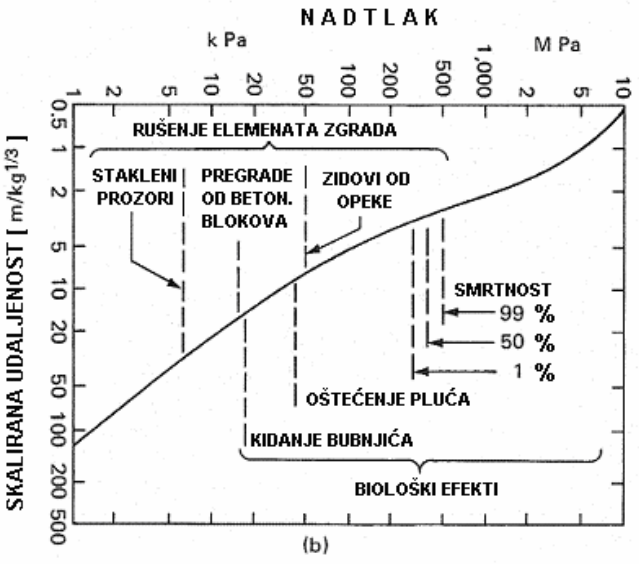
Najčešća metoda za procjenu efekata udarnog vala eksplozije oblaka para je uporaba modela idealnog udarnog vala (točkastog izvora) baziranog na energiji udarnog vala, tj. na ekvivalentnoj energiji odgovarajuće količine TNT-a. Pritom se uzima u obzir samo manji dio energije oblaka para (β), a učinci se računaju prema tlakovima u ovisnosti o udaljenosti od centra eksplozije, jer su oni poznati za TNT. Ova energija data je za masu para m_f s toplinom izgaranja H_c kao:

$$E = \beta H_c m_f \tag{5.20}$$

Odgovarajuća ekvivalentna masa TNT-a je:

$$m_{TNT} = \frac{E}{4{,}2} \tag{5.21}$$

Na slici 5.18 prikazani su idealni nadtlakovi udarnog vala u odnosu na udaljenost od centra skaliranu s trećim korijenom m_{TNT} u skladu s teorijom idealnog udarnog vala, što znači da se skalirana udaljenost množi s $m_{TNT}^{1/3}$.



Slika 5.18. Idealni nadtlakovi udarnog vala prema skaliranoj udaljenosti od centra na otvorenom [167][139]

[139] Nadtlakovi na slici 5.18. su nadtlakovi reflektiranih udarnih valova povezani s refleksijom upadnog udarnog vala od čvrste površine okomite na smjer širenja vala.

Doprinos β, udio energije izgaranja oblaka plina koji doprinosi stvaranju udarnog vala, normalno iznosi 1-5%.

S obzirom na relativno zatvoreni prostor tunela i na mnoge prisutne izvore paljenja, u pravilu se može očekivati nastanak eksplozije oblaka para, a udarni tlakovi mogli bi biti viši od onih koji su prikazani za otvorene prostore. Ipak, i iz ovog jednostavnog modela prikladnog za događaje na otvorenom, jasno je da učinci takve eksplozije mogu biti uništavajući. U tablici 5.19 prikazani su efekti za ljude, Koinig [145], što potvrđuje da je eksplozija u tunelu fatalni događaj na obje strane od mjesta akcidenta.

Tablica 5.19. Učinci udarnog tlaka na ljude [145]

Tlak		**Učinci na ljude**
Bar	**kPa**	
0,006	0,6	Orkan snage 12
0,01	1	Udar vjetra ruši stojeću osobu (150 km/h)
0,03	3	Moguće lakše ozljede od razbijenog stakla
0,07	7	Bez ozljeda na otvorenom
0,08-0,09	8-9	Udar vjetra baca ležeću osobu (360 km/h)
0,17	17	1% oštećenje bubnjića
0,19	19	10% oštećenje bubnjića
0,21	21	10% mrtvih i ozlijeđenih na otvorenom
0,30	30	Mrtvi i ozlijeđeni u srušenim kućama
0,34	34	25% mrtvih i ozlijeđenih na otvorenom
0,44	44	50% oštećenje bubnjića
0,48	48	70% mrtvih i ozlijeđenih na otvorenom
0,84	84	90% oštećenje bubnjića
1,0	100	90% mrtvih i ozlijeđenih na otvorenom, 1% kidanje pluća
2,0	200	99% kidanje pluća

Trajanje same eksplozije (VCE) je u pravilu nekoliko sekundi. Osim udarnog učinka, velika količina energije rasprostirati će se putem toplinskog zračenja i konvekcijom plinova. Da bi se procijenio promjer vatrene lopte na otvorenom prostoru, analizirani su podaci o akcidentima i uspostavljene empirijske korelacije između mase goriva (m) i veličine, trajanja te intenziteta zračenja vatrene lopte, Hasegawa i Sato [169]:

- Za maksimalni promjer vatrene lopte: $D_{max} = 5{,}25\ m^{0{,}314}$ (5.22)

- Za trajanje toplinskog zračenja: $t_{1/2} = 1{,}07\ m^{0{,}181}$ (5.23)

- Za toplinski tok: $\dot{q}''_{max} = 828\ m^{0{,}771}/r^2$ (5.24),

pri čemu je r udaljenost od vatrene lopte.

Nizozemski institut TNO [145] došao je do izraza koji u realnim situacijama daju osjetno veće vrijednosti za promjer vatrene lopte (D_{max}) i za njeno trajanje ($t_{1/2}$):

$$D_{max} = 6{,}48\ m^{0{,}325} \quad (5.25)$$

$$t_{1/2} = 0{,}852\ m^{0{,}26} \quad (5.26)$$

Vatrena lopta nastala u tunelu širit će se na obje strane zajedno sa širenjem mješavine plina i zraka, a s njom će se rasprostirati i udarni val. U stvarnom BLEVE akcidentu koji se dogodio 1973. u Kingman Arizona, kad je na otvorenom prostoru eksplodirao vagon-cisterna sa 16 t ukapljenog propan/butana (UNP), nastala je po proračunu u skladu s TNO metodom vatrena lopta promjera 150 m i volumena 1,8 miliona m^3, a u nekim se izvještajima spominje promjer lopte od čak 300 m, Sharry i Walls [170]. Za usporedbu, tunel Učka, duljine 5062 m i površine poprečnog presjeka 54 m^2 ima volumen od 273 000 m^3, što je čak 6,5 puta manje. Očito je da bi u takvim okolnostima plamena fronta zahvatila čitavu duljinu tunela, te da bi učinci toplinskog zračenja i vrućih izgarnih plinova imali ekstremne posljedice po živote ljudi koji bi se zatekli u unutrašnjosti tunela. Detaljniji prikaz daju Kaiser i sur. [171].

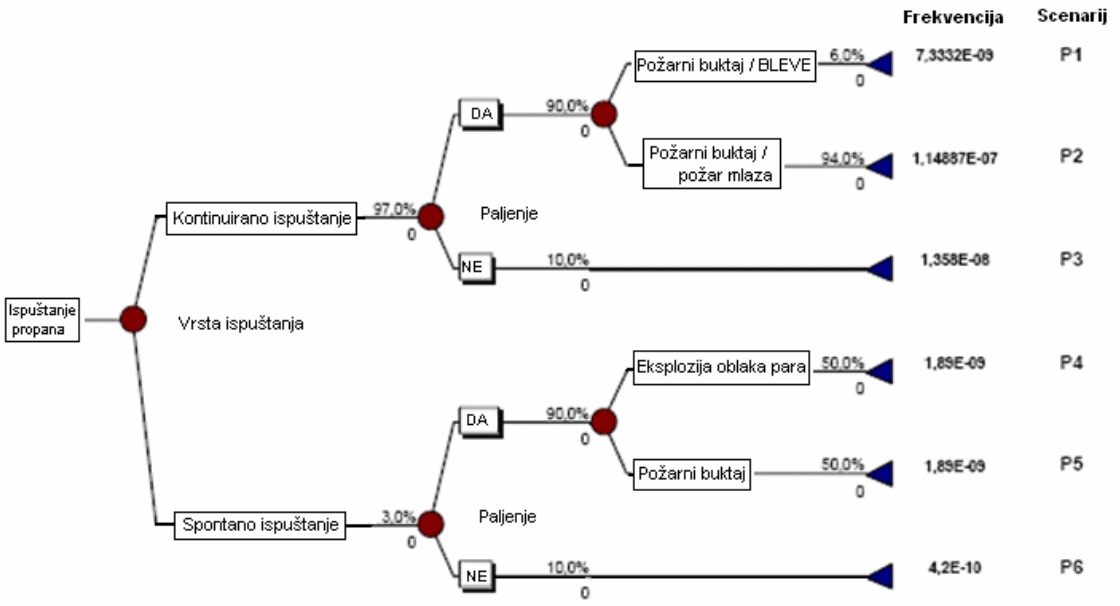
S gledišta sigurnosti, eksplozija je događaj kojem se zbog brzine djelovanja nije moguće suprotstaviti, pa se može očekivati da će nastupiti veći broj ozljeda različitog intenziteta kod mnogih prisutnih osoba, uključujući one sa smrtnim ishodom. Akcije se u tom slučaju moraju koncentrirati na ublažavanje posljedica. U slučaju ispuštanja samo manje količine ukapljenog plina, nakon „eksplozije“ oblaka para[140], iznad zone ispuštanja iz transportnog spremnika uspostaviti će se slobodno istjecanja mlazom ili požar lokve. Obje ove situacije zahtijevaju posebne taktike pristupa. Načelno gledano, požar plina u zatvorenom prostoru treba pokušati ugasiti jedino u slučaju ako je prethodno ili istovremeno moguće spriječiti njegovo istjecanje.

Teoretski i konzervativno gledano, ako se pretpostavi potpuno miješanje određenog plina/para sa zrakom u tunelu, moguće je, ako je poznata brzina istjecanja (kg/s), odrediti dvije granice izvan kojih prosječna mješavina plina i zraka neće biti eksplozivna. Ako su brzina istjecanja i isparivanja dovoljno male, koncentracija oblaka neće doseći donju granicu zapaljivosti, a ako su brzina istjecanja i isparivanja velike, prosječna koncentracija može premašiti gornju granicu zapaljivosti. U slučaju ispuštanja npr. propana, koji je u zraku eksplozivan u granicama od 2,1–9,5% vol., Zalosh [167], za tunel poprečnog presjeka 54 m^2 (npr. Učka) i brzinu strujanja zraka od 1 m/s, uz pretpostavku da je miješanje idealno, eksplozivna mješavina neće se stvoriti ako je brzina ispuštanja plina manja od cca 1,7 kg/s, niti ako je veća od cca 7,8 kg/s. U stvarnoj situaciji treba uzeti u obzir da pretpostavka potpuno uniformnog miješanja plina i zraka nije realna, tako da će u tunelu nesporno postojati „džepovi“, dijelovi prostora nepoznatih volumena i oblika u kojima će koncentracija plina biti unutar granica eksplozivnosti. Ove zone predstavljaju potencijalnu opasnost za nastanak lokalne eksplozije/ buktaja, koja bi zatim vrlo vjerojatno izazvala širenje izgaranja na čitav prostor tunela.

Jedan od najvažnijih faktora u scenariju ispuštanja plina ili para je vrijeme paljenja, iako valja uzeti u obzir i malo vjerojatni scenarij da do paljenja uopće ne dođe, bilo zbog odsutnosti izvora paljenja ili zbog koncentracije plina/para izvan granica zapaljivosti. Na tijek događaja značajno će utjecati i temperatura ukapljenog plina. Ako je u pitanju UNP, vjerojatno najčešće transportirani zapaljivi plin, bitan utjecajni faktor je i temperatura pri kojoj se prevozi, odnosno da li je u ukapljenom stanju kao pothlađena tekućina ili ga u ukapljenom stanju održava tlak u spremniku[141]. Na slici 5.19 prikazani su mogući scenariji akcidenta s UNP-om (event tree), uz pretpostavku da se plin u ukapljenom stanju nalazi zbog povišenog tlaka.

[140] Ovdje se u pravilu radi o „požarnom buktaju“ (flash fire), koji NFPA 2113 [172] definira kao: Požar koji se brzo širi kroz difuzno gorivo, kao što su npr. prašina, plin ili pare zapaljive tekućine, bez stvaranja tlaka koji izaziva oštećenja. Požarni buktaj ima toplinski tok od približno 2 cal/cm^2s (84 kW/m^2) tijekom relativno kratkog vremenskog perioda, tipično kraćeg od 3 sekunde. Požarni buktaj se može dogoditi u okolišu u kojem su gorivo i zrak izmiješani u odgovarajućim koncentracijama za izgaranje.

[141] UNP je (uglavnom) mješavina propana i butana, kojoj se osobine značajno mijenjaju s promjenom sastava (udjela plinova), što određuje proizvođač prema godišnjem dobu. Tako je npr. ravnotežni tlak čistog propana pri -42,2 ^{0}C nula, dok pri 27 ^{0}C (300 K) on iznosi 8,9 bara. Pri 300 K mješavina sa 70% propana i 30% butana imati



Slika 5.19. „Event tree“ za scenarije s ukapljenim propanom, Persson [158]

U ovom event tree prikazan je razvoj događanja za slučaj kontinuiranog ispuštanja kroz pukotinu manjih dimenzija (promjer 20 mm) i za slučaj spontanog ispuštanja cjelokupnog sadržaja (kidanje velikog spremnika). U slučaju kontinuiranog ispuštanja kroz pukotinu na spremniku daljnji tok događanja može biti:

- Do paljenja dolazi ubrzo nakon akcidenta. Stvara se požarni buktaj, a zatim požar mlaza koji istječe (baklja). Eksplozija se ne može dogoditi jer plin kontinuirano izgara. Ako plamen liže tlačni spremnik (vlastiti ili drugi), može naknadno nastati BLEVE.
- Do paljenja dolazi ubrzo nakon akcidenta. Stvara se požarni buktaj, a zatim požar mlaza koji istječe (baklja). Požar mlaza ostaje aktivan sve dok ima goriva ili dok ne bude ugašen.
- Plin istječe u mlazu, ali se ne pali. Rizik od eksplozije je vrlo velik, a mogućnosti za uklanjanje rizika minimalne (jedino zatvaranje pukotine i ventiliranje).

U slučaju spontanog ispuštanja cjelokupnog sadržaja cisterne, vjerojatnost zapaljenja je vrlo velika, a tok događanja može biti:

- Eksplozija oblaka plina, mješavine plina sa zrakom, koja je nastala kao posljedica turbulentnog strujanja u tunelu i difuzije plinova.
- Požarni buktaj inicijalno nastalog otparka i dalje požar lokve ukapljenog plina.
- Evaporacija čitave količine ispuštenog plina stvara veliki oblak zapaljive mješavine plin-zrak, koji je, ako se ne zapali, moguće ukloniti jedino postepenim razrjeđivanjem zrakom (ventilacijom).

Iz event tree se jasno vidi da istjecanje zapaljivih ukapljenih plinova uključuje vrlo velike rizike za živote ljudi, ali i za samu građevinu.

će ravnotežni tlak 6,7 bara, a ona s 30% propana i 70% butana 3,8 bara. Za mješavinu 50/50%, ravnotežni tlak pri -29 ^{0}C je nula, a pri 300 K je 5,2 bara.

5.3 Ispuštanje toksičnih tvari

Ispuštanje toksičnih tvari u tunelu kao posljedica akcidenta ugroziti će osobe u tunelu prvenstveno putem udisanja zraka. Ugrožavanje putem kože je daleko niže i zanemarivo u odnosu na izlaganje respiratornih organa[142]. Za procjenu efekata izlaganja ljudi toksičnim tvarima koriste se tablice s koncentracijama (PAC[143]) koje je DOE razvio upravo za tu svrhu [173]. Akcidentne granice izlaganja (PAC) svrstane su u tri baze podataka: AEGL[144], ERPG[145] i TEEL[146]. Ove granice bitne su kao polazna osnova za planiranje scenarija pri nekontroliranom ispuštanju opasnih tvari. Usporedba njihovih podataka s procijenjenim vremenom i koncentracijom izlaganja pruža informacije potrebne za identifikaciju i procjenu težine akcidenta, planiranje zaštitne i/ili spasilačke akcije i predviđanje mogućeg ishoda. Prema prioritetu, Direktiva DOE [174] i prateće upute traže uporabu redom:

1- Uputa za akutne razine izlaganja (AEGL),
3- Privremenih granica izlaganja pri akcidentu (TEEL).
2- Uputa za planiranje odgovora na akcidente (ERPG),

AEGL vrijednosti predstavljaju granice izlaganja kemikalijama u zraku za opću populaciju i primjenjive su za periode izlaganja od 10 minuta pa do 8 h. Preporučene vrijednosti AEGL-1, AEGL-2 i AEGL-3 odnose se na različite težinske učinke toksičnosti. Smatra se da su, osim za opću populaciju, primjenjive i za posebno osjetljive osobe kao što su npr. dojenčad, djeca i starije osobe. Koncentracije niže od AEGL-1 mogu stvoriti blagi i postepeno rastući ali prolazni i neonesposobljavajući podražaj mirisa, okusa ili neki senzorni podražaj, odnosno neke asimptomatske, nesenzorne učinke. Porastom koncentracije iznad svake AEGL razine raste vjerojatnost pojavljivanja učinaka iz sljedeće razine.

AEGL-1 je koncentracija neke tvari u zraku (ppm ili mg/m^3), iznad koje se očekuje da bi opća populacija, uključujući osjetljive osobe, mogla osjetiti primjetnu neugodu, iritaciju ili neke asimptomatske nesenzorne učinke. Ovi učinci nisu onesposobljavajući, već su prolazni i nestaju s prestankom izlaganja.

AEGL-2 je koncentracija neke tvari u zraku (ppm ili mg/m^3) iznad koje se očekuje da bi opća populacija, uključujući osjetljive osobe, mogla osjetiti ireverzibilne ili druge ozbiljne dugotrajne negativne učinke po zdravlje ili doći u stanje umanjene sposobnosti za bijeg.

AEGL-3 je koncentracija neke tvari u zraku (ppm ili mg/m^3) iznad koje se očekuje da bi opća populacija, uključujući osjetljive osobe, mogla osjetiti učinke po zdravlje koji ugrožavaju život ili izgubiti život.

ERPG vrijednosti su namijenjene za realističku procjenu negativnih učinaka koji se normalno mogu očekivati kao posljedica izlaganja pojedinim koncentracijama specifičnih tvari i ne sadrže faktor sigurnosti koji je obično uključen u preporučene granice izlaganja.

[142] Razvijena površina plućnih alveola iznosi 70-100 m^2, a površina kože čovjeka 1,7-2 m^2. Uz to je sluznica alveola neusporedivo manje otporna na prodor kemikalija nego ljudska koža.
[143] PAC, *Protective Action Criteria* sadrže bazu podataka za 3388 kemikalija.
[144] AEGL, *Acute Exposure Guideline Levels*. Objavljuje ih američka Agencija za zaštitu okoliša (U.S. EPA) za 5 vremenskih perioda izlaganja: 10 minuta, 30 minuta, 60 minuta, 4 h i 8 h. Za svrhe PAC normalno se koriste 60-minutne vrijednosti.
[145] ERPG, *Emergency Response Planning Guidelines*. Objavljuje ih American Industrial Hygiene Assn. (AIHA), Emergency Planning Committee.
[146] TEEL, *Temporary Emergency Exposure Limits*. Objavljuje ih DOE Office of Emergency Management (NA-41).

ERPG-1 je maksimalna koncentracija neke tvari u zraku, za koju se vjeruje da do njene razine gotovo sve osobe mogu biti izložene najviše 1 h, a da pritom ne osjete ništa osim blagih prolaznih negativnih učinaka po zdravlje ili jasno određeni neugodan miris.
ERPG-2 je maksimalna koncentracija neke tvari u zraku, za koju se vjeruje da do njene razine gotovo sve osobe mogu biti izložene najviše 1 h, a da pritom ne dođe do razvoja ireverzibilnih ili drugih ozbiljnih učinaka po zdravlje ili simptoma koji bi mogli umanjiti sposobnost te osobe da poduzme akciju u svrhu vlastite zaštite.
ERPG-3 je maksimalna koncentracija neke tvari u zraku, za koju se vjeruje da do njene razine gotovo sve osobe mogu biti izložene najviše 1 h, a da pritom ne dođe do razvoja zdravstvenih učinaka koji bi joj ugrozili život.

TEEL vrijednosti su namijenjene za privremenu uporabu, dok se za neke kemikalije ne usvoje AEGL ili ERPG vrijednosti. TEEL-0 je granična koncentracija ispod koje najveći dio ljudi neće osjetiti negativne učinke po zdravlje. Definicije pojedinih razina TEEL jednake su definicijama razina AEGL. Pri korištenju svih ovih vrijednosti treba imati na umu da se individualne ljudske reakcije ne događaju na precizno određenim granicama koncentracije, nego u širokom rasponu koncentracija.

Osim ovih vrijednosti, za osoblje vatrogasnih ekipa u Njemačkoj, utvrđene su vrijednosti koncentracije ETW[147]. U Hrvatskoj se za sve radnike normalno koriste GVI[148] i KGVI[149] vrijednosti iz *Pravilnika o graničnim vrijednostima* [175] i ne postoje posebne vrijednosti koncentracije za intervencijsko osoblje[150].

ETW su koncentracije štetnih i otrovnih tvari u zraku ispod kojih se intervencije normalno izvode bez respiratorne zaštite, a predstavljaju tolerantne granice općenito primjenjive za intervencijske postrojbe s trajanjem izlaganja do 4 h na otvorenom prostoru, pod uvjetom da je koncentracija kisika u zraku veća od 17% vol., VFDB [176]. Pri ovim se koncentracijama smatra da nema nikakvih učinaka za zdravlje izloženih osoba i od njih se očekuje potpuna sposobnost djelovanja.

U slučaju ispuštanja toksičnih tvari u tunelu, polutant će se rasprostirati u smjeru strujanja zraka i s njim će se postepeno izmiješati. Ako je u pitanju spontano ispuštanje cjelokupnog sadržaja spremnika, koncentracija polutanta postići će vrlo visoke vrijednosti, koje će, ovisno o osobinama toksične tvari i o strujanju zraka, s vremenom u pravilu opadati. Pri kontinuiranom ispuštanju, može se uz nepromijenjene uvjete strujanja u tunelu očekivati približno konstantna koncentracija tijekom perioda ispuštanja. Toksični učinci svake od tvari su specifični i međusobno različiti, tako da se granice ispuštanja moraju odrediti za svaku kemikaliju zasebno. Kritične toksične koncentracije su načelno vrlo niske i tipično se kreću u rasponu od 1 do 1000 ppm, pa će ispuštanje toksičnih polutanata u tunelu redovito vrlo brzo doseći opasne granice. Ako se za primjer uzme plinski klor, što je scenarij br. 6 u OECD [94], ispušten u tunelu Učka, površine poprečnog presjeka 54 m^2, pri brzini strujanja zraka od 1 m/s, te primijeni najviša AEGL 3 granična vrijednost za 10 minutno izlaganja (50 ppm[151]), tada je odgovarajuća brzina ispuštanja svega 7,82 g/s. U usporedbi sa spomenutim scenarijem

[147] ETW, Einsatztoleranzwert (dopuštena granica za intervenciju).
[148] GVI, Granična vrijednost izloženosti (prosjek) za 8-satno izlaganje u danu.
[149] KGVI, Kratkotrajna granična vrijednost izloženosti (prosjek) za 15-minutno izlaganje, do 4 puta u danu, s po 1 h međupauzama.
[150] Usmena informacija, Vatrogasna postrojba Grada Rijeka.
[151] Za usporedbu: KGVI vrijednost za klor iznosi 1,5 ppm, ERPG-1 vrijednost je 1 ppm (isto kao i ETW), ERPG-2 vrijednost je 3 ppm, a ERPG-3 vrijednost je 20 ppm.

br. 6, to je 575 puta manja brzina ispuštanja. Ovaj primjer jasno pokazuje da ispuštanje toksičnih tvari, posebno plinovitih, donosi vrlo velike rizike za sve osobe u tunelu. Stoga se do zone ispuha zraka mogu u najboljem slučaju očekivati ozlijeđene i/ili gotovo onesposobljene osobe.

Ako su ispuštene toksične tvari tekućine, za njihovo je isparivanje potrebno neko vrijeme. Maseni protok para se može izračunati, pa se uz pretpostavku idealnog miješanja može doći i do orijentacione koncentracije u zraku tunela. Ipak, i njihove su granične toksične koncentracije u području koje je slično već navedenom rasponu koncentracija za plinovite tvari. Stoga se može konstatirati da će tunelska ventilacija u pravilu biti u stanju dilucijom održavati koncentraciju takvih polutanata ispod kritičnih koncentracija jedino ako se radi o vrlo malom ispuštanju toksičnih tvari. Čak i uz povećanje brzine strujanja zraka za nekoliko puta, situacija s toksičnošću neće se bitno popraviti, ali je vjerojatno da će se brzina evaporacije zbog povećane brzine strujanja još povećati.

U slučaju kidanja spremnika, čitava će se količina toksične tvari odjednom ispustiti u prostor tunela. Ovisno o svojstvima tvari, tj. da li je u pitanju ukapljeni plin ili tekućina pri normalnim atmosferskim uvjetima, uspostaviti će se lokalno vrlo visoke koncentracije, koje će se sa strujanjem zraka brzo prenijeti u smjeru strujanja. Može se očekivati da će koncentracije polutanta biti tako visoke, da je nerealistički očekivati preživljavanje nezaštićenih osoba na nizvjetrenoj strani od akcidenta. Toksičnom će djelovanju biti izloženo i intervencijsko osoblje, koje svakako mora biti opremljeno izolacijskim dišnim aparatima, a moguće i kemijskim zaštitnim odijelima tipa 1A u skladu s EN 943-2 [177]. Bez odgovarajuće osobne zaštitne opreme ulazak intervencijskih snaga u ugroženo područje bio bi previše rizičan. Načelno gledano, ako toksična tvar gori, najbolje je ostaviti je da kontrolirano dogori do kraja.

6. Utjecaj tehničkih mjera na rizične scenarije

6.1 HRR i ventilacija

Ventilacija se pri akcidentu u tunelu prvenstveno koristi za upravljanje dimom sa ciljem da se ugroženim osobama omogući samospašavanje iz rizične zone, ali također da se tunelska građevina zaštiti od prekomjernih mehaničkih i toplinskih naprezanja. Tijekom intervencije, ventilacijom se nastoji vatrogascima omogućiti i olakšati akcija spašavanja i/ili gašenja požara[152]. Ipak, poznato je da pojačana ventilacija može povećati brzinu razvoja požara i vršnu *HRR*, što će imati negativne reperkusije na sigurnost ljudskih života, vatrogasnu akciju i na tunelsku građevinu, Kim i sur. [143]. Ona nadalje može uzrokovati značajnu defleksiju plamena prema nizvjetrenoj strani i povećati vjerojatnost prijenosa požara na sljedeći zapaljivi objekt. Interakciju između povećane brzine strujanja zraka te veličine i rizika prijenosa požara nije moguće izraziti jednostavnom zakonitošću, jer niti samo izgaranje realnih objekata nije jednostavna pojava. U odnosu na izgaranje na otvorenom prostoru, na izgaranje u tunelu djeluju dvije međusobno suprotstavljene pojave: tunel je zatvoreni volumen, pa se toplina ne gubi u atmosferu nego uglavnom ostaje na ili u blizini žarišta, no istodobno se izgaranjem troši kisik, pa se udio kisika u atmosferi smanjuje. Povećanje ventilacije s jedne strane pomaže izgaranje dovođenjem dodatnog kisika na požar, ali istodobno hladi gorivo, Carvel i Beard [178]. Danas se smatra da je maksimalna prihvatljiva uzdužna brzina zraka u tunelu u redovnom radu od 8-10 m/s, PIARC [9][153]. Obradom rezultata izvedenih eksperimenata ustanovljeno je da ventilacija drugačije djeluje na izgaranje osobnih automobila nego na izgaranje HGV, da je za brzinu širenja požara na HGV bitno da li je on započeo na uzvjetrenoj ili na nizvjetrenoj strani tereta, a kod požara lokve[154] se kao jedan od utjecajnih faktora pokazala veličina lokve. U tunelima je pitanje povećanja brzine izgaranja povezano i s mogućim stvaranjem oblaka eksplozivnih ili toksičnih plinova i para. Dosad su izvedeni brojni eksperimenti kako s vozilima i/ili maketama vozila u tunelima, tako i s lokvama tekućih goriva. Eksperimenti s požarima automobila i HGV uglavnom su izvedeni s praznim ili samo djelomično napunjenim rezervoarima goriva, tako da je o zajedničkom izgaranju vozila i njihovog pogonskog goriva prikupljeno malo strukturiranih i jasnih podataka. Spremnici goriva suvremenog teškog tegljača HGV mogu sadržavati i do 1200 L diesel goriva, tj. toplinski kapacitet spremnika napunjenih gorivom približno odgovara sadržaju topline autobusa ili desetak osobnih automobila, Petelin i sur. [179]. Imajući u vidu činjenicu da ovi spremnici na novim HGV mogu biti izrađeni od plastičnih masa, evidentno je da do njihovog kidanja i ispuštanja goriva može doći već u inicijalnoj fazi požara. Ipak, ni sadržaj

[152] Količina zraka potrebna za požarnu ventilaciju danas je odlučujuća za dimenzioniranje ventilacijskog sustava tunela, budući da zbog stalnog smanjivanja koncentracije polutanata u dimnim plinovima (CO, NO_x, čađa) količina zraka za ventilaciju u redovitom pogonu stalno pada.

[153] Npr. u Francuskoj se preporučuje maksimalna brzina zraka od 8 m/s za dvosmjerne i 10 m/s za jednosmjerne tunele [9].

[154] Pod požarom lokve (spill fire) smatra se izgaranje tekućine prosječne dubine do 25 mm. Pri ispitivanjima se redovito koriste tave, pa se izvještaji zapravo odnose na „pool fires“. Razlika između spill fire i pool fire je objašnjena u Prilogu. Stoga bi umjesto termina „požar lokve“, zapravo bi trebalo koristiti termin „požar otvorenog bazena“, što bi fizikalno i leksički odgovaralo engleskom terminu „pool fire“, koji obuhvaća: požar lokve prolivene tekućine (plitke, bez ograde), požar bazena (plitke lokve s ogradom) i požar otvorenog spremnika s većom dubinom goriva. Termin požar lokve koristi se ovdje zato što je lokva pojava koja je najčešća u tunelu. Termoplastični materijali se u požaru rastale i tipično gore kao lokva.

goriva u rezervoarima osobnih automobila, koji se uglavnom kreće od 50-80 L nije zanemariv, posebno ako u požaru sudjeluje nekoliko vozila.

Iako je iz iskustva oduvijek bilo poznato da povećana brzina strujanja zraka (unutar nekih granica) dovodi do povećanja brzine rasta i toplinske snage izgaranja, prvu precizniju procjenu povećanja intenziteta tunelskih požara s povećanom brzinom zraka zbog pojačane ventilacije napravio je Carvel [36] uporabom statističkih metoda temeljenih na primjeni Bayesovog teorema uvjetne vjerojatnosti. Kroz usporedbu većeg broja stvarnih i eksperimentalnih požara, njegove su procjene pokazale da se pri požaru HGV u tunelu širine približno 7,6 m može očekivati vrlo značajno povećanje *HRR*. Ako se *HRR* identičnog objekta (HGV) s prirodnom ventilacijom tunela označi s faktorom 1, onda će se požar pri nekoliko karakterističnih brzina strujanja zraka povećati:

- pri 2 m/s, za faktor 4 u fazi razvoja i za faktor 2 u potpuno razvijenoj fazi,
- pri 4 m/s, za faktor 5-6,
- pri 6 m/s, za faktor 7-8,
- pri 10 m/s, za faktor 9-10.

Za požare prolivenih lokvi također je ustanovljeno da uzdužna ventilacija s povećanjem brzine strujanja zraka u tunelu širine približno 10 m, općenito dovodi do povećanja toplinske snage izgaranja [36]. Razlivene lokve pravokutnom oblika su prema površini razdijeljene na 3 grupe: malu lokvu (cca 10 m^2), čija duljina iznosi oko 1 m, a širina joj je jednaka širini tunela; srednju lokvu (cca 25 m^2), čije dimenzije su oko 5 x 5 m; veliku lokvu (cca 100 m^2), čija duljina iznosi nešto preko 10 m, a širina joj je malo manja od širine tunela. Za veliku lokvu ustanovljeno je da se može očekivati povećanje *HRR* uz brzinu strujanja:

- između 2 m/s i 4 m/s, povećanje za približno 30%,
- pri 6 m/s, povećanje za približno 50%,
- pri 10 m/s, povećanje za približno 70%.

Za požare lokvi srednje veličine u tunelu širine oko 10 m, Carvel [36] je procijenio da se može očekivati da uzdužna ventilacija ima smanjujući učinak na *HRR*, tj.:

- pri 2 m/s, smanjenje za približno 15%,
- pri 4 m/s, smanjenje za približno 30%,
- pri 6 m/s, smanjenje za približno 40%,
- pri 10 m/s, smanjenje za približno 50%.

Istodobno je Carvel [36] naveo da su rezultati ovisni i o vrsti goriva. U posljednjem slučaju, nekoliko eksperimenata izvedeno je s metanolom kao gorivom, koji izgara drugačije nego ugljikovodici, pa to može biti uzrok da su dobiveni rezultati odstupali od očekivanih.

Za požare lokvi male veličine, ustanovljeno je da povećanje uzdužne ventilacije blago povećava *HRR* pri nižim brzinama strujanja zraka (do 5 m/s), dok se pri većim brzinama zraka primjećuje blago smanjujući utjecaj na *HRR*. Za požare malih lokvi u tunelu širine oko 10 m, može se tako očekivati da uzdužna ventilacija ima sljedeći učinak na *HRR*:

- pri 2 m/s povećanje za približno 15%,
- pri 4 m/s povećanje za približno 10%,
- pri 6 m/s sasvim malo smanjenje,
- pri 10 m/s smanjenje za približno 10%.

Za požare osobnih automobila ustanovljeno je da uzdužna ventilacija pri maloj brzini nema signifikantan utjecaj na *HRR* [36].

Rezultati dobiveni tijekom ispitivanja utjecaja brzine strujanja zraka (ventilacije) na razvoj požara „zatvorenih" tereta HGV u 2nd Benelux tunelu godine 2001., koja su već prethodno spomenuta [60], pokazali su znatna odstupanja od rezultata Carvel [36]. Mjerenjima je ustanovljeno da se vršna *HRR* neće povećati za faktor 8 prema [36], već svega za faktor 1,2-1,5, a da se brzina porasta požara neće povećati za faktor 20 prema [36], nego svega za faktor 2-4. Razlika je pripisana tome što su se podaci iz [36] bazirali na relativno malim tunelima.

Pri ispitivanjima u 2nd Benelux tunelu uočena je još jedna pojava, koja izgleda da je pri svim ostalim ispitivanjima ostala neotkrivena. Ustanovljeno je da uz visoku brzinu strujanja zraka, razvoj požara putničkog automobila može biti usporen za cca 30 minuta ako je gorenje započelo na prednjem kraju vozila, a struja zraka dolazi sa stražnjeg kraja [60]. To je u kontradikciji s opće prihvaćenim mišljenjem, prema kojem bi se očekivao ubrzani razvoj požara bez obzira na točku paljenja. To nadalje znači da je mjesto početka požara (paljenja) vrlo važno ako se promatra utjecaj povećane brzine ventilacije na razvoj požara putničkog vozila, posebno imajući u vidu da u približno 95% slučajeva požar započinje u motorskom prostoru, tj. sprijeda [60][155].

U jednom od testova u već spomenutoj testnoj seriji EUREKA 499 mjerena je *HRR* simuliranog tereta HGV koji se sastojao od 2000 kg tapeciranog namještaja, za koji je izračunati sadržaj topline bio 87 GJ, Persson [158]. Pri ovom su testu mijenjani uvjeti ventilacije da bi se ocijenio utjecaj brzine strujanja zraka na *HRR*. Požarni test izveden je s brzinom strujanja zraka od 6 m/s tijekom prvih 13,5 minuta, a zatim je ventilacija isključena i snaga požara pala je sa 120 MW na 42 MW u roku od 3 minute. Nakon 16,5 minuta ventilacija je ponovno uključena s brzinom zraka od 3 m/s, što je izazvalo povećanje *HRR* na 128 MW u roku od 4 minute po uključivanju. Ovi rezultati se relativno dobro slažu s rezultatima iz *Project „Safety Test"* [60].

Izgaranje lokvi vjerojatno je dosad znanstveno obrađeno detaljnije nego izgaranje bilo kojih drugih zapaljivih tvari. To je s jedne strane razumljivo, budući da je takva ispitivanja relativno lako izvesti, da je gorivo i uvjete izgaranja moguće standardizirati i da su rezultati ispitivanja stoga u velikoj mjeri reproducibilni. Ipak, kao što je već navedeno, pri ispitivanjima se redovito koriste tave, gdje je površina izgaranja konstantna, a dubina goriva jednolika, što u stvarnoj požarnoj situaciji obično nije slučaj. Tipično se uzima da su lokve kružnog oblika, a ostali se oblici normalno svode na ekvivalentni krug uz izjednačenje površina.

Blinov i Khudiakov [180] su studiranjem požara različitih veličina lokvi tekućih goriva ustanovili da se pritom mogu razlikovati tri režima izgaranja. Ako je promjer lokve manji od 0,03 m, plamenovi su laminarni, dominira prijelaz topline konvekcijom, a brzina izgaranja R pada s povećanjem promjera. Ako je promjer u rasponu od $0{,}03 < D < 1$ m, ponašanje plamena je prijelazno, između laminarnog i turbulentnog. Pri velikim promjerima ($D > 1$ m), koji su jedno zanimljivi za stvarni požar u tunelu, plamenovi su potpuno turbulentni, dominantan je prijelaz topline zračenjem, a brzina izgaranja R je praktički neovisna o promjeru.

[155] U jednosmjernom tunelu struja zraka na goruće vozilo redovito dolazi sa stražnje strane, jer se time nastoji ljude na uzvjetrenoj strani požara zaštititi od dima i topline. Pri požarnim testovima sa simuliranim HGV u tunelima uobičajeno je da se teret pali u približno geometrijskoj sredini. To bi značilo da rezultati većine dosad izvedenih požarnih testova pokazuju u prosjeku prebrzi razvoj požara, jer je vrlo malo vjerojatno da bi gorenje započelo u sredini tovarnog prostora HGV gdje nema nikakvog izvora paljenja.

U tablici 6.1 izgaranje lokvi razvrstano je prema mehanizmu prijelaza topline, Babrauskas [38]. Pri velikim promjerima, dominantan utjecaj na izgaranje ima zračenje topline, dok pri malim promjerima prevladava konvekcijski dio. U konvekcijskom režimu, strujanje može biti laminarno ili turbulentno, dok u radijacijskom režimu plamen može biti optički tanak ili debeo[156], Tien i sur. [138].

Tablica 6.1. Dominantni mehanizam prijelaza topline prema promjeru lokve [38]

Promjer, m	Karakteristika izgaranja
< 0,05	Konvekcijsko, laminarno
0,05 do 0,2	Konvekcijsko, turbulentno
0,2 do 1,0	Radijacijsko, optički tanak plamen
> 1,0	Radijacijsko, optički debeo plamen

Babrauskas je izveo eksperimente s lokvom heksana promjera D = 4 m i ustanovio da vjetar ima znatan utjecaj na povećanje brzine izgaranja [182]. Pri eksperimentu s požarima lokve promjera 1 m i 3 m s JP-5[157] kao gorivom, ustanovio je da se veličina požara lokve promjera 1 m pri brzini vjetra od 6 m/s smanjuje na približno polovicu veličine koju je požar imao u mirujućem zraku i da bi se s još nešto većom brzinom zraka požar ugasio.

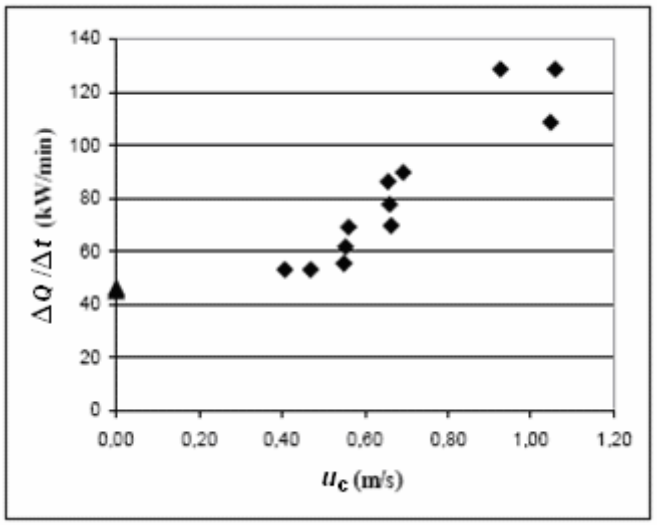
Prema Steinhaus i sur. [183], utjecaj vjetra na požar lokve je kompleksan. Ovisno o brzini vjetra, utjecaj može biti povećanje turbulencije i bolje miješanje komponenti, što će dovesti do efikasnijeg izgaranja i povećanja temperature plamena. Vjetar će također povećati duljine plamena i struje izgarnih plinova, što će utjecati na promjenu učinka zračenja, a time i na brzinu evaporacije goriva. Općenito je potvrđeno da kod velikih lokvi vjetar povećava brzinu izgaranja na otvorenom. Utjecaj ventilacije još je kompleksniji ako je požar ograničen na zatvoreni prostor, hodnik ili tunel. Pri ovakvim uvjetima, požar lokve može biti vrlo dobro ventiliran, pa će se brzina izgaranja jako povećati. Startanje ili pojačavanje ventilacije u slučaju požara u tunelu je vrlo raširena praksa, usmjerena prvenstveno prema boljem odvođenju dima (odimljavanje), no to može dovesti do gubitka stratifikacije dima. Kombinacija ventilacije i restriktivne geometrije tunela čini da će u slučaju požara lokve doći do mnogo veće defleksije plamena od one koju bi izazvala samo ventilacija na otvorenom.

Kao zaključak se može konstatirati da je ponašanje požara lokve u tunelu vrlo složeno, ali istodobno se mora prihvatiti činjenica da se u slučaju požara većih lokvi u zatvorenom prostoru pojačanjem ventilacije općenito povećava *HRR* požara.

Ingason i Lönnermark [122, 184] potvrđuju da povećanje uzdužne brzine strujanja zraka značajno povećava brzinu porasta *HRR* kao i vršnu *HRR* požara u tunelu, mada navode da su faktori povećanja do kojih je došao Carvel [36] osjetno preveliki. Na izvedenom modelskom eksperimentu s drvenim kolijevkama visoke poroznosti za zrak, izmjeren je faktor povećanja vršne *HRR* u rasponu od 1,4-1,7 u odnosu na slobodno izgaranje, odnosno u rasponu od 1,8-2,2 s kolijevkama niske poroznosti. Pri izgaranju termoplastičnih materijala nije ustanovljeno nikakvo povećanje *HRR*. Najveći utjecaj brzine strujanja zraka pokazao se na brzinu porasta

[156] Sloj plina ili čađe je optički debeo ako daljnje povećanje debljine sloja ne pridonosi povećanju emitiranog zračenja, Cowley i Johnson [181].
[157] JP-5 (Jet Propellant) je mlazno gorivo razvijeno za pogon aviona na američkim nosačima aviona s visokim plamištem (najmanje 60 ^{0}C). Definirano je standardom MIL-DTL-5624 U.

HRR, za koju je ustanovljeno da je približno linearna funkcija brzine zraka. Tako je npr. pri brzini strujanja zraka od 0,9 m/s brzina porasta *HRR* gotovo 3 puta veća nego pri brzini od 0,3 m/s (slika 6.1), što je pripisano defleksiji plamena prema gorivu[158]. Ove spoznaje upućuju na činjenicu da su operatori tunela prekomjernim povećavanjem brzine strujanja zraka pri požarima zbog poboljšanja odimljavanja moguće pogoršavali situaciju, budući da su time uzrokovali i znatno brži razvoj požara, Dix [14].



Slika 6.1. Brzina porasta *HRR* kao funkcija uzdužne brzine strujanja zraka, Ingason [185]

Gotovo identično, Kim i sur. [143] zaključuju da je vrlo dobro poznato da ventilacija povećava snagu požara, pa je stoga razumno zaključiti da maksimalna brzina ventilacije koja bi pomogla odimljavanje može zapravo pogoršati ukupnu situaciju u tunelu. Ipak, ako se ventilacija može podesiti na optimalni protok, sustav ventilacije može predstavljati učinkovit alat za upravljanje dimom i toplinom.

Tablica 6.2. Usporedba ventilacijskih sustava za 3 najpoznatija katastrofalna požara[159]

Tunel, duljina, vrsta	**Požar**	**Poprečni presjek**	**Sustav ventilacije**	**Broj sustava**	**Max. protok zraka**	**Intervencija vatrogasaca**
Mt Blanc, 11600 m, dvosmjerni	1999.	8,5 x 6 m visina (zaobljeni svod), ≈ 50m^2	Polupoprečna	4 x 75 m^3/s na svakom portalu + 1 x 150 m^3/s (reverzibilni)	Dovod 600 m^3/s, odsis 300 m^3/s	1. pokušaj ulaska 5 min. nakon alarma. Požar ugašen nakon 53 h
Tauern, 6401 m, dvosmjerni	1999.	9,5 x 5 m visina	Poprečna	4 nezavisna sustava, dovodni (190 m^3/s/km) i odsisni (115 m^3/s/km)	Odsis 1216 m^3/s, dovod 736 m^3/s	1. pokušaj ulaska 27 min. nakon izbijanja. Požar ugašen nakon 16,1 h
St. Gotthard, 16918 m, dvosmjerni	2001.	7,8 x 7,8 m (41 m^2)	Poprečna	6 nezavisnih	Dovod i odsis po 2150 m^3/s (+ 30 % rezerve)	1. pokušaj ulaska 5 min. nakon alarma (7 min. nakon sudara). Požar ugašen nakon 6,2 h

[158] Brzina strujanja zraka od 0,9 m/s na modelu odgovara brzini strujanja od 4,3 m/s u pravom mjerilu [176].
[159] U tablici su korišteni podaci iz Kim i sur. [143].

Od aktivnih mjera zaštite od požara, sustavu ventilacije tunela tradicionalno se pridaje najveća pažnja. Osnovni ciljevi djelovanja ventilacijskog sustava su odimljavanje, što poboljšava uvjete za preživljavanje osoba u tunelu i olakšava vatrogasnu intervenciju, te odvođenje topline sadržane u dimnim plinovima, što pomaže pri očuvanju integriteta tunelske konstrukcije i instalacija. Ne dovodeći u pitanje potrebu za ventilacijom, Petelin i sur.[179] predlažu da bi brzinu gibanja dimnih plinova trebalo reducirati na 2 m/s u najkraćem mogućem vremenu po izbijanju požara. Kao što je prethodno već navedeno, Drakulić [73] pak zbog očuvanja stratifikacije predlaže smanjivanje brzine strujanja zraka na 1-1,5 m/s, čime je moguće tijekom 4-8 minuta očuvati zonu visine 2-4 m bez dima. Posebno je zanimljiv zaključak da je gubitak stratifikacije moguće ukloniti dosljednim smanjenjem uzdužne brzine zraka ispod 1,5 m/s, čime dolazi do pojave restratifikacije strujanja dima i zraka. U tablici 6.2. prikazani su osnovni podaci relevantni za sustav ventilacije triju tunela u kojima su se dogodili najpoznatiji katastrofalni požari u Europi. Iako su ventilacijski sustavi bili bogato dimenzionirani, a intervencije vatrogasnih snaga su uslijedile u relativno kratkom vremenu nakon izbijanja požara, katastrofalne posljedice nisu bile izbjegnute. Bjegović i sur. posebno su istaknuli da su *HRR* i količine dima u sva ova 3 velika požara bile daleko veće od pretpostavljenih projektom [73].

6.2 Širenje požara kroz odvodne kanale (kanalizaciju)

U skladu s Pravilnikom [18], sustav odvodnje kolnika mora osigurati odvodnju dotoka akcidentne tekućine s protokom od 200 L/s na 200 m duljine kolnika i istodobno onemogućiti širenje požara, kao i toksičnih i drugih plinova te dima kroz odvodne cijevi unutar tunelske cijevi i između dviju tunelskih cijevi. Ako je ovom zahtjevu nemoguće udovoljiti, prijevoz opasnih tvari može postati upitan.

Njemački RABT [87] traži da se predvidi mogućnost odvodnje vode i drugih tekućina sa ceste, posebno u odnosu na prolijevanje zapaljivih tekućina. U tu svrhu traži se predviđanje odvodnog kanala kapaciteta odvodnje 100 L/s, u koji se prolivena tekućina slijeva putem slivnika. Kanal se dijeli na sekcije duljine najviše 50 m, a svaka sekcija sadrži vodeni sifon.

Ipak, ovi zahtjevi za odvodnjom mogu pridonijeti širenju požara ako izgara lokva prolivene tekućine koja se istodobno slijeva u odvodni kanal. Eksperiment koji su proveli Pless i Seliger [140] s odvodnim rigolom s prosjecima širine 50 mm, kakav se često koristi u tunelima za odvod prolivenih tekućina, pokazao je da će zapaljiva tekućina koja protječe kroz odvodni kanal prenijeti plamen po duljini kanala. Zbog nedovoljne količine zraka u rigolu za kontinuirano izgaranje po cijeloj površini tekućine, plameni će se jezici visine 1-1,5 m nasumice pojavljivati kroz pojedine prosjeke, sve u ovisnosti o lokalno raspoloživoj količini kisika. Udaljenost na kojoj će se to događati je najmanje do prvog vodenog sifona. Opisani plamenovi koji izbijaju u prostor tunela posve su dovoljni da izazovu širenje požara na druge obližnje zapaljive tvari i objekte, kao što su npr. zaustavljena vozila.

6.3 Utjecaj nagiba kolnika

Nagib kolnika tunela može imati znatan utjecaj na smjer i brzinu prirodnog gibanja dima, prolivene tekućine, ali i na brzinu kretanja osoba pri evakuaciji u tunelu. Posebno je izražen utjecaj uzdužnog nagiba tunela na gibanje dimnih plinova, jer će se oni pod utjecajem sile uzgona stvorene zagrijavanjem zraka, tj. smanjenjem specifične gustoće zraka, uvijek

nastojati širiti prema portalu tunela koji se nalazi na većoj geodetskoj visini[160]. Na gibanje prolivene tekućine utjecaj imaju i uzdužni i poprečni nagib kolnika, jer će veličina (površina), dubina (visina tekućine) i smjer širenja lokve ovisiti upravo o nagibima i o smještaju kanalizacijskih slivnika. Ako je u pitanju tekućina koja izgara, njeno gibanja može pridonijeti bržem širenju požara duž vozila ispod kojeg gori, ali i prijenosu požara na druga obližnja vozila odnosno gorive objekte.

Uzdužni nagib tunela do približno 2% nema utjecaj na brzinu evakuacije ljudi (brzinu hoda), dok npr. nagib od 5% smanjuje brzinu evakuacije od 2,4 m/s na 1,8 m/s, Petelin i sur. [179][161]. Učinci koji su posljedica uzdužnog nagiba tunela, bez utjecaja mehaničke ventilacije i vjetra u vanjskoj atmosferi, načelno su prikazani u tablici 6.3.

Tablica 6.3. Utjecaj uzdužnog nagiba kolnika u tunelu s jednosmjernim prometom[162]

Utjecaj	Požar pri nagibu prema dolje	Požar pri nagibu prema gore
Dim	Širi se suprotno od smjera prometa. - učesnici u smjeru suprotnom od prometa nisu sigurni[163]* - učesnici u smjeru prometa su sigurni*	Širi se u smjeru prometa (prema gore). - učesnici u smjeru suprotnom od prometa su sigurni* - učesnici u smjeru prometa nisu sigurni*
Goruće tekućine	- ne ometaju učesnike u smjeru suprotnom od prometa (osim dima) - ometaju učesnike u smjeru prometa	- ometaju učesnike u smjeru suprotnom od prometa, teku po kolniku prema dolje - ne ometaju učesnike u smjeru prometa (osim dima)
Učesnici	- pomaže im pri bijegu prema dolje - odmaže im pri bijegu prema gore	- odmaže im pri bijegu prema gore, u smjeru prometa - pomaže im pri bijegu prema dolje, suprotno od mjera prometa

6.4 Gašenje/supresija požara zapaljivih krutina i tekućina

Gašenje i supresija požara u tunelima najčešće se svode na uporabu vode u različitim varijantama primjene. U tablicama 3.2. i 3.3. uspoređeni su zahtjevi nekoliko relevantnih međunarodnih i nacionalnih dokumenata, kojima se definira protočna količina vode za gašenje požara. Imajući u vidu zahtjeve Pravilnika u RH [18], koji su gotovo identični zahtjevima austrijskog RVS [86], njemačkog RABT [87], a slični zahtjevima francuskog MoI [31] i PIARC [9], može se zaključiti da u cestovnim tunelima za gašenje požara na raspolaganju stoji najviše 1200 L/min vode tijekom vremenskog perioda od 1 h. Ako se kao medij za gašenje želi koristiti pjena, potrebno pjenilo mora se dovesti do požarišta mobilnim uređajima, tj. vatrogasnim vozilom ili sl. Raspoloživa protočna količina vode za samo gašenje požara biti će manja od 1200 L/min, jer od ukupno raspoložive količine vode treba oduzeti količinu potrebnu za zaštitu vatrogasaca i vatrogasne opreme od izlaganja toplinskom zračenju požara. Načelno je potrebno pretpostaviti da će već u inicijalnoj fazi požara, tj.

[160] Ovo važi za nagib tunela u jednome smjeru.
[161] EU Direktiva [75] i Pravilnik [18] ne dozvoljavaju uzdužni nagib > 5%, osim ako zbog zemljopisnih utjecaja drugo rješenje nije moguće. U tunelima s uzdužnim nagibom > 3% moraju se poduzeti dodatne i/ili pojačane mjere za povećanje sigurnosti temeljene na procjeni rizika.
[162] Slična tablica može se izvesti i za tunele s dvosmjernim prometom.
[163]* Ovo važi samo ako je brzini zraka u trenutku akcidenta mala, ako je visina tunela dovoljno velika da dođe do stratifikacije dima i ako je razvoj požara dovoljno brz da sila uzgona uspostavi smjer gibanja zraka prema većoj geodetskoj visini.

unutar perioda od 10 minuta nakon početka izgaranja, toplinsko zračenje na uzvjetrenoj strani požara postići maksimalnu vrijednost. Na nizvjetrenoj će strani propagacija toplinskog zračenja biti donekle ograničena zbog apsorpcije topline na čvrstim česticama u plamenu i dimu (čađa i leteći pepeo). Intervencijske će se snage u svojoj normalnoj osobnoj zaštitnoj opremi (OZO)[164] moći približiti žarištu na najviše 19-23 m udaljenosti (slika 5.10), no sa specijalnom zaštitom od toplinskog zračenja može se omogućiti i djelovanje na manjoj udaljenosti. Mlaz fino raspršene vatrogasne vode može se usmjeriti prema žarištu požara, čime će se „pokriti" cijeli poprečni presjek tunela u svrhu apsorpcije topline zračenja. Iako tunel ima ograničenu veličinu, na raspolaganju mora biti dovoljan protočni volumen vode. Iz iskustva je poznato da će za ovu svrhu biti potrebno namijeniti najmanje jednu četvrtinu ukupnog raspoloživog protoka vatrogasne vode, pa za gašenje požara na raspolaganju ostaje približno 900 L/min vode.
U svom istraživačkom projektu Kohl i Pless [195] su proveli studiju literature u svrhu pronalaženja metoda za proračun potrebnog kapaciteta vatrogasne vode. Pritom su konsultirane sve najvažnije raspoložive međunarodne publikacije o protoku vatrogasne vode potrebnom za gašenje požara krutih tvari. Zaključak projekta bio je da trenutno ne postoji matematički model kojim se na odgovarajući način može opisati relacija između procesa izgaranja i gašenja vodom. Pristup procjeni potrebnog vatrogasnog kapaciteta u raspoloživoj literaturi bazira se na empirijskim vrijednostima koje su dobivene statističkom obradom podataka o incidentima i akcijama gašenja, Kohl i sur. [196]. Ovakva situacija ostavlja taktičke probleme vezane s gašenjem požara u tunelima otvorenima.

6.4.1 Neki rezultati ispitivanja na krutim tvarima (požar klase A)

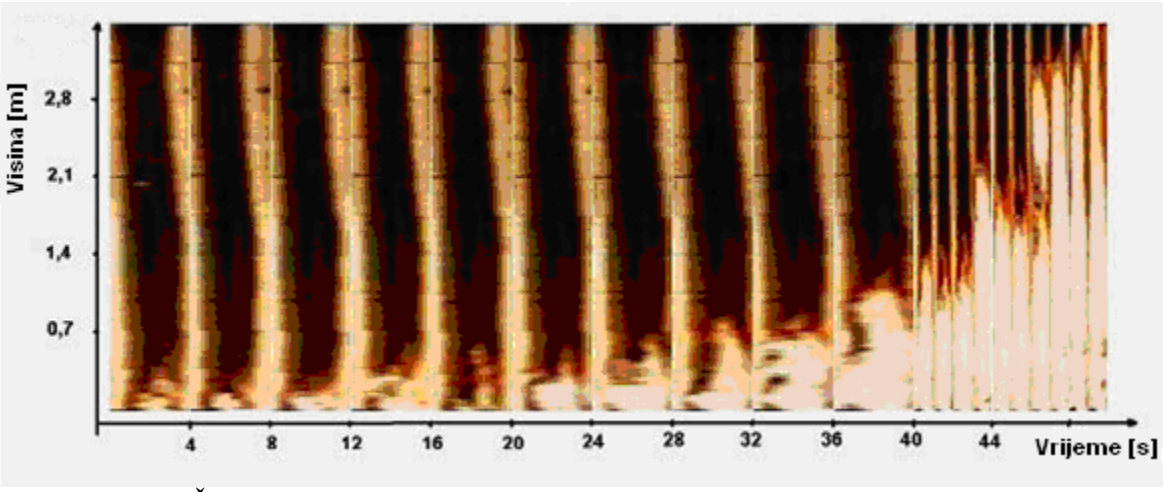
Pri požaru klase A gorući objekti redovito imaju trodimenzionalnu strukturu. Površine goruće tvari mogu zauzimati različite pozicije u prostoru i njihove površine mogu biti u direktnom kontaktu s vrućim dimnim plinovima. Uz prijelaz topline zračenjem prisutan je i prijelaz topline konvekcijom, pa se širenje požara može značajno ubrzati. Na slici 6.2. prikazan je jednostavan eksperiment, pri kojem su vertikalno složena 2 niza kartonskih kutija na međusobnom razmaku od približno 0,1 m. Izgaranje na dnu inicirano je lokvom od 10 mL benzina, a zatim je razvoj požara u vertikalnom procjepu snimljen u vremenskoj sekvenci od 50 s. Na taj je način bilo moguće na vremenskoj skali prikazati odgovarajuću sliku za svaki konsekutivni vremenski interval u slijedu, s lijeva prema desno, Pless i Seliger [140]. U procjepu se vrlo jasno može prepoznati eksponencijalni rast požara. Iz ovog je prikaza jasno vidljivo da na širenje požara trodimenzionalnih objekata značajno utječu unutarnje šupljine, u kojima je prisutno i zračenje i konvekcija topline. Pri izgaranju tereta klase A u tunelu, te šupljine mogu biti vrlo različite: šupljine unutar tereta (npr. paleta), međuprostori između vertikalno i/ili horizontalno složenih kutija ili sanduka, prostori između tereta i njegovog pokrova (cerade), prostori između gorive tvari i zidova tunela ili dijelova strukture vozila itd.

Geometrijski faktori ne utječu samo na širenje požara trodimenzionalnih objekata, nego i na gašenje trodimenzionalnih požara, pa ih je i tu nužno uzeti u obzir. Primjena vatrogasne vode na izložene površine gorućih tvari usmjerena je prvenstveno na hlađenje tih površina i apsorpciju toplinske energije s njih, sve u cilju reduciranja ili potpunog zaustavljanja procesa

[164] Normalna osobna zaštitna oprema vatrogasca za strukturne požare definirana je Pravilnicima [186] i [187], koji predstavljaju transpoziciju direktiva EU [188] i [189] u hrvatsko tehničko zakonodavstvo. U praksi to znači da je u skladu s Popisom [190], OZO za vatrogasce ispitana i certificirana prema harmoniziranim normama EN 469 [142] za odijelo, EN 443 [191] za kacigu, EN 659 [192] za rukavice, EN 13911 [193] za podkapu i EN 659 [194] za čizme.

isparivanja i pirolize na njima. Vatrogasna vode primjenjuje se i na zapaljive tvari koje još ne gore, kako bi se hlađenjem onemogućilo njihovo isparivanje, piroliticka razgradnja i širenje požara. Ovisno o poziciji pojedine površine goruceg objekta, stvarni kontakt između izbačenih kapljica vode i goruće tvari može biti vrlo različit.

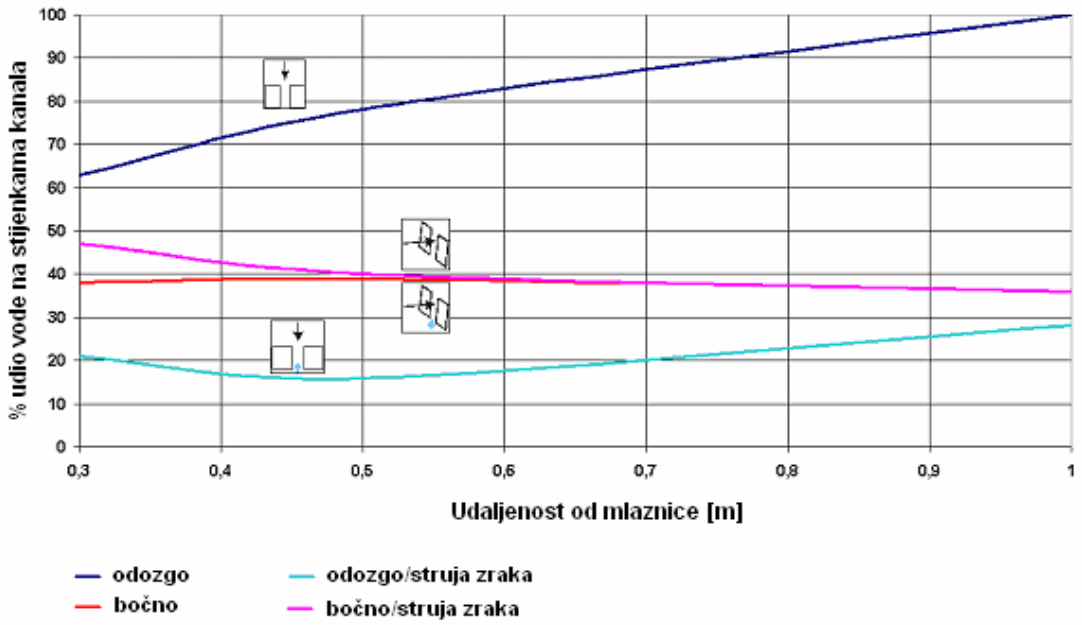
Gibanje okolnog zraka može također imati vrlo značajan utjecaj na gibanje kapljica vode, pa je i to potrebno uzeti u obzir, posebno u pukotinama, procjepima i drugim uskim prostorima. Zaključno se može navesti da je izgaranje moguće zaustaviti jedino na onim površinama, na koje je iz pozicije vatrogasca ili iz fiksne mlaznice moguće dopremiti odgovarajuću količinu vode, koja će dati potreban intenzitet gašenja. Da bi se odredila učinkovitost mlaza raspršene vode u procjepima ispunjenim zrakom, eksperimentalno je istraženo ponašanje mlaza raspršene vode u uskom kanalu. Mjerenjem je kao učinkoviti udio vode određen samo onaj koji je pao na stijenke kanala u odnosu na ulaznu površinu kanala.



Slika 6.2. Širenje požara u procjepu između vertikalno složenih kartonskih kutija – snimljeno u vremenskoj sekvenci od 50 s [140]

Ispitivanjem su uspoređena dva različita načina penetracije vode [140]. Mlaznice postavljene iznad površina kanala simulirale su način na koji se voda nanosi iz stacionarnog sustava za gašenje, pri čemu do penetracije kapljica vode dolazi od vrha kanala prema dolje. Pri bočnom postavljanju mlaznica, voda se nanosi na način kako to čine vatrogasci pri mobilnom gašenju. Strujanje zraka prema gore simuliralo je inducirano gibanje zraka koje se uspostavlja tijekom požara zbog utjecaja uzgona vrućih dimnih plinova. Postotni udio protoka vode koji je ušao u kanal prikazan je na slici 6.3.

Dobiveni rezultati pokazali su da je učinkovitost mlaza vatrogasne vode u uskom kanalu značajno manja nego na ravnim i potpuno vidljivim površinama. Stacionarne mlaznice za gašenje postavljene na dovoljnoj udaljenosti od goruceg objekta, mogu znatno pridonijeti močenju uskih vertikalnih kanala, posebno u inicijalnoj fazi požara. Tijekom daljnjeg razvoja požara, do kojeg će doći u slučaju da stupanj supresije u inicijalnoj fazi nije dovoljno visok, penetracija vode postaje otežana. U mobilnoj verziji gašenja, s mlaznicama postavljenim bočno u odnosu na kanale među gorućim plohama, nema značajne razlike u postotku vode koji pri ispitivanju prodire u kanal s ili bez strujanja zraka. Ipak, na temelju ovog ispitivanja može je zaključiti da je učinkovitost bočne primjene vode u odnosu na primjenu vode odozgo iz stacionarnih mlaznica za gašenje značajno reducirana.



Slika 6.3. Udio dotoka vode koji prodire u kanal [140]

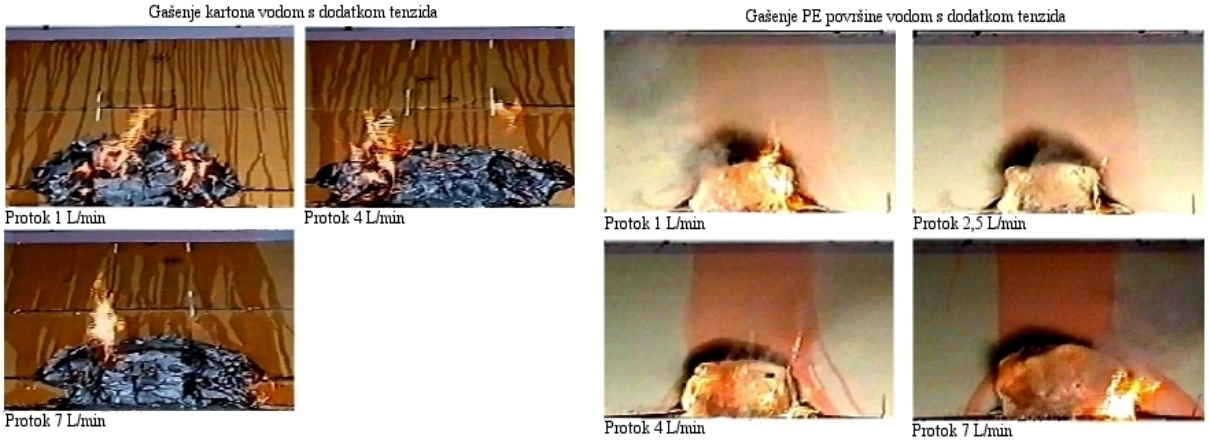
Cilj gašenja požara uvijek je da se vatrogasna voda nanese na sve površine ciljnog gorućeg objekta, kako bi se gašenje obavilo što hitrije. Ako gorući objekt sadrži skrivene ili zaklonjene goruće površine, koje mogu imati oblik pokrova, štita, zavjese ili sl., potrošak medija za gašenje (vode) bitno će se povećati, a isto tako i vrijeme gašenja i nastala šteta. Većinu takvih objekata neće biti moguće ugasiti primjenom normalne vatrogasne taktike (gašenje samo djelovanjem mlaza), već će biti nužno pribjeći korištenju pomoćnih tehnika, kao što je npr. mehaničko razbijanje pokrova. Bez ovih tehnika, učinkovitost medija za gašenje značajno će se smanjiti, a vrijeme gašenja se može produljiti sve do konačnog dogorijevanja opožarenog objekta. Uz to treba naglasiti da korištenje ovih pomoćnih tehnika može biti vrlo teško i rizično za intervencijsko osoblje, budući da je tunel zatvoreni prostor i da su u fazi razvijenog većeg požara uvjeti okoline takvi, da je pristup žarištu često nemoguć.

Da bi se potkrijepile ove činjenice, izvedena su istraživanja gašenja na površinama koje nije moguće dosegnuti direktno medijem za gašenje. Za primjer su prikazane odabrane površine zapaljive tvari na nizvjetrenoj strani u odnosu na primjenu medija za gašenje, koje nije moguće dosegnuti kapljicama vode iz pozicije vatrogasaca, Pless i Seliger [197]. Površine koje su usmjerene prema nizvjetrenoj strani mogu se vatrogasnom vodom dosegnuti jedino iscjeđivanjem vode preko rubova površina koje su dosegnute mlazom vode. Kao model za prikaz širenja vode korištene su površine nagnute pod kutom od 60^0, pokrivene kartonom i plastičnom folijom (PE).

Vatrogasna voda nanesena je na gornju površinu, tako da je tekla preko gornjeg ruba kose površine po čitavoj duljini brida (slika 6.4). Iako su u vodu dodani surfaktanti[165], na površini kartonske kutije jasno se vide pojedinačni „potočići“ čija se širina povećava s porastom dotoka medija za gašenja. Potpuno močenje površine nije postignuto. Isto se tako vidi da voda

[165] Surfaktanti (tenzidi) su površinski aktivne tvari koje snižavaju površinsku napetost tekućine, međuplošnu napetost između dviju tekućina ili između tekućine i krutine. U vatrogasnoj tehnici koriste se kao sredstva za močenje (močila), pomoću kojih se dobiva tzv. „mokra voda“, koja znatno brže prodire u strukturu poroznih tvari nego obična čista voda.

nije mogla doseći sve površine u zoni izgaranja, jer su to onemogućila ispupčenja i karbonizacija goruće tvari. Stoga je voda tekla oko mjesta gorenja i time bila izgubljena za gašenje. Pri ispitivanju gašenja plastičnih materijala, vatrogasna voda obojena je crveno da bi film vode bio uočljiviji. Na PE foliji je postignuto močenje površine, no jasno se vidi da voda unatoč močenju ne dosiže do zone izgaranja. Tok vatrogasne voda skreće oko područja vruće površine koja izgara i time biva deformirana, te ponovno otječe bez primjetnog efekta gašenja.



Slika 6.4. Ispitivanje površinskog močenja nagnute goruće površine zapaljivih tvari [195]

Razlozi za ovakvo tečenje vode su u poznatoj činjenici da „voda uvijek bira put s najmanjim otporom“. Voda na kartonu još uvijek ima izvjesnu površinsku napetost i kada nastane meandar, on pruža najmanji otpor otjecanju koji „potočić“ vode slijedi. Glatka površina plastičnog materijala pruža gotovo identične uvjete po cijeloj površini, zbog čega se stvara vodeni film. No na površini se nalaze zapreke kao što je zona izgaranja, koje čine da film vode skreće i zaobilazi ih. Dodatni razlog je ispupčivanje površine te visoka temperatura rastaljene plastične mase, znatno viša od temperature vrenja vode. U njihovoj blizini voda isparava brže, debljina vodenog filma se smanjuje, a granična površina plastične folije se solidificira, posebno pri većem dotoku. Na koncu se u solidificiranom plastičnom materijalu formira zračni mjehur, što uzrokuje da voda ne može doseći do mjesta izgaranja na kojem je temperatura najviša.

Opisani efekti se s povećanim trajanjem požara i posljedično višom temperaturom na površini zapaljivih tvari još povećavaju, pa u potpunosti sprječavaju hlađenje skrivenih gorućih površina. Gašenje ovih površina može se očekivati jedino ako:

- vatrogasne snage pronađu put i način za direktnu primjenu vatrogasne vode,
- ove površine bude moguće osloboditi nekom mehaničkom akcijom i time omogućiti direktan pristup vode za gašenje,
- opožareni objekti se sruše kasnije tijekom požara, pa se tako površine koje gore povoljno preformiraju.

U nedostatku neke od ovih pojava, požar će se nastaviti sve dok sav zapaljivi materijal sam ne dogori do kraja.

6.4.2 Neki rezultati ispitivanja na zapaljivim tekućinama (požar klase B) – gašenje pjenom

Požar zapaljive tekućine čije je plamište niže od cca 38 ^{0}C praktički je nemoguće ugasiti samo vodom, API 2021 [198][166]. Za tu se svrhu daleko najčešće koristi vatrogasna (zračna) pjena, agregat mjehurića ispunjenih zrakom s opnama stvorenim od vodene otopine pjenila. Specifična gustoća pjene manja je od specifične gustoće zapaljivih tekućina i ona je danas jedini vatrogasni medij kojim se veliki požar zapaljive tekućine može uspješno ugasiti. Dodavanjem male količine pjenila u vodu (uobičajeno 1%, 3% ili 6% volumno), dobiva se tzv. otopina pjene. Turbulentnim miješanjem raspršene otopine sa zrakom dobiva se pjena (ekspandirana pjena). Bitan cilj pri uporabi pjene je stvaranje kohezivnog plutajućeg pokrivača na površini tekućine koji onemogućava paljenje ili gasi požar time što sprječava pristup zraka i hladi gorivo, a istodobno reflektira toplinsko zračenje plamena koje više ne zagrijava direktno površinu zapaljive tekućine. Nadalje, gušenjem zapaljivih para tekućine, pokrivač također sprječava njihovo ponovno zapaljenje. Pjena ima svojstvo prianjanja za stijenke, čime pruža izvjestan stupanj zaštite od izlaganja i trodimenzionalnih goriva okolnim plamenima i toplinskom zračenju. Iako se najviše koristi za gašenje zapaljivih tekućina, zbog ovog se svojstva vrlo se dobro može iskoristiti i kao medij za prevenciju, kontrolu i gašenje požara krutina klase A. Pjena za gašenje može se dobavljati i nanositi putem stacionarnih cijevnih sustava ili prijenosnim sustavima za generiranje pjene. Za nanošenje pjene na površinu goriva mogu se koristiti izlazi za pjenu koji dozvoljavaju da ona padne „nježno“ na površinu goriva (s minimalnim uranjanjem), što osigurava najvišu učinkovitost pjene. Ipak, često se nanosi pomoću prijenosnih mlaznica za pjenu priključenih na kraj fleksibilnih vatrogasnih cijevi ili putem topova (monitora) velikog kapaciteta, a pri gašenju požara velikih tankova moguća je i podpovršinska primjena. Iako se „nasilnost primjene“ (uranjanje pjene u gorivo) zbog bolje učinkovitosti uvijek nastoji smanjiti, to često zbog različitih razloga nije moguće izvesti. Za zaštitu opasnih prostora u kojima može doći do prolijevanja zapaljivih tekućina u blizini opreme ili objekata velike vrijednosti, ili za zaštitu velikih horizontalnih površina, pjena se može dopremati i distribuirati putem visoko postavljenih cijevnih sustava sličnih sprinkler sustavima. U toj konfiguraciji najčešće se koristi za pokrivanje prolivenih lokvi zapaljive tekućine i to u obliku spreja koji nalikuje na gustu „snježnu mećavu“. Nakon pada iz visoko postavljenih cijevnih izlaza (fiksnih mlaznica za pjenu ili sprinklera), koji su prostorno raspoređeni tako da čitavu horizontalnu površinu pokriju jednolikom gustoćom, čestice pjene koalesciraju na površini goruće tekućine stvarajući kontinuirani pokrivač.

Požar velike lokve zapaljive tekućine moguće je gasiti mobilnom opremom, kao što su npr. aerodromska navalna vozila ili industrijska navalna vozila s pjenom (vatrogasni kamioni), na kojima se nalazi zaliha pjenila i oprema sposobna generirati velike količine pjene s velikim protokom. Specijalna tunelska navalna vozila imaju dosta sličnosti s ovim vozilima. U svim takvim situacijama, pjena se može nanositi u obliku punog ili raspršenog mlaza i to kao aspirirana ili neaspirirana[167]. Pjena ima ograničenu vremensku stabilnost koja se mjeri

[166] Teoretski gledano, raspršenom vodom se može ugasiti požar tekućine čije je plamište niže od temperature vode koja se koristi.

[167] Aspirirana pjena stvara se turbulentnim miješanjem raspršenog mlaza otopine pjene i zraka unutar tijela generatora pjene (npr. aspiracijske mlaznice). Neaspirirana pjena stvara se pri letu kapljica otopine pjene između generatora pjene (npr. neaspiracijske mlaznice) i objekta/rizika koji se gasi. Aspirirana pjena ima sitnije mjehuriće, stabilnija je (sporije se iscjeđuje) i pruža dugotrajniju zaštitu (postpožarnu sigurnost), ali (ponekad) sporije gasi požar i zahtijeva glomazniju opremu (tj. uporabu aspiratora). Učinkovita neaspirirana pjena može se generirati samo od pjenila koja stvaraju vodeni film (film-forming foam).

brzinom 25%[168] iscjeđivanja, koja u pravilu iznosi od nekoliko minuta do nekoliko desetaka minuta. Ako se nanosi odgovarajućom brzinom primjene (L/m^2min), pjena ima sposobnost progresivnog i postepenog gašenja požara. Tijekom primjene, pjena generirana u skladu s preporukama proizvođača lako teče preko goruće površine u vidu čvrstog nepropusnog pokrivača, koji sprječava ponovno paljenje već ugašenih površina. Pjenom se uspješno mogu ugasiti samo dvodimenzionalne (horizontalne) površine zapaljivih tekućina, a za gašenje trodimenzionalnih požara (npr. zapaljive tekućine koja istječe) ili za požare plinova nije pogodna za samostalnu primjenu. Ipak, trodimenzionalni požari tekućina mogu se uspješno ugasiti tako da se pjenom pokrije horizontalna površina isteklog goriva i da se istodobno ili neposredno nakon toga zatvori dovod goriva, a mali preostali požar ugasi npr. primjenom vatrogasnog praha[169].

Pjene se dogovorno, ovisno o načinu uporabe i fizikalnim svojstvima, dijele i prema ekspanziji[170] na [200, 201]:

- pjene niske ekspanzije, ekspanzija do 20,
- pjene srednje ekspanzije, ekspanzija od 20 do 200,
- pjene visoke ekspanzije[171], ekspanzija od 200 do približno 1000.

Zbog potrebnog dometa, za svrhe primjene u tunelima u obzir dolazi jedino pjena niske ekspanzije.

Nužan sastojak pri stvaranju pjene je pjenilo, koncentrirano tekuće sredstvo koji snižava površinsku napetost vodene otopine i time omogućava formiranje mjehurića. Baza iz koje se proizvode pjenila prema NFPA 11 [200] načelno može biti prirodna (proteinski hidrolizat) ili sintetička (detergentna). Iz proteinske baze proizvode se proteinska (P), fluoroproteinska (FP) i film-forming fluoroproteinska pjenila (FFFP), a iz detergentne baze sintetička detergentna (SD) i pjenila koja stvaraju vodeni film (AFFF[172]). FP, AFFF i FFFP pjenila sadržavaju kao bitnu komponentu fluorougljikove surfaktante, koji im daju otpornost na miješanje s gorivima (oleofobnost), a kod AFFF i FFFP pjenila i sposobnost stvaranja filma na površini zapaljive tekućine. Sva ova pjenila prikladna su za stvaranje pjena kojima se gase tekući ugljikovodici, koji su nepolarne tekućine, odnosno tekućine koje se ne miješaju s vodom. Da bi se generirala pjena koja može opstati na površini polarnih tekućina[173], potrebno je u pjenilo dodati posebne aditive, čime se dobije alkoholno rezistentno pjenilo (AR). AR pjenila u pravilu su AR-AFFF ili AR-FFFP, iako je moguće proizvesti i AR-FP pjenila, koja se danas sve manje proizvode, uglavnom zbog ekoloških razloga. „Čista“ proteinska (P) pjenila danas se već uglavnom smatraju zastarjelima i rijetko se još koriste. Sintetička detergentna (SD) pjenila uglavnom se koriste za generiranje pjene srednje i visoke ekspanzije, pa nisu zanimljiva za primjenu u tunelima.

Fluoroproteinska (FP) pjenila imaju bazu jednaku proteinskima, ali sadrže i dodatne fluorirane surfaktante. Time se povećava tečljivost pjene, što joj omogućava da bolje teče i brtvi oko zapreka, te da stvori čvrsti kohezivni pokrivač koji ne dozvoljava pristup zraka i iz

[168] Prema nekim starijim standardima, umjesto vremena 25% iscjeđivanja mjerilo se vrijeme 50% iscjeđivanja, npr. DIN 14272-1 [199].
[169] Trodimenzionalni požari istječuće zapaljive tekućine s plamištem iznad 60 ^{0}C obično se mogu ugasiti i raspršenim mlazom vode ili pjene nakon što se lokva pokrije pjenom.
[170] Ekspanzija je omjer volumena gotove pjene i volumena otopine pjene koju ta pjena sadrži.
[171] U hrvatskoj struci zaštite od požara i u vatrogastvu tradicionalno se za pjene niske, srednje i visoke ekspanzije koriste nazivi teška, srednja i laka pjena (istim redom).
[172] AFFF je akronim od Aqueous Film Forming Foam. Neki ih nazivaju „fluorosintetičkim“ pjenilima.
[173] Među polarna otapala pripadaju npr. alkoholi, eteri, esteri, ketoni i amini

kojeg se na površinu tekućeg goriva može iscjeđivati otopina. Prisustvo fluoriranih surfaktanata daje ovim pjenama izvrsnu otpornost na miješanje s gorivima, pa su one idealne za podpovršinsko injektiranje u velike tankove koji sadrže tekuće ugljikovodike i za primjenu putem ručnih mlaznica i monitora, pri čemu dolazi do značajnog uranja mlaza pjene u gorivo. FP pjene također imaju nenadmašnu stabilnost i otpornost na natražno gorenje (burnback resistance), odlične karakteristike brtvljenja uz vruće metalne površine i sposobnost samozacjeljivanja pokrivača. U pravilu se u vodu doziraju tako da stvore 3% ili 6% otopinu. Specijalne FP pjene imaju odobrenje za gašenje reformuliranih benzina i njihovih oksigenata koji su blago polarni (npr. MTBE[174]).

Pjenila koja omogućavaju stvaranje vodenog filma (AFFF) sadrže sintetičke fluorirane surfaktante, ugljikovodične surfaktante, detergente, otapala, stabilizatore i vodu. AFFF pjene stvaraju pokrivač koji onemogućava pristup zraka, a uz to na površini većine tekućih ugljikovodika stvara i mikronski tanak vodeni film koji sprječava isparivanje tekućine. Osobina AFFF pjena je brzo gašenje požara, čemu pomaže i vodeni film koji se po površini tekućih goriva širi brže nego pokrivač pjene, odvajajući time gorivo od zraka. Ovaj efekt postiže se ubrzanim iscjeđivanjem otopine iz mjehurića pjene, što je dobiveno na račun smanjene stabilnosti pjene (kraće vrijeme 25% iscjeđivanja) i otpornosti na natražno gorenje. Stvaranje vodenog filma koji pluta na tekućim ugljikovodicima omogućava prisustvo fluoriranih surfaktanata koji smanjuju površinsku napetost otopine, tako da površinska napetost goriva podržava film. Učinkovitost filma veća je na gorivima s većom površinskom napetošću (npr. diesel i mlazno gorivo), a manja na gorivima s nižom površinskom napetošću (npr. heksan i benzin). Prekinuti film se sam „zacjeljuje“ i ostaje djelovati kao osiguranje od ponovnog paljenja na lokvama koje ne gore. Ipak, vatrogasci zbog sigurnosti ne ulaze u područje prolivene lokve ako ono nije vidljivo pokriveno pjenom, jer u tom slučaju nema sigurnosti da je film prisutan.

Film forming fluoroproteinska pjenila (FFFP) također sadrže sintetičke fluorirane surfaktante, aditive za stabilizaciju i inhibitore (za zaštitu od smrzavanja, korozije i bakterijske dekompozicije), ali im je osnovni sastojak proteinski hidrolizat, pa su u njima sjedinjena dobra svojstva AFFF i FP pjenila. FFFP pjena djeluje kao barijera koja gorivo odvaja od zraka, a iz nje se iscjeđuje vodeni film koji guši odvajanje para na površini goriva. Jednako kao standardne FP pjene, FFFP pjene imaju dobru otpornost na miješanje s tekućim ugljikovodicima ako se urone u gorivo, pa podnose nasilnu primjenu. Na požarima prolivenih lokvi imaju učinak sličan AFFF pjenama, uz, u pravilu, osjetno bolja ekološka svojstva.

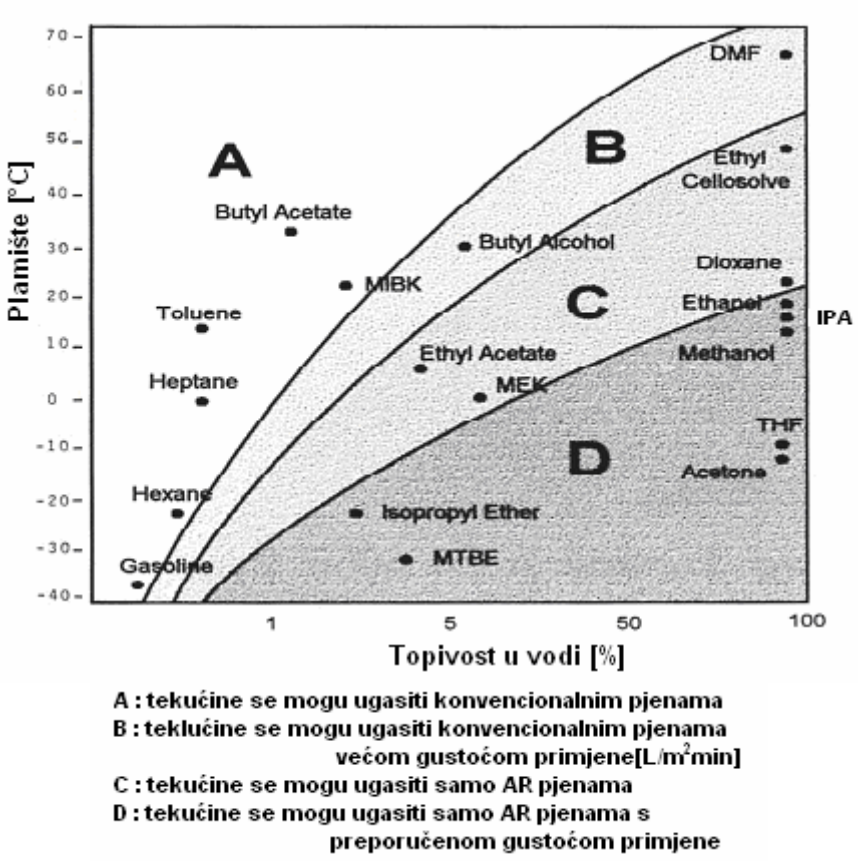
Alkoholno rezistentna pjenila (AR) su kemijski tako dizajnirana da pruže učinkovitost na požarima polarnih tekućina (otapala), koje su destruktivne za konvencionalne pjene[175]. Mehanizam zaštite od polarnih otapala najčešće je takav, da se između površine goriva i pokrivača pjene generira netopiva polimerna barijera u obliku gela. Ova barijera stvara se na početku primjene destrukcijom male količine nanesene pjene i djeluje kao zaštitni sloj koji pjenu odvaja i štiti od destruktivnog djelovanja otapala. U vatrogasnoj praksi uobičajen je naziv „alkoholna“ ili univerzalna pjena/pjenilo. Na početku njihove primjene, prije desetak i više godina, bila su uobičajena AR pjenila u 3-6 gradaciji (doziranje 3% na požare ugljikovodika, a 6% na polarna otapala), a danas se proizvode u gradacijama 3-3, 1-3, pa čak i

[174] Metil tercijarni butil eter (MTBE) je kemijski spoj $C_5H_{12}O$, koji se koristi kao aditiv (oksigenat) za benzine u svrhu povišenja oktanskog broja. Tekućina je blago polarna, a u sastavu benzina ima ga do cca 15%.

[175] Učinkovitost AR pjena na nepolarnim tekućinama (ugljikovodicima) nije ništa manja od učinkovitosti konvencionalnih (ne-AR) pjena na njima, što znači da se AR pjenama mogu pokriti požari svih zapaljivih tekućina u skladu s njihovim certifikatom ili listingom.

1-1. Alkoholno rezistentna pjenila tipa AFFF i FFFP (samo) na ugljikovodicima stvaraju vodeni film. Polarnih tekućina ima mnogo vrsta, a njihova destruktivnost za pjene uglavnom je vezana s topivošću u vodi. Stoga je preporučljivo za primjenu uvijek odabrati pjenilo kojem je učinkovitost dokazana za specifični fluid koji će se gasiti ili barem za kemijsku skupinu koja se očekuje kao rizik. Za preliminarnu ocjenu podobnosti pjenila za gašenje polarnih otapala može poslužiti graf prikazan na slici 6.5., Williams [202].

Pjenila klase A, tj. pjenila za gašenje požara klase A, razvijena su prvenstveno zbog poboljšanja učinkovitosti vode pri gašenju požara otvorenog prostora (vegetacije), ali su svoju namjenu našla i pri gašenju strukturnih požara u kojima u većoj mjeri sudjeluju goriva klase A (npr. drvo, papir, žitarice, zgrade, krovišta i sl.). Bitno svojstvo pjena klase A je velika prodornost u odnosu na porozne organske tvari, što se može postići već s malim sadržajem ugljikovodičnih detergenata. Stoga njihov nazivni postotak doziranja normalno iznosi svega 0,1-1%. Iako je načelno moguće pjenom klase A ugasiti manji požar zapaljive tekućine, u svijetu ne postoji niti jedan standard, norma ili priznati kriterij kojim bi tu osobinu bilo moguće ispitati i potvrditi. Imajući u vidu da praktički nema tunelskog požara bez sudjelovanja zapaljivih tekućina, pjenila klase A nisu prikladan izbor za svrhe gašenja u tunelima. Suprotno tome, pjenama za gašenje požara klase B moguće je uspješno gasiti i požare klase A.



Slika 6.5. Procjena učinkovitosti vatrogasnih pjena na polarnim otapalima [202]

6.4.3 Evaluacija i potvrđivanja podobnosti vatrogasnih pjena

Evaluacija i potvrđivanje kvalitete i podobnosti vatrogasnih pjenila i pjena koje se s njima generiraju normalno se provode ispitivanjem prema normama i/ili standardima priznatim u

svijetu. Najpoznatiji dokumenti koji reguliraju ovo područje zaštite od požara i vatrogastva (samo za pjene niske ekspanzije[176]) su:

- Američki NFPA 11:2010, *Standard for Low-, Medium-, and High-Expansion Foam* [200],
- Europski EN 1568-3:2008: *Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 3: Specification for low expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible liquids* [203] i EN 1568-4:2008: *Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 4: Specification for low expansion foam concentrates for surface application to water-miscible liquids* [204],
- Maverick UL 162: *Standard for Foam Equipment and Liquid Concentrates* [205],
- Međunarodni ISO 7203-1:2011: *Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 3: Specification for low-expansion foam concentrates for top application to water-immiscible liquids* [206] i ISO 7203-3:1999: *Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 3: Specification for low expansion foam concentrates for top application to water-miscible liquids* [207],
- Britanski MOD Defence Standard 42-40 Issue 2, *Foam Liquids, Fire Extinguishing (Concentrates, Foam, Fire Extinguishing)*, 2002 [208] i Defence Standard 42-41 Issue 2, *Foam Liquids, Fire Extinguishing (Concentrates, Alcohol Resistant, Foam, Fire Extinguishing)*, 2002 [209].

Uz gore spomenute, postoje i posebni standardi za vatrogasne pjene, koji su svojim zahtjevima usmjereni prvenstveno prema nekom specifičnom području ljudske djelatnosti, npr. US MIL Spec F 24385 F [202] i ICAO Doc 9137-AN/898, Part 1, Chapter 8 (avijacija, vojna i civilna, za brzo gašenje lokvi prolivene zapaljive tekućine - kerozina), LASTFIRE požarni test (za gašenje velikih atmosferskih spremnika nafte i derivata) i IMO MSC/Circ. 582, 668, 670, 798 i 799 (za gašenje požara na brodovima). Svaki od ovih standarda i normi traži ispunjavanje čitavog niza zahtjeva, koji se međusobno znatno razlikuju. Pjenila koja pri testiranju kod kvalificiranih neutralnih institucija dokažu da ispunjavaju zahtjeve postavljene nekom normom ili standardom dobivaju certifikat ili tzv. listing, kojim korisnicima dokazuju svoju podobnost za određenu namjenu. Zahvaljujući činjenici da je uporaba normi u svijetu uglavnom dobrovoljna, svaki korisnik ima pravo i mogućnost odabrati za svoju uporabu normu ili standard za koji procijeni da je njemu najprikladniji. Ne zanemarujući važnost ispunjavanja svih zahtjeva u pojedinim od ovih dokumenata, za svrhe gašenja požara vjerojatno su najbitniji pokazatelji brzina gašenja i postpožarna sigurnost (otpornost na natražno gorenje, stabilnost pjene). Ti se parametri ispituju požarnim testom, čija je svrha da što bolje simulira situacije stvarne vatrogasne primjene, tj. da predstavlja što vjerniju repliku stvarnosti. Neki od najvažnijih pokazatelja koje norme i standardi određuje za požarni test su:

- vrsta, osobine i količina/debljina sloja goriva (npr. benzin, heptan, kerozin, aceton, izopropanol),
- oblik i dimenzije ispitne tave (kružna ili kvadratna, sa zaprekama ili bez),
- vrsta mlaznice i način primjene (fiksna ili pokretna mlaznica),
- način primjene pjene (nasilna, u gorivo ili nježna, na slijevnu ploču),
- vrijeme predgorenja i vrijeme nanošenja pjene (minuta),
- gustoća nanošenja pjene (L/m^2min),
- vrijeme gašenja,
- otpornost na natražno gorenje,
- ostalo (npr. test s bakljom).

[176] Budući da su za uporabu u tunelima prikladne gotovo isključivo pjene niske ekspanzije, izostavljene su norme i standardi kojima se specificiraju zahtjevi za pjenila/pjene srednje i visoke ekspanzije.

Svrha požarnog testa je da se napravi diskriminacija pjenila, tj. da se odvoje „kvalitetna“ pjenila od „nekvalitetnih“, imajući pritom u vidu specifičnosti određene primjene. Većina normi ili standarda definira jednu razinu svojstava koja se smatra prihvatljivom u smislu „zadovoljava“ ili „ne zadovoljava“. ICAO test definira dvije razine performansi (nižu A, višu B), dok npr. LASTFIRE test daje zbrojni bodovni rezultat dobiven s tri načina primjene pjene.

Europska norma EN 1568-4 [204] za AR pjenila definira dvije klase performansi za brzinu gašenja (I višu i II nižu), te 3 razine otpornosti na natražno gorenje u svakoj od klasa (A, B, C). Požarni test izvodi se s acetonom i izopropanolom (IPA), s fiksnom mlaznicom i nježnom primjenom pjene. Nakon predgorenja od 2 minute, od pjenila razine I traži se gašenje unutar 3 minute, a za razinu II prihvatljivo je da se gašenje postigne unutar 5 minuta. Otpornosti na natražno gorenje ne smiju biti manje od 15 minuta (razina A), 10 minuta (razina B) i 5 minuta (razina C).

Norma EN 1568-3 [203] za konvencionalna pjenila definira čak 3 klase performansi za brzinu gašenja (I najvišu; III najnižu), 2 vrste primjene pjene (nasilnu, u centar tave s gorivom; nježnu, na slijevnu ploču), te čak 4 razine otpornosti na natražno gorenje u svakoj od klasa I i II, a tri razine u klasi III. Požarni test izvodi se s mješavinom alifatskih ugljikovodika koja sliči motornom benzinu, a mlaznica je fiksna. Vremena gašenja iznose do 3 minute uz nasilnu primjenu (klasa I), do 4 minute uz nasilnu primjenu (klasa II) i do 5 minuta uz nježnu primjenu (klasa III). Otpornost na natražno gorenje od najmanje 10 minuta mjeri se s nasilnom primjenom pjene (samo za IA i IIA), a za sve ostale slučajeve s nježnom primjenom (najmanje 15, 10 i 5 minuta). Ova norma navodi i tipične performanse za uobičajene vrste pjenila (tablica 6.4). Budući da na tržištu u svakoj od vrsta postoji čitav niz različitih pjenila, tablica 6.4. može poslužiti isključivo za orijentacijske svrhe. Stvarne performanse određenog pjenila određuju se požarnim ispitivanjem, rezultate kojega normalno potvrđuje certifikat kompetentnog nezavisnog ispitnog tijela.

Tablica 6.4. Tipične performanse za različite vrste pjenila [203]

Vrsta	Klasa performansi gašenja	Razina otpornosti na natražno gorenje	Stvaranje filma
AFFF (nije AR)	I	C	Da
AFFF (AR)	I	A ili B	Da
FFFP (nije AR)	I	B	Da
FFFP (AR)	I	A ili B	Da
FP (nije AR)	II	A ili B	Ne
FP (AR)	II	A ili B	Ne
P (nije AR)	III	B	Ne
P (AR)	III	B	Ne
S (nije AR)	III	C	Ne
S (AR)	III	C	Ne

Klasa I označava najveću brzinu gašenja. A označava najbolju otpornost na natražno gorenje.

Iako je klasifikacija pjenila prema performansama načelno pozitivna, EN norme [203] i [204] su vrlo komplicirane za primjenu u praksi i kod nedovoljno upućenih korisnika mogu stvoriti pogrešan dojam da su sva pjenila koja imaju certifikat prema tim normama jednako prikladna za uporabu. S obzirom na vrlo široke granice prihvatljivosti i način označavanja pjenila prema nizu normi EN 1568, važno je uočiti da je za gašenje i osiguranje požara u tunelu bitno

insistirati na pjenilu kojim se može generirati pjena najviše učinkovitosti (IA ili sl.). Zbog mogućnosti nakupljanja zapaljivih para u zatvorenom prostoru, posebno je važno onemogućiti isparivanje lokvi prolivenih tekućina, kako bi se u najvećoj mogućoj mjeri izbjeglo stvaranje eksplozivne koncentracije u atmosferi tunela. U tu je svrhu preporučljivo odabrati film forming pjenilo. Sposobnost stvaranja vodenog filma na površini goriva određuje se koeficijentom širenja SC[177], koji čini razlika između površinske napetosti cikloheksana, te površinske napetosti otopine pjene i interfacijalne napetosti između otopine i cikloheksana:

$$SC = S_c - S_f - S_{cf} \tag{6.1}$$

Prema [203] i [205], koeficijent širenja SC mora biti pozitivan, dok se prema MIL [210] traži $SC \geq 3$. Fluorosurfaktanti u filmu vodene otopine smanjuje njenu površinsku napetost na 15-20 mN/m, a ugljikovodični surfaktanti smanjuju interfacijalnu napetost između goućeg ugljikovodika i vode na 0-2 mN/m.

Najvećim dijelom iz ekoloških razloga, motornim benzinima se danas sve više dodaju polarna otapala kao što su MTBE, ETBE, etilni alkohol itd., a pojavljuju se i mješavine goriva koje sadrže biodizel. Ne ulazeći u razmatranje ekoloških razloga niti ostalih mogućih problema s biogorivima (trajnost pri skladištenju, korozivnost, viskozitet itd.), treba navesti rezultate istraživanja koja su vezana sa zaštitom od požara. U pogledu izbora pjenila, u vatrogasnoj praksi smatra se da se mješavine benzin-alkohol koje sadrže do 10% alkohola i bezolovni benzini koji sadrže do 10% (vol.) oksigeniranih aditiva mogu gasiti uglavnom na isti način, prema istim procedurama i s istim pjenilima kao benzini proizvedeni od fosilne baze (sirove nafte). Ako postotak primješavanja prelazi 10%, preporučuje se uporaba AR pjenila [159, 200][178]. Trajnost kvalitetnih pjenila redovito prelazi 10 godina, MOD [208, 209], pa je pri njihovom izboru bitno procijeniti buduće tendencije u pogledu sastava goriva koje mogu imati značajan utjecaj na požarnu sigurnost. Iako najveći dio automobila još uvijek koristi benzin (Otto motori) ili diesel-gorivo (Diesel motori), činjenica je da se u klasična fosilna goriva sve češće i u sve većem postotku primješavanja dodaju tvari koje djeluju destruktivno na konvencionalna pjenila. Stoga je potrebno istaknuti bitne osobine pjenila koje mogu značajno doprinijeti požarnoj sigurnosti tunela. To su:

- Najbrže moguće gašenje s nasilnom primjenom pjene[179] u zajednici s najvišom mogućom postpožarnom sigurnošću (IA, prema [203] i [204]). Brzo gašenje pridonosi većoj sigurnosti ugroženih osoba i vatrogasaca, smanjenju šteta i ne dozvoljava da incident eskalira. Postpožarna sigurnost podrazumijeva da se požar neće širiti natrag na već ugašene površine, te da će se isparivanje razlivenog goriva bitno umanjiti.
- Sposobnost stvaranja vodenog filma[180] bitna je zbog onemogućavanja isparivanja lako hlapivih zapaljivih tekućina, koje bi moglo stvoriti oblak zapaljivih para.
- Uporaba AR pjenila s odobrenjem za gašenje na što širem spektru polarnih tekućina, budući da je nemoguće unaprijed znati kakav će se teret prevoziti kroz tunel.

[177] Koeficijent širenja za utvrđivanje film forming sposobnosti uobičajeno se mjeri na sloju cikloheksana [200, 203, 204, 210]. Tipične vrijednosti površinske napetosti iznose: voda 72 mN/m; proteinska pjena 40 mN/m; fluoroproteinska pjena 20-30 mN/m; FFFP/AFFF < 20 mN/m, cikloheksan 25 mN/m (1 mN/m = 1 din/cm).

[178] Postoje posebna pjenila koja nisu AR, ali su odobrena za gašenje slabije polarnih aditiva za benzine, npr. za MTBE i mješavine s MTBE.

[179] Ako se požar zapaljive tekućine u tunelu gasi ručnim mlaznicama ili monitorima (tako gase vatrogasci), tada je pjenu moguće primijeniti jedino nasilno.

[180] Ovaj zahtjev je zapravo već sadržan u prethodnome, jer je klasu gašenja I (brzinu gašenja) praktički nemoguće postići pjenom koja ne generira vodeni film.

Sva ova tri faktora važna su ne samo u slučaju mobilnog sustava gašenja, nego isto tako i u slučaju ugradnje stacionarnog sustava.

Uz gore spomenuta „nova goriva“ kao što su reformulirani benzin i biodiesel, za pogon cestovnih motorna vozila počinju se koristiti i druga alternativna goriva, kao što su npr. komprimirani prirodni plin (CNG), vodik, električni hibridi itd., a ukapljeni naftni plin (UNP) se može smatrati već tradicionalnim gorivom. Svako od ovih goriva donosi nove rizike vezane s njihovim agregatnim stanjem, tlakom, specifičnom gustoćom u slučaju ispuštanja u atmosferu, granicama zapaljivosti/eksplozivnosti, energijom paljenja, itd. Nadležni organi vlasti i operatori tunela morati će stoga odlučiti o mogućnostima za prolazak takvih vozila kroz tunele čim ona uđu u širu primjenu. Trenutna je situacija takva da se uglavnom dozvoljava prolaz vozila s pogonom na alternativna goriva bez posebnih uvjeta. Ipak, projektanti i operatori tunela morat će u budućnosti ove rizike procijeniti i po potrebi s njima uskladiti sustave ventilacije, zaštite od požara i odvodnje, operativne postupke itd. Novi rizici tražiti će i prikladne medije i opremu za gašenje, a intervencijske snage će morati proći dodatnu obuku i usvojiti nove standardne operativne postupke (SOP) intervencije.

6.5 Stacionarni sustavi za gašenje i supresiju požara (FFFS)

Stacionarni sustav za gašenje/supresiju/kontrolu požara u cestovnom tunelu definira se kao sustav opreme za zaštitu od požara koji je trajno pričvršćen za tunel, koji se sastoji od sustava cijevi, mlaznica i armatura, s fiksnim izvorom vode ili drugog medija za gašenje, te koji po aktiviranju daje traženi učinak redukcije toplinske snage požara i brzine porasta požara time što izbacuje vodu ili drugi medij direktno na žarište. Primjeri FFFS su tradicionalni sustavi sprinkler i deluge, sustavi pjene i novi sustav vodene magle.

Pitanje uporabe stacionarnih sustava za gašenje i/ili supresiju požara u tunelima raspravlja se u stručnim krugovima još od negativnih rezultata sa sustavom raspršene vode pri eksperimentima u tunelu Ofenegg 1965. [34, 35]. Zahvaljujući tim rezultatima, došlo se do uvjerenja da je raspršena voda iz stacionarnih sustava neprikladan medij za gašenje tunelskih požara. Kao što je to već prethodno navedeno, glavni zaključci doneseni su na temelju 11 testova sa sprinklerima kojima se gasio požar benzina u tavama površine 6,6 m^2, 47,5 m^2 i 95 m^2, a gustoća primjene vode (bez aditiva) bila je visokih 19 mm/min. U novije vrijeme Ingason je došao do sljedećih zaključaka o ovim eksperimentima [211]:

- Sprinkleri su požar ugasili unutar kratkog vremena.
- Turbulencija uzrokovana djelovanjem sprinklera i hlađenjem sloja dima uzrokovala je jako smanjenje vidljivosti, tj. sloj dima se ohladio i destratificirao, tako da se proširio po cijelom tunelu.
- Sprinklerska voda je evaporirala i zagrijala čitav prostor, čak i na znatnoj udaljenosti od žarišta.
- Stvorena para brzo je potisnula vruće dimne plinove u susjedne sekcije tunela, stvorivši tamo više temperature nego u eksperimentima bez sprinklera.
- U posljednjem testu, s lokvom benzina površine 95 m^2, isparivanje benzina nastavilo se nakon što je žarište ugašeno i pare su se raširile uzduž tunela. Približno 20 minuta nakon početka testa, došlo je do zapaljenja para benzina u zoni žarišta na zaostalim vrućim objektima. Deflagracija u tunelu izazvala je brzine strujanja zraka do 30 m/s, što je oštetilo instalaciju za ventilaciju.

Ovi zaključci, osim prvoga, koji uglavnom potječu još od Haertera [35], stvorili su osnovu za otpor prema instalacijama raspršene vode u tunelima. Vrlo slični argumenti vidljivi su i u dokumentima PIARC [9] i NFPA 502:2001[181]. Dodatni argumenti (protiv) koji se ne baziraju direktno na testovima u Ofeneggu također se nalaze u ovim dokumentima: da će voda raznijeti zapaljive tekućine po još većoj površini izgaranja, povećavajući tako veličinu žarišta; da je učinkovitost raspršene vode mala na požarima unutar vozila; da bi neželjeno aktiviranje sprinkler sustava moglo uzrokovati prometne akcidente; da su ugradnja, održavanje i periodičko ispitivanje sustava nepraktični i skupi; da je teško manualno aktivirati takav sustav itd. Uz to se dodatno navodilo da u hladnim krajevima postoji mogućnost smrzavanja vode u sustavu raspršene vode. Ipak, svi ovi dodatni argumenti nisu se nikad bazirali na rezultatima dobro zamišljenih i definiranih eksperimenata ili studija, već su posljedica diskusija među ekspertima, Ingason [203]. Suprotno tome, svi argumenti „protiv", detaljno su kvalitativno istraženi i odbačeni u radovima Regent [212, 213] neposredno nakon triju katastrofalnih požara u transalpskim tunelima. Opća situacija glede percepcije prihvatljivosti FFFS znatnije se promijenila tek posljednjih nekoliko godina, Yoon i Hadjisophocleous [214].
Gledište izrazito zainteresirane vatrogasne struke izvrsno se očitava u sljedećem prilogu:

Seattle Fire Department je jedna od vatrogasnih organizacija koja snažno zagovara postavljanje FFFS u tunele. Kao predstavnik ove organizacije, zamjenik zapovjednika Gary English iznio je njihova razmišljanja i zapažanja glede primjene FFFS u cestovnim tunelima, PIARC [215]:
„Na temelju mnogogodišnjih iskustava s gašenjem požara vozila (uključujući požare HGV i autocisterni sa zapaljivim tekućinama), naša vatrogasna služba dobro je upućena u sve izazove koje donosi gašenje požara u cestovnim tunelima. Gašenja požara ovakvih vozila već je samo po sebi ekstremno težak zadatak, dok obavljanje tog zadatka u tunelu dramatično povećava njegovu složenost ako se za cilj ima sigurna evakuacija korisnika vozila i uspješno gašenje požara. Ključni faktori koji gašenje požara unutar cestovnog tunela čine tako složenim su brz razvoj požara praćen visokim temperaturama, ogromne količine dima, prijenos požara s vozila na vozilo, ograničene mogućnosti pristupa vatrogasaca i ponašanje korisnika tunela. U svijetu se već dogodio dovoljan broj tunelskih požara iz kojih je moguće shvatiti da je potrebno ozbiljno i pažljivo korištenje prednosti instaliranja FFFS u cestovne tunele. Ovi sustavi u praksi mogu pružiti mogućnost za smanjivanje gubitaka ljudskih života, oštećenja građevina, ekonomskih udara i gubitka povjerenja javnosti koje je posljedica ovakvih akcidenata. U prošlosti je bila prisutna nesklonost industrije cestovnih tunela da ozbiljno razmotri postavljanje FFFS u njihov prostor. Ovu nesklonost podržavali su brojni navodi upitne točnosti koji su ispunjavali literaturu ove industrije. Ti upitni navodi u vezi s korištenjem FFFS u cestovnim tunelima stvorili su ozbiljan problem u percepciji. Stoga je potrebno da ova industrija uloži trajne i posebne napore kojima će se korigirati i/ili ukloniti ovi upitni navodi ne samo iz dokumenata koje objavljuju World Road Assn. (PIARC) i NFPA, nego i iz općenite „baze znanja" koju imaju oni koji se bave tunelima. Spomenute informacije upitne točnosti učinile su da je danas teško ozbiljno razmatrati primjenu FFFS u cestovnim tunelima u mnogim zemljama, unatoč tome što je uporaba FFFS gotovo univerzalno prihvaćena u svim drugim prostorima osim u cestovnim tunelima.
U posljednje je vrijeme napravljen izvrstan posao na preispitivanju ovih upitnih navoda kroz različite laboratorijske testove i modeliranje FFFS. Međutim, uz to je potrebno da se rezultati ovih istraživanja kao i doprinos eksperata iz industrije FFFS ugrade u dokumente koje će objavljivati PIARC i NFPA. Meni je jasno da su se obje ove organizacije na neki način počele baviti ovim pitanjem, jer su u novijim verzijama objavljenih dokumenata modificirale svoje pozicije.
Kao nadležni organ odgovoran za osiguravanje operativne sposobnosti postojećih FFFS u našim cestovnim tunelima, kao i kroz prihvaćanje novih FFFS u cestovnim tunelima, mi smo u potpunosti svjesni njihove složenosti. Mi smo svjesni kako stvarnih prednosti koje ovi sustavi donose, tako i relativno male potrebe za trajnim održavanjem i troškovima koji nastaju zbog njihove prisutnosti. Ispravna primjena i dobro održavanje sustava za detekciju požara onemogućiti će gotovo sva „lažna okidanja" ovih sustava.
Treba istaknuti da pretpostavka da će problem požara biti riješen u trenutku dolaska vatrogasnih snaga nije uvijek utemeljena. Mi možemo uspješno ugasiti požar jedino ako su vatrogasne snage do tunelskog požara došle dok je on bio u početnoj fazi ako je u pitanju (potencijalno) veliki požar, i/ili, ako je u pitanju požar malih vozila. U slučaju izlijevanja nekoliko tisuća galona (1 gallon = 3,785 L) zapaljive tekućine iz autocisterne, uspješno i pravovremeno gašenje nastalog požara može vrlo lako biti izvan mogućnosti djelovanja čak i najveće vatrogasne

[181] U sljedećim izdanjima istog standarda [65] i [81] postepeno su se ublažavali negativni argumenti protiv ugradnje fiksnog sustava raspršene vode, tako da se u najnovijem izdanju iz 2011. već spominju i komentiraju kao bivši.

brigade/službe ako nema podršku FFFS. Od bitne je važnosti da svi sustavi za spašavanje života u tunelima budu projektirani, izgrađeni i da funkcioniraju s punim učešćem intervencijskog osoblja. Što je ono više uključeno u ovaj proces, rezultirajući će sustavi bolje djelovati i ostvariti planiranu zadaću.
Mi u vatrogasnoj službi imamo uzrečicu: Nije pitanje DA LI će u vašem objektu doći do požara, već je pitanje samo KADA".

Tablica 6.5. Tuneli s ugrađenim stacionarnim sustavom za gašenje požara [81, 216, 217]

Zemlja	Lokacija/naziv
Austrija	Mona Lisa Tunnel Felbertauern Tunnel
Francuska	A86 Tunnel
Finska	Helsinki Service Tunnel
Italija	Brennero Tunnel Virgolo Tunnel
Nizozemska	Roermond Tunnel
Norveška	Vålreng Tunnel Fløyfjell Tunnel
Španjolska	M30 Tunnel Vielha Tunnel
Švedska	Tegelbacken Tunnel Klara Tunnel
Velika Britanija	Dartford Tunnel Tyne Tunnels
Australija	Adelaide Hills Tunnel Clem Jones Tunnel Brisbane City Link Burnley Tunnel Melbourne Eastern Distributor Sydney Graham Farmer Tunnel Perth Lane Cove Tunnel Sydney M4 Tunnel Sydney M5 East Tunnel Sydney Mitcham/Frankston Tunnel Melbourne North/South Busway Tunnel Brisbane North/South Tunnel Sydney Harbour Tunnel
Boston, Massachusetts, USA	CANA Northbound[182*] Tunnel CANA Southbound[*] Tunnel
Vancouver, Kanada	George Massey Tunnel
Seattle, Washington	Battery Street Tunnel I-90 First Hill Mercer Island[*] Tunnel Mt. Baker Ridge[*] Tunnel I-5 Convention Center[*] Tunnel

S iznimkom Japana i Australije, broj FFFS u cestovnim tunelima još je uvijek nizak. Niti u jednoj europskoj ili sjevernoameričkoj zemlji trenutno se FFFS ne koriste redovito, nego samo u posebnim slučajevima. Do prije nekoliko godina, u Europi su samo 2 tunela u

[182]* Ovi tuneli imaju naplavni (deluge) sustav pjene.

Norveškoj i 1 tunel u Švedskoj imali FFFS. Posljednjih su godina FFFS s vodenom maglom postavljeni u tunele nekoliko drugih europskih zemalja, uglavnom sa ciljem supresije/kontrole, ali ne i potpunog gašenja požara. U SAD je odluka da se u cestovne tunele ugrade FFFS bila motivirana prvenstveno činjenicom da se za njih planirao prolaz vozila s opasnim teretima bez pratnje. Za razliku od toga, u Japanu su tijekom više od 4 desetljeća u više od 80 cestovnih tunela ugrađeni stacionarni sustavi za gašenje požara, Mashimo [90]. U tablici 6.5 prikazani su cestovni tuneli u kojima se nalazi ugrađen stacionarni sustav za gašenje požara (osim Japana[184]).

Izvještaj Stroeks [218] navodi da je uspješnost japanskih sustava raspršene vode vrlo visoka. Niti u jednom slučaju nije zabilježeno pogrešno djelovanje, lažno aktiviranje ili samo djelomična učinkovitost ovih sustava tijekom stvarnih tunelskih požara, a većih kvarova praktički nema. Jedan od operatora tunela (Japan Highway Public Corp.) navodi da svake godine izbije 10-16 požara u kojima interveniraju vatrogasne postrojbe, a da se u najmanje 2-3 slučaja aktivira sustav raspršene vode. Drugi operator (Metropolitain Expressway Public Corp.) izvješćuje da je u najmanje 5-6 slučajeva sustav stvarno stavio požar pod kontrolu i time onemogućio širenje požara na druga vozila. Nadalje, problemi s vodenom parom nisu zabilježeni, kao niti sekundarne eksplozije zbog isparivanja goriva s površine ceste. Utjecaj raspršene vode na stratifikaciju dima ograničen je na duljinu zone naplavljivanja, tj. na 50-100 m. Ipak, da bi se izbjegli problemi tijekom evakuacije, sustavi se ne aktiviraju sve dok se ljudi nisu evakuirali, odnosno vrijeme aktiviranja sustava raspršene vode određeno je na 3 minute za jednosmjerne tunele i 10 minuta za dvosmjerne tunele nakon detekcije požara, Liu i sur. [219]. Nakon usvajanja nove procedure automatskog aktiviranja, iskustva s požarnim akcidentima pokazala su da raspršena voda ne ometa evakuaciju i da su sustavi učinkoviti u pogledu minimiziranja veličine požara i zaštite tunela i instalacija. FFFS se postavlja u skladu s kategorijom tunela, koja se određuje od slučaja do slučaja na temelju čitavog niza faktora, od kojih su najvažniji duljina tunela i prometno opterećenje. U tunelima duljim od 10 km, kao i u tunelima duljine od 3-10 km s intenzivnim prometom ($\geq$ 4000 vozila/dan u dvosmjernom tunelu), sustav raspršene vode je obvezan. Sekcije djelovanja raspršene vode su standardno duljine 25 m ili 50 m, uobičajena gustoća nanošenja je 6 mm/min, a tlak vode od 3-3,5 bara. Kako se obično aktiviraju do 2 sekcije, duljina sekcije u koju se voda ispušta iznosi 50-100 m. Od FFFS se očekuje da:

- smanji temperaturu žarišta i okoliša,
- priguši (supresira) požar,
- spriječi širenje požara,
- potpomogne djelovanje vatrogasaca.

Općenito se vodi ne dodaju aditivi[185] (pjenila), s obrazloženjem da se time smanjuje trošak te potreba za čišćenjem opreme nakon uporabe, Stroeks [218]. Raspoloživa količina vode određuje se tako da bude u stanju snabdijevati djelovanje sustava tijekom najmanje 40 minuta.

Pri već djelomice opisanim ispitivanjima ventilacije u Memorial tunelu u SAD [59], u tunel je bio postavljen i stacionarni naplavni (deluge) sustav pjene s primarnim ciljem da ugasi žarište u slučaju nužde. Postavljeni sustav raspršene pjene s 3% AFFF dodatno je iskorišten za procjenu utjecaja horizontalne ventilacije u tunelu na učinkovitost sustava pjene za gašenje lokvi diesel goriva. Rezultati su pokazali vrlo dobru učinkovitost pri brzinama zraka do

[184] Iskustva s FFFS u tunelima su vrlo malo poznata izvan Japana. Reference na engleskom jeziku su zbog nepoznatog razloga vrlo rijetke i stare.
[185] Pjenilo se dodaje samo u jednom tunelu

4,2 m/s, mada su gustoće primjene bile svega 2,4-3,8 L/m^{2}min[186]. Vrijeme gašenja požara tave s poprečnom ventilacijom i mlaznicama smještenima pod stropom, 4,3 m iznad površine kolnika, bilo je svega 5-25 s na požaru od 50 MW, Bendelius [93][187]. U uvjetima uzdužne ventilacije s jet ventilatorima, mlaznice za pjenu bile su smještene na zidu 2,1 m iznad kolnika, a vrijeme do gašenja bilo je od 102-111 s (tablica 6.6), što se također može smatrati izvrsnim rezultatom.

Tablica 6.6. Testovi gašenja pjenom u Memorial tunelu [93]

Ventilacija	Snaga požara, MW	Brzina zraka na žarištu, m/s	Vrijeme do gašenja, s
Puna poprečna	50	0,6	5
Polupoprečna-odsisna	50	1,1	8
Odsisna, jedan otvor	50	4,2	25
Uzdužna, jet ventilatori	50	2,5	102
Uzdužna, jet ventilatori	100	2,0	111

Tijekom već opisanih eksperimenata u 2nd Benelux tunelu, testirani su i sustavi raspršene vode [62, 215]. Kao gorivo su korištene drvene palete, autogume i automobili, a namjera je bila da se dobiju spoznaje o proizvodnji vodene pare, redukciji vidljivosti i učinkovitosti hlađenja sustava. S gustoćom primjene od 12,5 mm/min utvrđeno je da sustav raspršene vode:

- Ne može ugasiti požar u zatvorenom vozilu.
- Smanjuje vidljivost odmah nakon aktiviranja, putovi evakuacije se jedva mogu vidjeti, a sigurna vožnja nije moguća kroz gustu „kišu".
- Pri požaru manjem od 12,5 MW ne očekuju se veće količine vodene pare.
- Nakon gašenja požara snage približno 25 MW, uvjeti izdržljivosti niz vjetar od požara su i dalje teški, ali nisu kritični.
- Vozila koja nisu sudjelovala u akcidentu se mogu ohladiti, što smanjuje rizik od prenošenja požara.
- Uzdužna ventilacija brzine 5 m/s smanjuje učinak gašenja FFFS.

Prema VdS 3502 [220][188], sustavi za ranu detekciju i gašenje požara u tunelu mogu pomoći da se spriječe katastrofalni gubici uzrokovani samim požarom ili nastalim dimom. Ciljevi ovih sustava su da bitno olakšaju i poboljšaju:

- bijeg i spašavanje osoba u tunelu,
- gašenje požara,
- zaštitu građevine.

Za projekt stacionarnog naplavnog sustava pjene predloženi su sljedeći glavni parametri, koji su univerzalno primjenjivi [220]:

- minimalna gustoća primjene: 15 mm/min,

[186] Ove gustoće primjene pjene su manje od bilo kojih gustoća preporučenih u normama ili preporukama. Ni NFPA 11 [200] niti bilo koji drugi standard za primjenu pjene ni za koji slučaj primjene ne preporučuje gustoću manju od 4,1 L/m^{2}min.

[187] U odnosu na iskustva s gašenjem požara zapaljivih tekućina deluge sustavom pjene, navedena vremena gašenja izgledaju upravo nevjerojatno kratka.

[188] Ovu referencu zajednički su objavili: Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV), Institut für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung GmbH, Austrija, Institut für technische Sicherheit – SCHUTZHAUS, Austrija i Sicherheitsinstitut, Švicarska, što joj daje posebnu „težinu".

- primješavanje pjenila: najmanje 3% AFFF,
- veličina jedne zone (sektora gašenja): širina tunela x 30 m,
- ukupna površina zone aktiviranja (gašenja): 3 x širina tunela x 30 m,
- vrijeme opskrbe vodom i pjenilom: vrijeme do dolaska vatrogasne postrojbe do najudaljenije točke + 15 minuta, ali ne manje od ukupno 30 minuta (u dogovoru s vatrogascima),
- površina pokrivanja po mlaznici: 9 m^2,
- početak istjecanja vode: najviše 30 s po otvaranju alarmnog ventila,
- dobava vode: 2 pumpe x 100% ili 3 pumpe x 50% s rezervoarom (ako ne postoji vodovodna mreža).

Eksperimenti supresije sa sustavima vodene magle niskog i visokog tlaka izvedeni su u okviru već spomenutog europskog projekta UPTUN u tunelu visine 5 m, širine 8 m i duljine 100 m sa žarištima toplinske snage od 5-25 MW, Opstad i Stensaas [221][189]. Kao žarišta su primijenjene čelične tave s diesel gorivom površine 2,2 m^2, što odgovara toplinskoj snazi od 4-5 MW po tavi te čvrsto gorivo, koje je simulirano pomoću 80 standardnih drvenih europaleta ukupne mase 1600 kg, složenih u paralelopiped dimenzija 4,8 x 1,6 x 1,5 m. Pri nekim ispitivanjima žarišta su bila slobodna (nepokrivena), dok su kod drugih ispitivanja bila djelomice zaklonjena od direktnog djelovanja vodene magle jednostavnom konstrukcijom od plinobetona. Brzine strujanja zraka u tunelu poprečnog presjeka 40 m^2 iznosile su na uzvjetrenoj strani 1-2,5 m/s. Gustoće primjene vode bile su 1-3,5 L/m^2min kod niskotlačnog i 0,6-2,3 L/m^2min kod visokotlačnog sustava. Vrijeme predgorenja bilo je 2-3 minute na požarima s tekućim gorivom, dok su požari s krutim gorivom bili potpuno razvijeni u trenutku aktiviranja sustava magle. Testovi su pokazali da učinkovitost vodene magle pri kontroli požara snažno ovisi o veličini žarišta, vrsti i smještaju mlaznica i o gustoći primjene. Rezultati testiranja (tablica 6.7) pokazuju da je s malim žarištima, s malom *HRR*, postignuta mala redukcija toplinske snage.

Tablica 6.7. Učinci supresije sustava vodene magle [221]

Požarni scenarij	***HRR* prije supresije požara, MW**	**Redukcija *HRR*, %**	**Približni ekvivalent stvarnog požara**
Niskotlačni sustav vodene magle			
1 tava	2-5	0-60	1-2 automobila
2 tave	5-13	0-80	Mali furgon, 2-3 automobila
3 tave	17	80	Veliki furgon, javni autobus, više automobila
4 tave	22-24	70-80	Veliki furgon, javni autobus, više automobila
Drvene palete	17-25	40	Veliki furgon, javni autobus, više automobila
Visokotlačni sustav vodene magle			
1 tava	4-5	minorna	1-2 automobila
2 tave	10-11	10-70	Mali furgon, 2-3 automobila
3 tave	15-20	10-70	Veliki furgon, javni autobus, više automobila
4 tave	18-25	10-70	Veliki furgon, javni autobus, više automobila
4 tave s AFFF	18	50	Veliki furgon, javni autobus, više automobila
Drvene palete	17-20	50-80	Veliki furgon, javni autobus, više automobila

[189] Autori posebno ističu činjenicu da su požarni eksperimenti u velikom mjerilu skupi, da postoje računalni modeli koji mogu uključiti i utjecaj sustava vodene magle, ali da je simulacija interakcije između požara i stvarnog sustava raspršene vode još uvijek daleko iznad mogućnosti koje ti modeli pružaju.

Naprotiv, sa žarištima snage oko 20 MW, redukcija snage požara bila je do 80%, a u prosjeku oko 50% one *HRR* koja bi se razvila bez primjene sustava supresije. Uvjeti vidljivosti niz vjetar od požara nisu se popravili tijekom prvih nekoliko minuta nakon aktiviranja sustava supresije, ali su se kasnije popravili zbog smanjenja toplinske snage požara. Stvaranje vodene pare nije spomenuto.

Ovi rezultati Opstada i Stensaasa [221] su u načelnom suglasju s rezultatima istraživanja učinka gašenja vodenom maglom koje su proveli Back i sur.[222] na brodu Shadwell, jer je i prilikom tih eksperimenata ustanovljeno da problem ovog sustava predstavljaju mali požari s niskom *HRR*, dok je veće požare bilo lakše držati pod kontrolom ako su mlaznice i gustoća primjene bili dobro odabrani.

Za simuliranje požara u tunelu A86 East, širine 9,3 m i visine 2,55, izvedena je u Sargansu u Švicarskoj serija testova s vodenom maglom, Guigas i sur. [223]. Sustav vodene magle imao je gustoću primjene od svega 0,5-1,5 L/m^{2}min i nije imao zadatak da ugasi požar, već da *HRR* požara vozila zadrži u razumnim granicama[190]. Kao testni požar korištena su 4 vozila koja su simulirala sudar s nastalim požarom. Vršna toplinska snaga bila je 20 MW, a vrijeme predgorenja 8 minuta. Test je pokazao da nakon aktiviranja, sustav vodene magle drži požar pod kontrolom i da se požar ne prenosi na obližnja vozila. Vodena magla hladila je dimne plinove i smanjila toplinsko zračenje, pa je temperatura zraka izmjerena uz vozilo smješteno 75 m niz vjetar od žarišta iznosila 40 ^{0}C, dok se temperatura unutar vozila održala na 25 ^{0}C. Maksimalne koncentracije CO i CO_2 izmjerene u testu bile su približno 775 ppm i 2% izvan vozila, te 210 ppm i 0,64% unutar vozila (istim redom). Ispuštanje vodene magle poboljšalo je uvjete izdržljivosti i preživljavanja unutar vozila. Vidljivost na uzvjetrenoj strani žarišta bila je smanjena nakon ispuštanja magle, ali je vidljivost na nizvjetrenoj strani poboljšana.

Mogućnost smanjivanja šteta uzrokovanih požarom u rudnicima studirali su Yuan i Lazzara [225] i u sklopu istraživanja testirali učinak vodene magle na požar diesel goriva u simuliranim skladišnim prostorima podzemnih rudnika. Da bi se odredio utjecaj ventilacije i vremena predgorenja, izvedena je serija požarnih testova u velikom mjerilu na lokvama s *HRR* 230 kW, 1 MW i 3 MW pri 3 režima ventilacije: bez ventilacije, s prirodnom ventilacijom i s prisilnom ventilacijom. Vremena predgorenja bila su 30 s i 60 s. Bez ventilacije, najteže je bilo ugasiti žarište od 230 kW; s prirodnom ventilacijom najdulje je trajalo gašenje žarišta od 1 MW; s prisilnom ventilacijom najteže je bilo gašenje žarišta od 3 MW. Ovakvi rezultati objašnjavaju se mehanizmom gašenja vodene magle, koja na reakciju izgaranja utječe dvojako: hlađenjem plinske faze i smanjivanjem koncentracije kisika kojeg istiskuje nastala vodena para. Smanjivanje koncentracije kisika gotovo nije prisutno ako strujanje zraka odvodi nastalu paru iz zone izgaranja, no učinak lokalnog hlađenja zone plamena i dimnih plinova ostaje.

U preporukama za izvođenje eksperimenata s vodenom maglom predlaže se da se za postizanje punog učinka gašenja osiguraju uvjeti sa što manjim strujanjem zraka, Vaari [226]. Da bi vodena magla mogla ohladiti površinu goriva, kapljice moraju biti u stanju prodrijeti kroz vruće plinove i plamen. Dimenzije tih kapljica su vrlo male, pa im je i životni vijek kratak, što znači da će se do goruće površine probiti samo mali dio primijenjene vode. Stoga se glavni učinak vodene magle ispoljava u zoni plamena, gdje dolazi do intenzivnog isparivanja kapljica, što uzrokuje dobro hlađenje i istiskivanje kisika. Posljedica toga je da se brzina izgaranja može značajno smanjiti, ali se površine goriva neće nužno ohladiti dovoljno

[190] Stvarni sustav vodene magle ugrađen u tunel A86 ima gustoću primjene od 1,3 L/m^{2}min (0,5 L/m^{3}min) [224]

da prestane stvaranje zapaljivih para. Stoga se zahtjevi performansi u odnosu na sustav vodene magle na požarima A klase obično svode na kontrolu ili supresiju požara, sa ciljem da se ograniče štete na gorućem objektu i na okolnim površinama tijekom nekog vremena, a ne traži se potpuno gašenje požara. Gašenje požara može se postići u povoljnim uvjetima ili dodavanjem retardanta/pjenila u vodu. Ako se u stvarnim uvjetima štićeni objekti nalaze u struji zraka, to treba uzeti u obzir i pri eksperimentu. Značajnu pažnju Vaari [226] obraća na raspored mlaznica i njihovu udaljenost, posebno vertikalnu, te njihovu udaljenost od žarišta. Za svaku vrstu i raspored goriva potrebno je odabrati optimalan raspored mlaznica i uvjete primjene magle, pri čemu glavnu ulogu imaju oblik i karakter mlaza vodene magle, udaljenost od žarišta i gibanje zraka.

Sustavi vodene magle koriste se već dugi niz godina[191] i njihova je učinkovitost dokazana za sljedeće primjene, NFPA 750 [227]:

- požar slobodno istječućeg mlaza zapaljivog plina,
- požar prolivene lokve zapaljive tekućine,
- opasne tvari (krute), uključujući požare plastičnih pjena unutar namještaja,
- zaštita ljudi u avionu od požara vanjske lokve tijekom evakuacije,
- požar običnih zapaljivih tvari klase A (papir, drvo, tekstil),
- električna oprema (transformatori, sklopke, rastavljači, rotaciona oprema),
- požari zatvorenih prostora (npr. brodskih kabina i strojarnica, prostorija s računalnom opremom i elektronikom, hotelskih i uredskih prostorija).

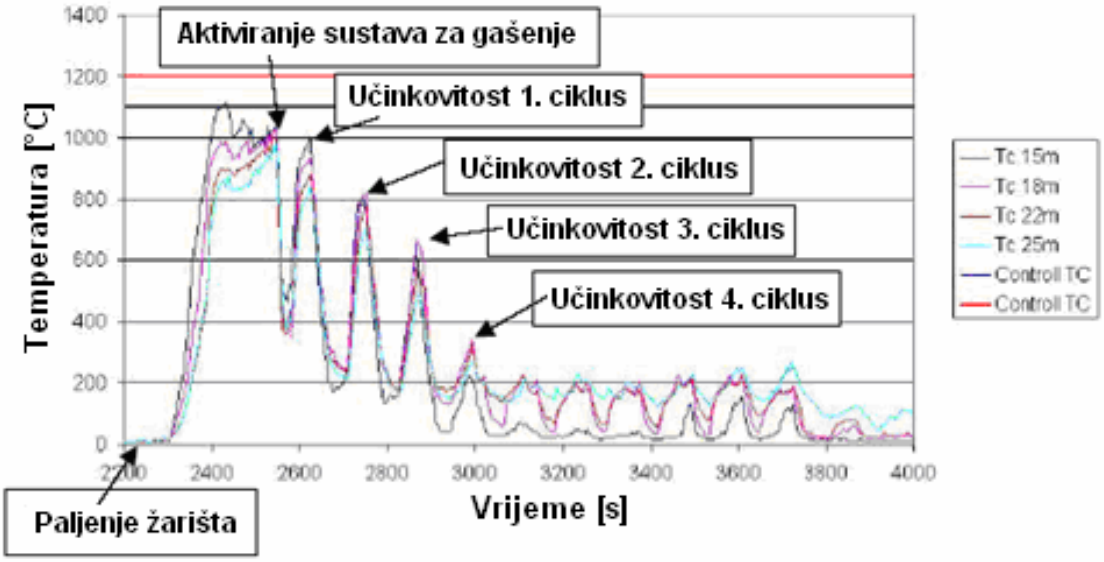
Pritom valja jasno razlučiti učinkovitost vodene magle kao medija za gašenje požara i kao medija za supresiju požara. Ako se sustav vodene magle koristi za gašenje požara, potrebno je proizvesti dovoljno sitne kapljice vode koje će ispuniti čitav volumen oko objekta koji se gasi traženom koncentracijom medija (vodene pare) i time doseći granične uvjete za gašenje prostora (volumno „poplavljivanje“). Osim učinka hlađenja zatvorenog prostora i graničnih površina s kojima dolaze u kontakt, kapljice vode iz magle evaporiraju u kontaktu s plamenom i vrućim površinama. Stvorena vodena para prodire u sve skrivene volumene danog prostora, gdje djeluje kao inertni plin, istiskujući zrak i smanjujući koncentraciju kisika na manje od 21%. Ovime se poboljšava učinak gašenja u zatvorenim prostorima. Ako je požar mali, s malom toplinskom snagom, ispariti će se samo mala količina vode, koncentracija kisika će se nedovoljno smanjiti i time malo utjecati na efekt gašenja. Na sličan se način učinkovitost vodene magle smanjuje ako se prostor izgaranja ventilira, budući da strujanje zraka odnosi kapljice vode i nastalu paru iz zone izgaranja i gašenja. Ovo obrazloženje potvrđuju i rezultati istraživanja, Mawhinney [228], koji su pokazali da gustoća primjene sustava vodene magle jako ovisi o uvjetima u prostoru u kojem se magla koristi. Dok je u zatvorenim prostorima bez ventilacije gašenje požara bilo moguće postići s gustoćom primjene od 3,5 L/m^2min, za uspješno gašenje s uključenom ventilacijom bila je potrebna gustoća primjene od 6-16 L/m^2min.

Sustavi vodene magle koji su namijenjeni za supresiju/kontrolu požara, a ne za njegovo gašenje bitno su drugačiji, jer se projektiraju tako da im cilj djelovanja nije potpuno gašenje. Učinak sustava za supresiju/kontrolu požara prvenstveno se ispoljava time što kapljice vode hlade plamen, vruće dimne plinove i površine u neposrednoj blizini žarišta. Na taj se način ograničava razvoj i širenje požara, veličina *HRR* se zadržava na nižoj vrijednosti, moguće reakcije zbog zagrijavanja zapaljivih tvari se ublažavaju, a količina i temperatura dimnih plinova se smanjuje. Posljednjih nekoliko godina sustave vodene magle za zaštitu tunela od

[191] NFPA Technical Committee on Water Mist Fire Suppression Systems osnovan je 1993. sa ciljem da se standardizira tehnologija vodene magle i da se daju upute za projektiranje i izvođenje [227]

požara uglavnom razvijaju pojedini proizvođači od kojih su za primjenu u cestovnim tunelima možda najpoznatiji Aquasys Austrija, Fogtec Njemačka, Marioff Finska, Eusebi Impianti Italija i VID Fire-Kill Danska. Opisivanje programa i mogućnosti pojedinih tvrtki je izvan opsega ovog rada.

Jedan od mogućih sustava za smanjivanje posljedica požara u tunelima je i stacionarni sustav pjene. Iako je o vatrogasnim pjenama već raspravljano u prethodnom tekstu, potrebno je spomenuti da visoke temperature zraka, odnosno temperature i kemijski sastav mješavine zraka i dimnih plinova mogu negativno utjecati na kvalitetu stvorene pjene. Ovu poznatu pojavu potvrđuje Bobert [229], mada se ova referenca odnosi na pjene visoke ekspanzije, koje zbog male specifične gustoće i s time povezane osjetljivosti na strujanje zraka ne dolaze u obzir za primjenu u stacionarnim sustavima za gašenje tunelskih požara. Sustavi CAFS, kod kojih bi načelno bilo moguće za generiranje pjene koristiti nezagađeni hladni zrak iz boca s komprimiranim zrakom, također su teško primjenjivi za stacionarne sustave tunela. Ipak, postoje podaci o eksperimentima sa stacionarnim sustavom CAFS, koji su izvedeni u već opisanom tunelu Runehamar godine 2005. [219, 230]. Izvedena su 2 testa: jedan s paletama volumena oko 100 m^3 s mogućom *HRR* do 300 MW[192], a drugi s lokvom od 5000 L diesel goriva u tavi površine 100 m^2 s mogućom *HRR* do oko 200 MW. U eksperimentu s krutim gorivim tvarima korišteno je 720 europaleta (80% drvenih, 20% plastičnih), složenih u paralelopiped dimenzija 14,4 x 2,4 x 3 m. Sustav za gašenje, segment duljine 12,5 m, aktiviran je 5 minuta nakon paljenja u trajanju od 40 s. U tom je trenutku *HRR* dosegla oko 170 MW. Nakon 40 s aktiviran je i drugi segment, ali je pjena korištena uvijek samo u jednom segmentu. Nakon četvrtog ciklusa (480 s), temperature su se smanjile na ispod 200 ^{0}C (slika 6.6).



Slika 6.6. Krivulje temperature pri eksperimentu s CAFS u tunelu Runehamar [230]

Za test sa zapaljivom tekućinom korištena je tava dimenzija 25 x 4 m. Sustav gašenja aktiviran je nakon predgorenja od 2-3 minute, u trenutku kad je snaga požara dosegla oko 140 MW. Gašenje je započelo na objema vanjskim segmentima, nakon čega je aktiviran i središnji segment, a žarište je ugašeno nakon 120 s. Pri eksperimentima je uzdužna brzina strujanja

[192] Meeussen i sur. [231] navode toplinsku snaga od 150-200 MW za oba eksperimenta.

zraka iznosila 2-3 m/s, a gustoća nanošenja pjene 5,6 L/m^{2}min. Ovim eksperimentima dokazano je još jednom da se pjenom iz stacionarnog sustava može u roku od nekoliko minuta ugasiti veliki požar zapaljive tekućine, te vrlo uspješno supresirati požar velikog tereta klase A. Temperature zraka na uzvjetrenoj strani žarišta smanjene su na ispod 50 ^{0}C, a na nizvjetrenoj strani na ispod 100 ^{0}C, što znači da su vatrogascima stvoreni vrlo povoljni uvjeti za intervenciju. Vidljivost u tunelu bila je posve izgubljena već prije aktiviranja sustava za gašenje zbog veličine požara i dugog perioda predgorenja. Tijekom gašenja/supresije požara nije zabilježeno signifikantno stvaranje para niti deflagracija goriva. Ipak, zbog neočekivano visokih troškova gradnje tunela, stacionarni CAF sustav nije na koncu primijenjen u tunelu za koji su eksperimenti izvedeni, ali je CAF primijenjena na ručnim mlaznicama u stanicama za hitne slučajeve[193].

Zbog odustajanja od gradnje stacionarnog CAF sustava, težište testiranja u tunelu Runehamar prebačeno je na sustav vodene magle obogaćene pjenilom, Meeussen i sur. [231]. Žarišta su bila gotovo identična prije opisanima. Funkcionalni zahtjevi koji su postavljeni pred sustav vodene magle bili su:

- Reducirati požar žarišta s krutim gorivom (palete cca 100 m^3) potencijalne snage 200 MW tako da unutar 1 minute po dobivanju alarma „veliki požar[194]“:
  - na udaljenosti od 30 m uzvjetreno od žarišta, toplinski tok ne bude veći od 3 kW/m^2, a temperatura okoliša ne viša od 50 ^{0}C;
  - na udaljenosti od 20 m uzvjetreno od žarišta, toplinski tok ne bude veći od 5 kW/m^2, a temperatura okoliša ne viša od 50 ^{0}C;
  - na udaljenosti od 5 m nizvjetreno od žarišta, toplinski tok ne bude veći od 12,5 kW/m^2, a temperatura okoliša ne viša od 280 ^{0}C.
- Držati požar krutog goriva pod kontrolom najmanje 50 minuta.
- Ugasiti požar tekućeg goriva potencijalne snage 200 MW unutar 1 minute po dobivanju alarma „veliki požar“.

U tu je svrhu izvedeno 5 testova s vodenom maglom u tunelu i to:

- 50 MW, požar krutine, 180 paleta, 80% drvo, 20% plastika, s dodatkom AFFF,
- 200 MW, požar tekućine, 100 m^2 diesel gorivo, s dodatkom AFFF,
- 200 MW, požar tekućine, 100 m^2 diesel gorivo, bez dodatka AFFF,
- 200 MW, požar tekućine, 100 m^2 diesel gorivo, s dodatkom „ekološkog“ pjenila,
- 200 MW, požar krutine, 720 paleta, 80% drvo, 20% plastika, bez dodatka AFFF.

Sustav vodene magle sastojao se od 3 sekcije duljine po 25 m. U svaku su sekciju postavljene po 3 uzdužne cijevi za dovod vode međusobno udaljene 3 m, na kojima su se nalazile mlaznice na međusobnom razmaku od 2 m. Sustav je napajala pumpa od 3000 L/min pri tlaku od 50 bara. Doziranje pjenila bilo je uvijek 1%.
Mjerenjem temperature dokazano je ispunjavanje postavljenih zahtjeva.

Ovih 5 testova izvedeno je koncem 2007. i početkom 2008. godine još jednom, ali sada u svrhu mjerenja utjecaja koji različiti požari imaju na tank propan-butana i mogućnost nastanka BLEVE. U tu je svrhu izrađen testni tank promjera 2,5 m i duljine 6 m, opremljen senzorima temperature i toplinskog toka. Udaljenost između testnog tanka butan-propana[195] i

[193] Stacionarni CAFS trebao je biti instaliran u tunelima na autocesti A73 u Nizozemskoj, ali je ministar prometa 2006. godine prekinuo projekt zbog previsokih troškova.
[194] Obavijest „veliki požar“ dolazila je od linearnog toplinskog detektora pri temperaturi od oko 150 ^{0}C, što reprezentira žarište od 25 MW.
[195] U testnom tanku nije se zbog sigurnosti nalazio propan-butan, nego voda.

žarišta bila je 6 m. U prva 4 testa dokazano je da stacionarni sustav onemogućava nastanak BLEVE s velikom rezervom sigurnosti. U petom je testu stacionarni sustav namjerno doveden do granice svojih mogućnosti, jer je uključen čak 7 minuta nakon paljenja žarišta, pa je temperatura u stijenki tanka dosegla kritičnu temperaturu od 600 ^{0}C. Zaključci ove serije testova bili su sljedeći, Meeussen i sur. [231]:

- Sustav vodene magle je vrlo efikasan vatrogasni sustav.
- Sustav vodene magle može ugasiti ili kontrolirati požar tekućine od 200 MW (posebno s dodatkom AFFF) dovoljno brzo da onemogući BLEVE.
- Sustav vodene magle može reducirati i kontrolirati požar krutine od 50 MW te eliminirati rizik od BLEVE.
- Pri požaru krutog goriva od 200 MW, dosegnute su granice učinkovitosti sustava, budući da je aktiviran tek 7 minuta nakon zapaljenja. Ozbiljan rizik od BLEVE pojavio se između 400-te i 1300-te sekunde nakon zapaljenja.
- Brza detekcija i aktiviranje sustava bitni su za poboljšanje uvjeta izdržljivosti[196] i za sprječavanje BLEVE na nizvjetrenoj strani. Pri požaru lokve od 100 m^2 i s aktiviranjem sustava nakon 80 s, uvjeti na nizvjetrenoj strani su svega 5 minuta opasni po život. U slučaju požara paleta od 50 MW, uvjeti na nizvjetrenoj strani su svega 3 minute opasni po život [231].

Lemaire i Meeussen [232] za istu seriju ispitivanja navode sljedeće zaključke glede uvjeta izdržljivosti:

- Ublažavajući učinak sustava vodene magle na opasne uvjete je potpuno jasan: požari lokve bili su kratkotrajni, svega nekoliko minuta, a visoke temperature i koncentracije CO nestale su ubrzo po gašenju žarišta. Gašenje žarišta s paletama trajalo je nešto dulje, posebno u posljednjem testu.
- Nisu zabilježeni nikakvi posebni negativni učinci sustava vodene magle osim smanjene vidljivosti niz vjetar od žarišta tijekom djelovanja. Procijenjeno je da je mogući negativni učinak povećane vlažnosti zraka malen u usporedbi s pozitivnim učinkom supresije požara.
- Smanjenje veličine i trajanja požara postignuto sustavom supresije ima snažan blagotvorni učinak na trajanje neizdržljivih uvjeta nizvjetreno od požara, posebno pri požaru lokve.
- Dokazano je da rana detekcija požara i brzo aktiviranje sustava supresije reduciraju veličinu požara i drastično poboljšavaju uvjete na nizvjetrenoj strani. Ovo znanje treba inkorporirati u buduće projekte sustava supresije u tunelima[197].

Vrste FFFS koje se danas koriste u tunelima najčešće pripadaju u jednu od sljedećih dviju grupa:

- U zemljama u kojima se FFFS normalno koriste već dugi niz godina (Japan, Australija), izbor je klasični naplavni sustav raspršene vode niskoga tlaka (deluge).
- U europskim zemljama novi tuneli opremljeni FFFS u pravilu koriste vodenu maglu.

[196] Uvjeti izdržljivosti određivani su mjerenjem temperature i koncentracije CO, uzevši u obzir vrijeme izlaganja.

[197] Kao rezultat ovih testova izgleda da bi ostanak unutar zaustavljenog vozila na nizvjetrenoj strani tunelskog požara koji će se hitro ugasiti mogao biti prikladan postupak u specifičnim uvjetima zbog kratkog trajanja neizdržljivih uvjeta. Kao (zasad) neodgovoreno, postavilo se pitanje da li što hitrije napuštanje vozila i evakuacija, što se redovito preporučuje u slučaju tunelskog požara, ima smisla i kad je tunel opremljen s FFFS [232]. Ako bi se ostanak u vozilu pokazao kao dovoljno siguran, sljedeće opravdano pitanje moglo bi se odnositi na potrebu za gradnjom“sigurnih“ izlaza.

Bitna razlika među ovim dvjema sustavima je u veličini kapljica vode izbačenih iz mlaznica. Dok je tipični promjer kapljica klasičnog deluge sustava 1-5 mm (jednako kao kod klasičnog sprinklera), u sustavima magle tipični promjer je 0,025-0,2 mm[198]. Sitnije kapljice posljedica su prvenstveno mnogo višeg radnog tlaka, koji u sustavima vodene magle ide i do 100 bara, ali i učinka posebno konstruiranih mlaznica. Klasični deluge sustav učinak gašenja uglavnom bazira na močenju i hlađenju goriva, dok sustav vodene magle, prema tvrdnjama proizvođača, koje su danas gotovo općenito prihvaćene u Europi, djeluje trostrukim efektom: hitro hladi požar i okolni zrak, blokira širenje topline zračenja i isparivanjem vode oduzima požaru kisik potreban za izgaranje, HI-FOG [234]. Posljedica prihvaćanja takvog razmišljanja je da danas većina novih FFFS u Europi koristi princip vodene magle. Ipak, izgleda da su za općenito gašenje požara vozila oba sustava učinkovita, pa bi izbor trebalo temeljiti prvenstveno na potrošnji vode[199] i na ekonomskim faktorima, PIARC [215].

Među prednosti vodene magle proizvođači sustava, ali i mnogobrojni drugi stručnjaci navode:

- Mnogo manju (nekoliko puta manju) potrebnu količinu vode, zahvaljujući boljem iskorištenju vode koja se izbacuje u vidu vrlo sitnih kapljica (magle).
- Korištenje cijevi, armatura i drugih komponenti od visokokvalitetnih nehrđajućih čelika, što jamči mnogo dulji životni vijek instalacije nego kod tradicionalnog deluge sustava.
- Bolje hlađenje prostora tunela, što može pridonijeti tome da ostala tunelska oprema ima manju toplinsku i požarnu otpornost.

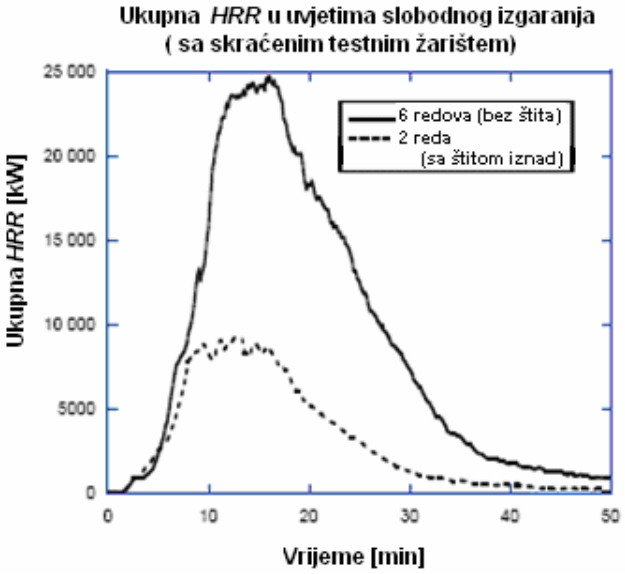
Na bazi svojih iskustava neki proizvođači tvrde da sustav vodene magle može biti čak jeftiniji nego klasični deluge sustav ako se ekonomičnost promatra na dugi period od približno 30 godina, Mawhinney [235].

Ipak, nedavno objavljeni rezultati opsežnih usporednih testova u pravom mjerilu dovode u pitanja možda najveću proklamiranu i općeprihvaćenu prednost sustava vodene magle: manju potrošnju vode za isti učinak supresije, Arvidson [106, 236]. Pri ovim testovima istražen je učinak gustoće primjene vode, tlaka vode i vrste kapljica na supresiju simuliranog požara tereta HGV na ro-ro palubi, i to za klasični deluge sustav i za visokotlačni sustav vodene magle. Učinci obaju sustava raspršene vode ispitani su na jednakom tipičnom teretu HGV (plastične čašice u kartonskim kutijama naslagane na europalete) i to u dvije situacije: tako da je žarište bilo potpuno izloženo mlazu raspršene vode (nezaštićeno) i tako da je žarište bilo zaštićeno vatrootpornim štitom. Iako su izvedeni u nešto drugačijim uvjetima nego što su tunelski, ovi testovi relevantni su i za primjenu u tunelima, jer su uvjeti bili takvi da reprezentiraju „najgori slučaj“ u tunelu [106]. Da bi se odredile performanse testiranih sustava za supresiju i kontrolu požara, mjerene su ukupna i konvekcijska *HRR*. Maketa goriva geometrijski je bila jednaka tipičnom teretu HGV, osim što je ukupna duljina bila manja, tj. skraćena na 6 odnosno 2 reda paleta. Palete su postavljene na čeličnu platformu visine 1,10 m. Prethodni testovi pokazali su da su rezultati na skraćenom rasporedu tereta uz jednaki poprečni presjek reprezentativni za požar jednakog stvarnog tereta HGV. Sa 6 redova od po 4 palete tereta izmjerena je potencijalna vršna *HRR* od 25 MW pri slobodnom izgaranju, a s 2 reda, potencijalna vršna *HRR* bila je oko 9 MW. U prvom slučaju primjene, mlazovi vode slobodno su se raspršivali iznad upaljenog tereta, a u drugom slučaju je na visini od 0,5 m

[198] Glede tipične veličine kapljica u literaturi se navode različiti podaci. Npr. Kenneth [233] za veličinu kapljica standardnog deluge sustava daje 700 μm, a za visokotlačnu vodenu maglu 50-100 μm.

[199] Niža potrošnja vode u sustavima vodene magle često se navodi kao posebna prednost. Imajući u vidu da je voda izrazito jeftin medij, taj je argument posve beznačajan. Ipak, niža potrošnja vode (L/min) ima utjecaj na cijenu sustava (manje pumpe, manje dimenzije cijevi i armatura, manji rezervoar na strani dovoda vode, ali i manja potreba za odvodnjom itd.), no to su u biti ponovno ekonomski faktori.

iznad tereta bila postavljena čelična ploča da simulira pokrov nad teretom. Na slici 6.7 prikazane su krivulje *HRR* za ova dva slučaja. Sustavi supresije ručno su aktivirani pri konvekcijskoj *HRR* od 3 MW, što odgovara ukupnoj *HRR* od oko 5 MW.

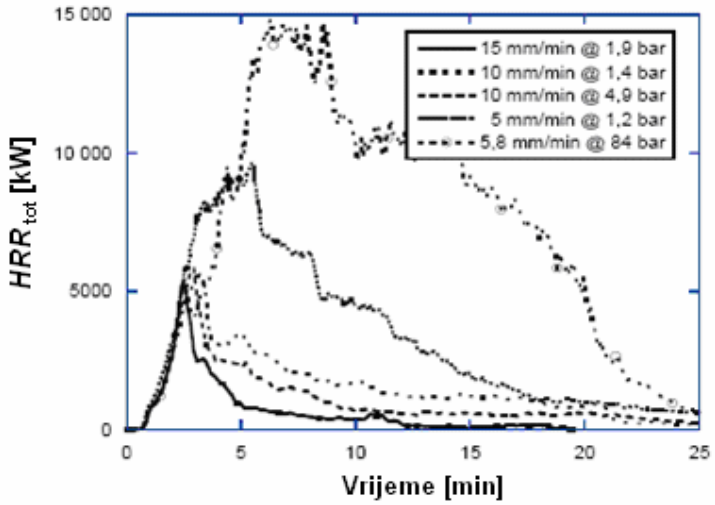


Slika 6.7. Potencijalna *HRR* testnog goriva za dvije veličine tereta i dva načina izlaganja [106]

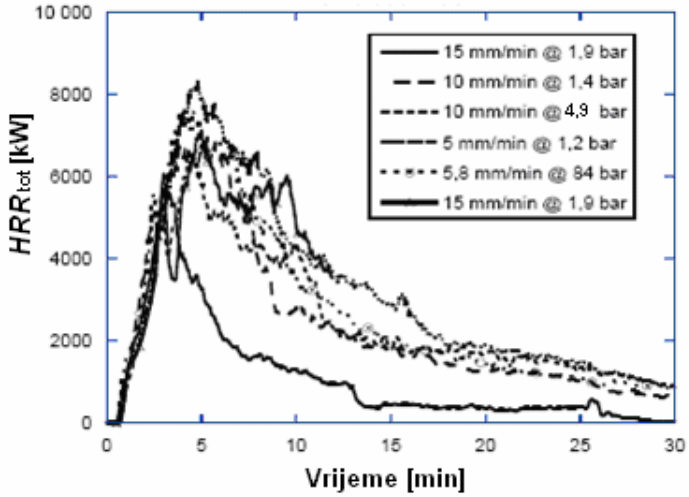
Slika 6.8. Žarište u trenutku aktiviranja FFFS (test bez pokrova na maketi žarišta) [106]

Rezultati testova **bez pokrova** pokazali su da klasični deluge sustav pruža sljedeće: pri gustoći primjene od 15 mm/min osigurava trenutnu supresiju požara na teretu HGV; pri gustoći od 10 mm/min daje supresiju požara; pri 5 mm/min daje kontrolu požara. Povećanja tlaka vode s 1,2 bara na 4,9 bara pri gustoći primjene od 10 mm/min poboljšalo je učinak supresije, što dokazuje da sitnije kapljice vode poboljšavaju performanse sustava. Pri konačnom testu s 10 mm/min, aktiviranje je namjerno odgođeno sve dok *HRR* nije dostigla dvostruku prethodnu veličinu, ali je požar ipak gotovo trenutno supresiran. Na testovima s visokotlačnom vodenom maglom pri gustoći primjene od 3,75 i 4,6 mm/min požar je rastao bez kontrole, pa su testovi prekinuti, a žarišta ugašena primjenom deluge sustava. Test s gustoćom primjene magle od 5,8 mm/min ostvario je kontrolu požara, ali su ukupna i konvekcijska *HRR*, kao i ukupna i konvekcijska razvijena energija bile približno dvostruko

veće nego kod deluge sustava pri 5 mm/min. Vizualno opažanje pokazalo je da je tijekom testa s vodenom maglom izgorio mnogo veći dio testnog goriva.



Slika 6.9. Tok ukupne *HRR* pri požarnim testovima bez pokrova na maketi HGV [106]



Slika 6.10. Tok ukupne *HRR* pri požarnim testovima s pokrovom na maketi HGV [106]

Rezultati testova **sa zaštitnim pokrovom** iznad goriva pokazali su da deluge sustav sa svim gustoćama primjene ima samo ograničeni učinak na ukupnu *HRR* i ukupnu oslobođenu energiju. Najbolji rezultati dobiveni su s deluge sustavom i gustoćom primjene od 10 mm/min pri tlaku od 4,9 bara. S vodenom maglom test je izveden samo s gustoćom od 5,8 mm/min. Ukupna oslobođena energija bila je pritom manja nego kod bilo kojeg klasičnog deluge sustava, što ponovno dokazuje bolju efikasnost hlađenja manjih kapljica vode.

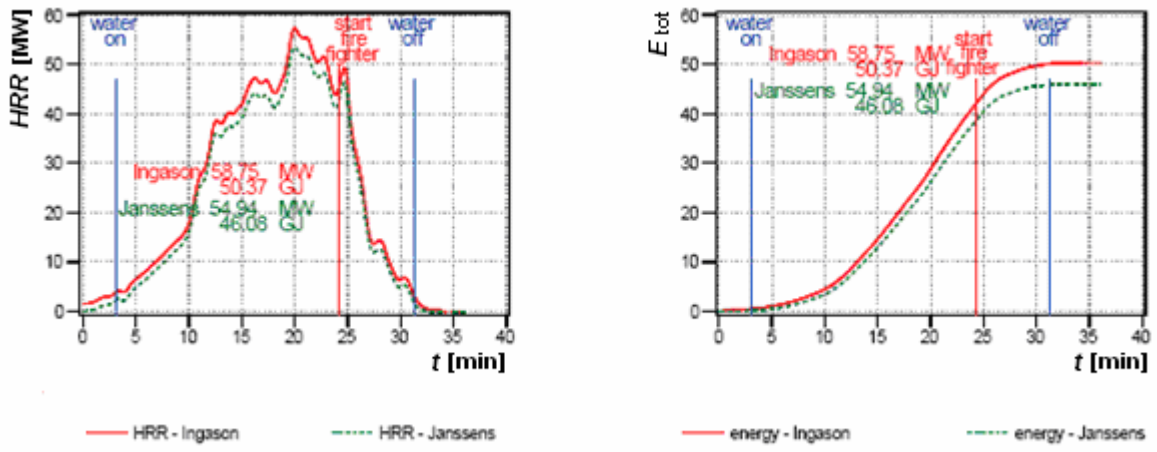
Da bi sustav raspršene vode ili sustav vodene magle mogli učinkovito supresirati požar krutih gorivih tvari, kapljice vode moraju biti u stanju probiti se do goruće površine. To znači da brzina kretanja kapljica prema dolje mora biti veća od brzine kretanja dimnih plinova prema gore. Prodor kapljica smanjuje i njihova evaporacija, pa iako se evaporacijom plamenovi hlade, rast požara se samo malo umanjuje. Pri zaklonjenom žarištu, visokotlačni sustav vodene magle bolje reducira konvekcijsku *HRR* i ukupnu konvekcijsku energiju nego

raspršena voda (deluge), no sposobnost umanjenja ukupne *HRR* i ukupne oslobođene energije nije zabilježena, Arvidson [106, 236].

Glede međusobnog odnosa učinkovitosti različitih FFFS, zanimljiva je analiza prezentirana za ro-ro brodove u FP51 [237], koja pokazuje da požar prolivene lokve diesel goriva u zajednici s požarom HGV dosiže toplinsku snagu od oko 200 MW ako se sustav raspršene vode ne aktivira. Sprinkler sustav projektiran po zahtjevima standarda reducirati će požar na ne manje od 40-60 MW, uglavnom zato što vozila onemogućavaju da voda dopre do žarišta požara. Veće gustoće primjene izgleda da ne doprinose učinkovitosti zbog učinka štita. Alternativni sustav s nisko postavljenim mlaznicama za pjenu (AFFF) i mlaznicama za vodenu maglu pri stropu ograničio je požar lokve tako da je ukupna toplinska snaga smanjena na oko 20 MW.

Prednost standardnom deluge sustavu u odnosu na sustav vodene magle na temelju eksperimenata zagovara i Kenneth [233], navodeći sljedeće prednosti: učinkovitu kontrolu temperature, učinkovito onemogućavanje širenja požara, učinkovitu zaštitu građevine, učinkovitost supresije, iskušanu tehnologiju, niske zahtjeve održavanja i laku dobavljivost komponenti.

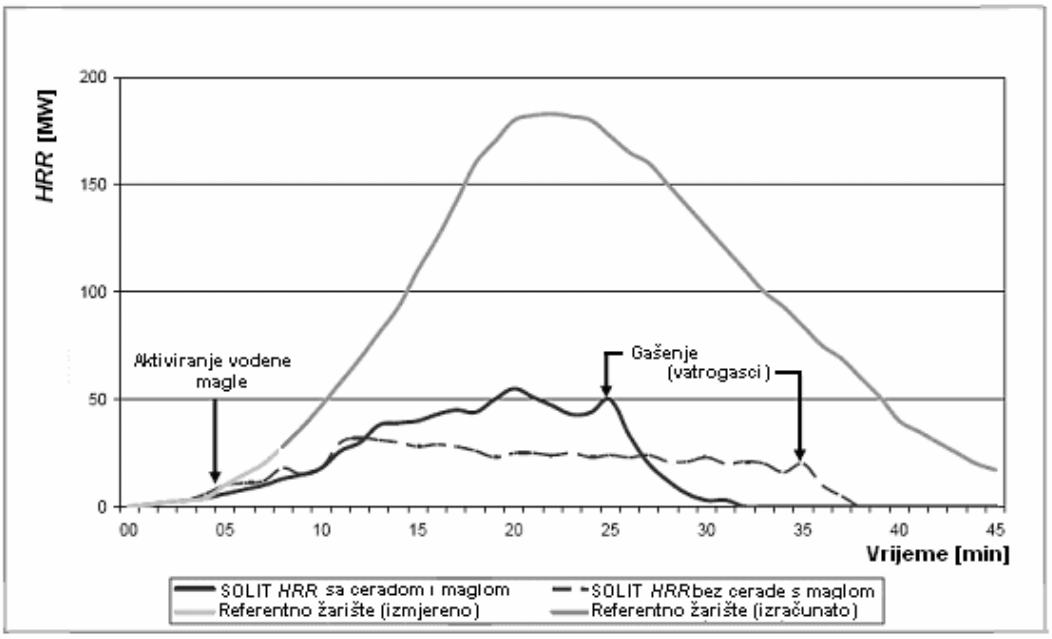
Mogućnosti FFFS s vodenom maglom za kontrolu požara potvrđuju opsežna istraživanja izvedena 2006. godine u pravoj veličini u testnom tunelu San Pedro des Anes u Asturiji, Španjolska u okviru projekta SOLIT, Starke [238]. U tunelu duljine 600 m s dvije vozne trake izvedeno je ukupno 65 testova: 27 sa zapaljivim tekućinama, 26 s europaletama kao tipičnim teretom HGV i 12 kao trening program Vatrogasne postrojbe Madrid. Vodena magla je osjetno usporila razvoj požara, omogućila da se HRR zadrži ispod 60 MW umjesto očekivanih > 120 MW pri slobodnom izgaranju tijekom više od 20 minuta, stvorila dobre uvjete za preživljavanje na nizvjetrenoj strani i vatrogascima omogućila lako i brzo konačno gašenje. Problemi s vodenom parom nisu detektirani pri nikojem od testova. Autor napominje da za postizanja takvih rezultata sustav vodene magle mora biti aktiviran dovoljno rano i na pravome mjestu. Zanimljivo je spomenuti da je kao jamstvo sigurnosti u eksperimentalni tunel bio instaliran sustav za gašenje pjenom, ali u stvarnosti nije bio korišten.



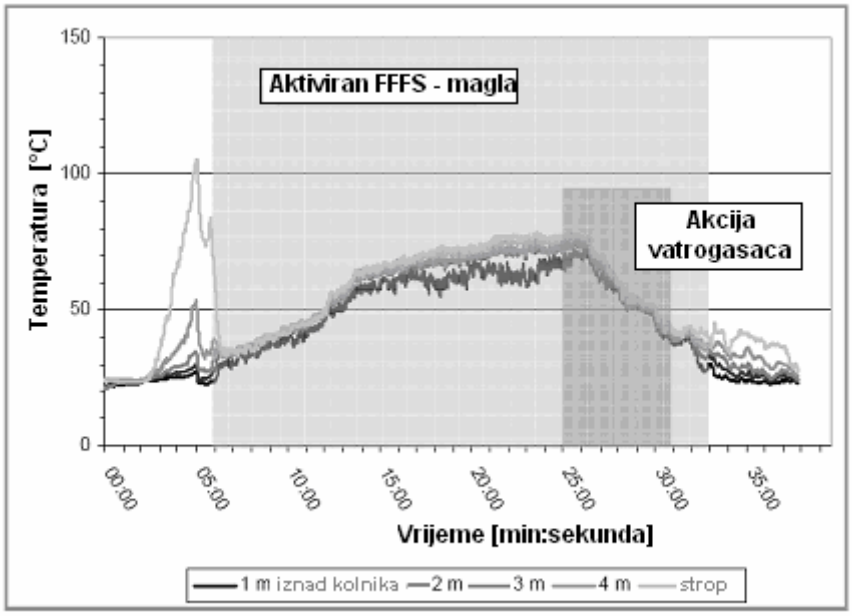
Slika 6.11. Toplinska snaga *HRR* i ukupno oslobođena energija E_{tot} prema dvije metode izračuna [238]

Od iste serije ispitivanja u testnom tunelu San Pedro des Anes u Asturiji potječu 2 grafa koja pokazuju moguće dobre performanse sustava vodene magle za kontrolu/supresiju požara, Häggkvist [239]. Pri požaru makete HGV s krutim teretom od europaleta, procijenjene

toplinske snage 180 MW (bez gašenja), zahvaljujući ranom aktiviranju FFFS, snaga žarišta ograničena je na približno 30 MW u slučaju kada teret nije bio pokriven, odnosno na oko 50 MW ako je teret bio pokriven ceradom (slika 6.12). Porast temperatura zadržan je u prihvatljivim granicama (slika 6.13), količina dima je bitno smanjena, a stratifikacija dima nije izgubljena u potpunosti.



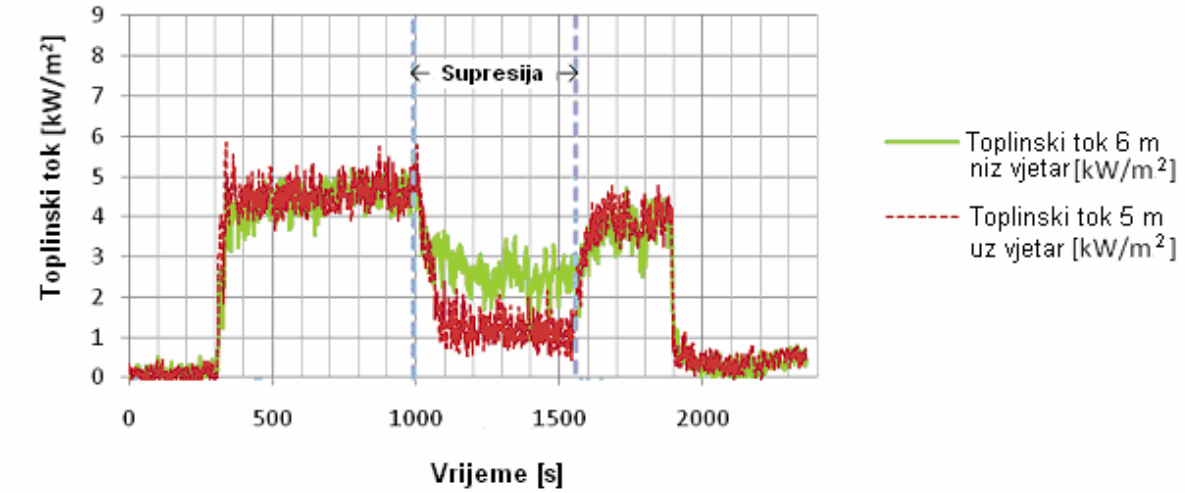
Slika 6.12. Usporedba *HRR* s uporabom sustava vodene magle i pri slobodnom gorenju [239]



Slika 6.13. Temperature na 20 m niz vjetar od pokrivenog žarišta [239]

Povećani interes za FFFS doveo je do postavljanja pitanja međusobnog odnosa ovog sustava i sustava ventilacije glede upravljanja dimom, odnosno kako će aktiviranje FFFS utjecati na upravljanje backlayeringom. Ovo pitanje istraženo je u eksperimentima izvedenima u laboratorijskom tunelu Carleton University u Almonte, Ontario, Kanada, Yoon i

Hadjisophocleous [71]. Iako laboratorijski, ovaj tunel ima poprečni presjek približno jednak pravom tunelu (širina 10 m, visina 5,5 m, duljina 37,5 m), pa se rezultati mogu ekstrapolirati na dulje tunele. Pri testu je plamen propana pokriven zaštitnim štitom da se dobije konstantna *HRR*, a kao FFFS je korišten klasični sprinkler sustav s velikim kapljicama vode i gustoćom pokrivanja od 12,2 L/m^{2}min pri tlaku od 1,38 bara. Aktiviranjem sprinkler sustava temperature dima pod stropom i toplinsko zračenje su drastično smanjeni. Pri maloj uzdužnoj brzini strujanja zraka 1-2 m/s ipak nije došlo do pojava backlayeringa niti nakon aktiviranja FFFS, što ukazuje na činjenicu da je sa smanjenjem temperature zraka u tunelu smanjena i uzgonska sila koja uzrokuje backlayering. Ovu činjenicu kao rezultat djelovanja FFFS s vodenom maglom potvrđuju Leuckner i Kratzmeir [240].



Slika 6.14. Usporedba toplinskog toka na uzvjetrenoj i nizvjetrenoj strani žarišta s i bez sprinklera [71]

Opravdanost ugradnje FFFS, kao instalacije koja bitno doprinosi smanjenju vjerojatnosti nastupa katastrofalnog požara, pokazuje i namjera da se stacionarni deluge sustav za supresiju požara ugradi u najdulji kombinirani podmorski tunel (cestovni i željeznički), Fehmarnbelt Fixed Link tunel, između Rødbyhavna u Danskoj i Puttgartena u Njemačkoj, Williams i sur. [241]. Duljina ovog tunela, koji će se sastojati od 4 paralelne prometne cijevi (2 za cestovni i 2 za željeznički promet), iznositi će 18 km. Preliminarna procjena pokazala je zadovoljavajuću razinu sigurnosti čak i sa sustavom uzdužne ventilacije i bez restrikcija za transport opasnih tvari, čemu doprinosi FFFS, koji će se koristiti u sve 4 tunelske cijevi. Trenutni učinak instaliranog sustava supresije trebao bi biti ograničenje veličine požara i kontrola razvoja požara. Ako izgaranje bude ograničeno na unutrašnjost vozila, sustav će požar kontrolirati umjesto da ga supresira ili ugasi. Kontrolom požara izbjeći će se njegov razvoj prema katastrofalnom požaru, zaštititi tunelska građevina te minimizirati oštećenja i vrijeme popravka [241].

6.5.1 Slučaj tunela Burnley, Australija

Fatalni požarni akcident u tunelu Burnley pružio je rijetku priliku za uvid u učinkovitost stacionarnih sustava za gašenje požara. Dana 23.3 2007. u 09:54:24 došlo je do sudara 4 HGV i 7 automobila u tunelu City Link Burnley[200] u Melbourne, uzrokovanog zaustavljanjem

[200] Tunel Burnley je jednosmjerni gradski tunel s 3 prometne trake i prometom od približno 100 000 vozila/dan, Dix [14].

jednog HGV dvije minute ranije. U sudaru je život izgubilo troje ljudi[201], izbio je požar i započeo je niz eksplozija [14][202]. U roku od približno 1 minute, operator tunela prebacio je sustav upravljanja u akcidentni režim (zaustavljanje prometa, uključivanje odimljavanja ventilacijom, uključivanje deluge sustava, signaliziranje evakuacije), a nakon daljnjih približno 30 s odimljavanje i deluge sustav započeli su djelovati. Iako su inicijalni događaji bili bitno teži nego pri 3 poznata katastrofalna akcidenta u europskim tunelima (požar se sastojao od nekoliko žarišta, po procjeni je gotovo trenutno došao do snage od nekoliko desetaka MW, uvjeti za širenje bili su vrlo povoljni zbog blizine mnoštva drugih vozila, Dix [242]), ovaj potencijalno iznimno opasan požar uspješno je ograničen nakon aktiviranja FFFS. Unatoč tome, nije moguće ustvrditi da je samo prisutnost FFFS bila bitna. Sustav ventilacije učinkovito je spriječio backlayering (nagib tunela na mjestu sudara je strmih 6,2%) i hitro smanjio uzdužnu brzinu strujanja zraka na približno 2 m/s, kako bi se optimiralo izvlačenje dima i minimizirao razvoj požara induciran ventilacijom. Požar je na kraju ugasila vatrogasna postrojba, a klasični deluge sustav ga je do dolaska vatrogasaca samo održavao dovoljno malim da se omogući učinkovita intervencija[203]. Tijekom akcidenta, iz tunela je evakuirano oko 400 ljudi i njihova vozila. Nitko od evakuiranih nije bio ozlijeđen, a vozila nisu bila oštećena. Oštećenja tunela bila su minimalna i da nije bilo potrebno izvršiti detaljno snimanje stanja odnosno oštećenja, mogao je biti otvoren desetak sati nakon akcidenta. To znači da je čitav sustav sigurnosti bio izvrsno zamišljen i međusobno dobro integriran. Prema Dix [14], u tunelu Burnley praktično su dokazane teoretske postavke da:

- Brzo aktiviranje FFFS i mala uzdužna brzina zraka uzrokuju minimalni rast požara,
- Požar u vozilima FFFS ne gasi, ali omogućava vatrogascima da lako ugase mali požar,
- FFFS s gustoćom primjene od oko 10 L/m^{2}min uspješno sprječava porast i prijenos požara.

Jedan od bitnih sustava za dobro i pouzdano djelovanje FFFS, kao i općenito za sigurnost tunela, svakako je dobro i pouzdano djelovanje sustava detekcije požara. Zonski koncipiran FFFS svoju će ulogu ispravno odigrati jedino ako sustav detekcije može dati pravovremenu (ranu) i preciznu informaciju o mjestu nastanka požara. Istraživanje pitanja detekcije požara/akcidenta nije predmet ovog rada, no prema Rogner [243], linearni toplinski detektori koji djeluju na principu brzine porasta temperature imaju pouzdanost od gotovo 100%, učestalost lažnih alarma gotovo je jednaka nuli, a mjesto akcidenta mogu locirati s točnošću od 7-10 m (temperaturni senzorski kabel) odnosno 1-2 m (optički senzorski kabel)[204]. Ovi parametri mogu se ostvariti s vremenom detekcije od 60 s za požar snage 5 MW i pri brzini strujanja zraka od 10 m/s.

Kao razlog da se ne primijeni FFFS često se navode visoki troškovi gradnje i održavanja. Razmatrajući hipotetski slučaj tunela sličnog tunelu Burnley, Jönsson i Johnson [27] su napravili cost-benefit analizu i utvrdili da se ugradnjom FFFS zapravo smanjuju ukupni troškovi ako se u analizu uzmu svi troškovi i vjerojatne štete koja mogu nastati u jednom takvom vrlo opterećenom gradskom tunelu[205].

[201] To troje ljudi nalazilo se u 3 vozila koja su sudjelovala u sudaru.
[202] Većina tehničkih detalja iz akcidenta Burnley je još uvijek sudska tajna, Dix [14].
[203] FFFS se u Australiji normalno dimenzioniraju na gustoću pokrivanja od 10 mm/min raspršene vode, a cilj je da se u rad puste što prije, dok je požar još mali (10-20 MW), Jönsson i Johnson [27].
[204] Lozica i Drakulić [246] uz ostale prednosti navode mogućnosti detekcije sustava s optičkim senzorskim kabelom: lokalizacija mjesta požara s točnošću unutar 4 m, definiranje površine zahvaćene zone, dominantnog smjera napredovanja i brzine napredovanja požara.
[205] Analiziran je tunel s 2 cijevi, duljine po 6 km, s prometom od 100 000 vozila/dan u svakoj od cijevi s 3 prometne trake. Troškovi postavljanja deluge sustava procijenjeni su na 25 000 000 AUD (cca 18 750 000 Eur), troškovi održavanja na 3 000 000 AUD (cca 2 250 000 Eur) godišnje, a izgubljeni prihod od naplate prolaza

6.5.2 Norme, standardi i preporuke za FFFS

Upute za projektiranje, izvedbu, rad i održavanje različitih stacionarnih sustava za gašenje požara primjenjivih za zaštitu tunela od požara mogu se naći u nizu tehničkih dokumenata (normi, standarda, uputa). Ovdje su navedeni samo oni dokumenti koji potječu od respektabilnih i međunarodno priznatih organizacija kao što su CEN[206], NFPA i VdS koji se odnose na stacionarne sustave raspršene vode (uključujući sprinklere), sustave vodene magle, te sustave pjene. Iz svakog od ovih dokumenata prikazani su samo najbitniji zahtjevi koji se odnose na tehnološke parametre požarnog inženjerstva, napose oni koji su aplikabilni za tunele. Iz zahtjeva je jasno vidljivo da su svi ovi dokumenti „preskriptivnog" tipa. Niti jedan od dokumenata ne odnosi se izričito na zaštitu tunela od požara.

CEN/TS 14816:2008 *Fixed firefighting systems – Water spray systems – Design, installation and maintenance* [244]

- Sustavi raspršene vode pogodni su za zaštitu objekata, kontrolu požara prolivenih lokvi i za zaštitu od toplinskog zračenja (hlađenje izloženih površina).
- Sustav je u pravilu deluge tipa, tj. sadrži otvorene mlaznice ili otvorene sprinklere.
- Gustoća primjene za zaštitu od požara lokve zapaljive tekućine dobije se iz dijagrama. Npr., za tekućine s plamištem od – 40 ^{0}C (benzin) i visinu stropa do 6 m, gustoća primjene iznosi 12,5 mm/min ako je veličina površine do 30 m^2 (5,5 x 5,5 m). Za veće površine gustoća primjene se povećava po formuli koja je priložena.
- Ako se vodi dodaju aditivi (AFFF), minimalna gustoća primjene otopine iznosi 12,5 mm/min, a minimalno vrijeme nanošenja je 30 minuta.
- Pri zaštiti različitih prostora, opreme i sustava elektrana traži se da se razmotri mogućnost dodavanja vatrogasnog pjenila u vodu tamo gdje je moguća prisutnost zapaljivih tekućina.
- Pri zaštiti spalionica traži se da se AFFF koristi tamo gdje u otpadnim materijalima ima mnogo plastičnih, te tamo gdje se koriste zapaljive hidrauličke tekućine.

EN 12845:2004+A2:2009 *Fixed firefighting systems – Automatic sprinkler systems – Design, installation and maintenance* [245]

- Sustavi automatskih sprinklera namijenjeni su za detekciju i za gašenje požara vodom u njegovoj najranijoj fazi ili pak samo za kontrolu požara, tako da se potpuno gašenje može ostvariti drugim sredstvima. Primjenjivi su za zgrade i za industrijska postrojenja.
- Sustav sadrži automatske sprinklere zatvorenog tipa, sa staklenom ampulom ili rastalnim spojem. Svaki automatski sprinkler zasebno, pucanjem ampule ili taljenjem rastalnog spoja, otvara protok vode pri unaprijed određenoj temperaturi.
- Štićene površine klasificiraju se na one s niskom opasnošću (LH – Light Hazard), uobičajenom opasnošću (OH – Ordinary Hazard, sadrži 4 grupe), visokom opasnošću-proces (HHP – High Hazard Process, sadrži 4 grupe), visokom opasnošću-skladištenje (HHS – High Hazard Storage, sadrži 4 kategorije).
- Gustoća primjene ovisi o klasi i grupi opasnosti, pa je tako minimalna gustoća 2,25 mm/min (LH), 5 mm/min (OH), 7,5-12,5 mm/min (HHP), odnosno 7,5-30 mm/min (HHS). Uz to se definiraju i maksimalne površine djelovanja u ovisnosti o klasi

1 140 000 AUD (cca 855 000 Eur) dnevno. Pretpostavljeni životni vijek deluge sustava bio je 30 godina, a moguće uštede na gradnji tunelske cijevi i instalacija manje vatrootpornosti, odnosno ventilacijskog sustava dovoljnog za manji projektni požar nisu uzete u obzir [27].

[206] Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, normizacijsko tijelo EU.

opasnosti, vrsti sprinkler sustava (mokri, preakcijski, suhi, alternirajući), visini i načinu skladištenja itd.
- Raspoloživa količina vode mora biti dovoljna za vrijeme djelovanja od 30 minuta (LH) do 90 minuta (HHP i HHS), a štićena površina (poda) ne bi smjela biti veća od 120 000 m^2.
- Kod zaštite PE i PP skladišnih spremnika kao posebnih objekata (opasnosti) zahtijeva se dodavanje prikladnog film-forming pjenila sprinklerskoj vodi, uz napomenu da se AFFF pokazala učinkovitom pri testovima u stvarnoj veličini.

FprCEN/TS 14972:2010 *Fixed firefighting systems – Watermist systems – Design and installation* [247]
- Svrha ovog dokumenta je da pruži informacije o minimalnim zahtjevima za stacionarne sustave vodene magle kroz definiranje serije specifičnih testova[207], temeljem kojih je moguće provjeriti performanse sustava i odrediti stupanj njihove prikladnosti za pojedine primjene na kopnu. Sadašnji stupanj razumijevanja djelotvornosti sustava vodene magle ne omogućava da se oni projektiraju na temelju osnovnih principa, pa je požarno-tehnološke parametre za njihovo projektiranje i postavljanje potrebno dobiti testiranjem. Gdje je god to moguće, testna procedura za specifičnu aplikaciju ima prednost pred generičkom procedurom.
- Sustavi vodene magle podijeljeni su na niskotlačne (do 12,5 bara), srednjetlačne (12,5 do 35 bara) i na visokotlačne (35 i više bara), mogu biti namijenjeni za kontrolu, supresiju ili potpuno gašenje požara, a primjena može biti lokalna ili za volumnu zaštitu.
- Minimalno vrijeme ispuštanja vatrogasnog medija u sustavima za gašenje mora biti dvostruko dulje od vremena gašenja postignutog u relevantnom testu, ali ne manje od 10 minuta, ako u relevantnom testnom protokolu nije specificirano drukčije. U sustavima za supresiju i kontrolu požara minimalno vrijeme ispuštanja medija mora biti 30/60 minuta, ovisno o opasnosti u skladu s EN 12845 [245].
- Kod suhih i preakcijskih sustava s automatskim mlaznicama, vatrogasni medij mora iz mlaznica izlaziti unutar 60 s po aktiviranju, tj. po otvaranju prve mlaznice. Ako se radi o primjeni otvorenih mlaznica, vatrogasni medij mora iz svih mlaznica istjecati unutar 30 s po aktiviranju.
- Gdjegod je to moguće, ventilacija se mora isključiti prije nego što sustav započne djelovati.

EN 13565-2:2009 *Fixed firefighting systems – Foam systems – Part 2: Design, construction and maintenance* [159]
- Sustavi pjene namijenjeni su za stvaranje homogenog pokrivača od mjehurića nastalih aeriranjem otopine pjenila u vodi, koji pokriva površinu zapaljive tekućine (klasa B) i/ili zapaljive krute tvari (klasa A). Pokrivač od mjehurića prigušiti će oslobađanje zapaljivih para, isključiti pristup zraka te ohladiti gorivo i okolne vruće površine.
- Tipične primjene deluge sustava pjene niske ekspanzije, koji vjerojatno jedini dolaze u obzir za stacionarne sustave zaštite od požara u tunelima, obuhvaćaju: procesne površine u kemijskoj industriji, pretakališta goriva, avionske hangare, pakiranje, skladištenje i recikliranje plastičnih materijala, obradu i skladištenje otpadnih materijala, skladištenje autoguma, uljne transformatore i rasklopnu opremu. Daljnje

[207] Testni protokoli definirani su za zapaljive tekućine (sustavi za kontrolu i supresiju), volumnu zaštitu prostora (sustavi za kontrolu i supresiju), kabelske tunele (sustavi za kontrolu i supresiju), uredske prostore OH Grupa 1, friteze u komercijalnim kuhinjama te za izvjesne prostore OH Grupa 3. Uz to su date i upute za razvoj reprezentativnih procedura za ostale primjene sustava vodene magle.

razmatranje odnosi se na gašenje požara prolivene lokve[208], koje se tretira različito od požara „dubokog" goriva.
- U ovoj normi ne koriste se pojmovi kontrola niti supresija požara, već jedino gašenje požara[209].
- Stvarna gustoća primjene otopine pjene izračunava se prema izrazu:

$$q = q_{th} \cdot F_c \cdot F_o \cdot F_H \tag{6.2}$$

što znači da se minimalna nominalna gustoća primjene od 4 L/m^{2}min (q_{th}) povećava u ovisnosti o klasi pjenila (F_c), vrsti objekta (F_o) i udaljenosti objekta od mlaznice (F_H)[210].
- Maksimalna štićena površina po deluge sustavu smije biti 3000 m^2, a vrijeme djelovanja za unutarnje površine štićene deluge sustavom je 15 minuta.

NFPA 15:2007 *Standard for Water Spray Fixed Systems for Fire Protection* [248]
- Sustavi raspršene vode smatraju se učinkovitima u cilju postizanja jednog ili kombinacije sljedećih ciljeva: gašenje požara, kontrola požara, zaštita izloženih površina, prevencija požara.
- Za gašenje požara za većinu običnih krutih gorivih tvari i zapaljivih tekućina, gustoća primjene kreće se od 6,1-20,4 L/m^{2}min, pri čemu se gustoća u specifičnom slučaju određuje testom ili iz prethodno poznatih sličnih situacija.
- Za kontrolu požara lokve zapaljive tekućine primjenjuje se gustoća od najmanje 12,2 L/m^{2}min. Za zaštitu od požara izloženih površina strukturnih čeličnih nosača primjenjuje se gustoća od najmanje 4,1 L/m^{2}min površine koju treba hladiti (horizontalni nosači), odnosno 10,2 L/m^{2}min (vertikalni nosači).

NFPA 750:2006 *Standard on Water Mist*[211] *Fire Protection Systems* [227]
- Sustavi vodene magle podijeljeni su na niskotlačne (do 12,1 bara), srednjetlačne (12,1 do 34,5 bara) i na visokotlačne (34,5 i više bara).
- Ciljevi instalacije vodene magle uključuju: gašenje požara, supresiju požara, kontrolu požara, kontrolu temperature i zaštitu izloženih površina.
- Minimalno vrijeme ispuštanja vatrogasnog medija iznosi 30 minuta, a kod „paket" sustava[212] količina vode mora biti dovoljna za 2 ispuštanja uz dodatne uvjete vezane s objektom na koji se primjenjuju.

[208] Za slučaj akcidenta/požara u tunelu najvjerojatniji je upravo scenarij plitke lokve razlivenog tekućeg goriva, prosječne visine do 25 mm, budući da će se dublja lokva drenirati u kanalizacijski sustav.
[209] Tehnologija borbe protiv požara kod sustava pjene je takva da se s gašenjem niti ne započinje ako na raspolaganju nema dovoljno vode, pjenila, opreme za primjenu pjene, vatrogasaca itd. Cilj je uvijek da se požar ugasi. Ako se u tome iz bilo kojeg razloga ne uspije, a potroše se resursi, požar zapaljive tekućine će se ponovno razbuktati na prethodnu veličinu u roku od najviše nekoliko minuta.
[210] Ovi korekcijski faktori definirani su u tablicama unutar norme. f_c ovisi o klasi pjenila određenoj prema [203] i [204], kreće se od 1-2 (za požar lokve) i najniži je za pjenila s najboljim učinkom gašenja. f_o ovisi o vrsti objekta, načinu primjene pjene i vrsti goriva (da li se miješa s vodom ili ne) i za unutarnje procesne površine, površine za manipulaciju gorivima i skladišta iznosi 1 (za požar plitke lokve). f_H se odnosi samo na vanjske deluge sustave i ima vrijednosti 1 (za mlaznice < 5 m od štićene površine), odnosno 1,25 (za mlaznice > 5 m od štićene površine).
[211] Vodenu maglu čini mlaz razpršene vode kod kojeg je $Dv_{0,99}$ manji od 1 mm pri minimalnom projektnom tlaku na mlaznici. To znači da je distribucija veličine kapljica takva da 99% kapljica, mjereno kao udio u ukupnoj masi mlaza, ima promjer manji od 1 mm, a 1% mase mlaza čine kapljice promjera većeg od 1 mm.
[212] „Paket" sustavi imaju unaprijed određene dimenzije cijevi, minimalne i maksimalne duljine cijevi, broj fitinga, broj i vrstu mlaznica. Za takve sustave ispitni laboratoriji propisuju ograničenja u uporabi, što mora biti jasno naznačeno u proizvođačkom priručniku za postavljanje.

- Zbog nedostatka opće metode projektiranja bazirane na principima požarnog inženjerstva, sustavi vodene magle moraju se testirati za specifične opasne situacije i specifične zahtjeve zaštite. Niti jedan od testnih protokola koje su razvile međunarodno priznate organizacije[213] ne obuhvaća tunele.

NFPA 11:2010: *Standard for Low-, Medium-, and High-Expansion Foam* [200]

- Za zaštitu od požara prolivene plitke lokve na pretakalištima zapaljivih tekućina pomoću monitora s film forming pjenom koristi se minimalna gustoća primjene od 4,1 L/m^{2}min za ugljikovodike, s vremenom primjene od 15 minuta[214]. Za tekućine koje su polarna otapala koriste se gustoće primjene dobivene testiranjem.
- Za zaštitu od požara prolivene plitke lokve zapaljivih tekućina pomoću ručnih mlaznica ili monitora s film forming pjenom koristi se minimalna gustoća primjene od 4,1 L/m^{2}min za ugljikovodike s vremenom primjene od 15 minuta. Za tekućine koje su polarna otapala koriste se gustoće primjene dobivene testiranjem.
- Za slučaj uporabe CAFS sustava gustoće primjene mogu biti osjetno niže, no najmanje 1,63 L/m^{2}min za primjenu na ugljikovodicima i 2,3 L/m^{2}min za primjenu na alkoholima i ketonima. Vrijeme primjene u ovom slučaju može biti 10 minuta po čitavoj površini primjene za deluge sustav, odnosno 5 minuta za stacionarni sustav raspršene pjene.

NFPA 16:2007 *Standard for the Installation of Foam-Water Sprinkler and Foam-Water Spray Systems* [249]

- Zaliha vode mora biti dovoljna da omogući protok vode tijekom 60 minuta.
- Minimalna gustoća pokrivanja iznosi 6,5 mm/min.
- Trajanje ispuštanja pjene ne smije biti kraće od 10 minuta, a u slučaju veće gustoće pokrivanja smije se proporcionalno smanjiti, ali ne na manje od 7 minuta.
- Ukupna površina jednog sustava može biti do 465 m^2.
- Razmak sprinklera smije biti do 9,3 m2/sprinkler odnosno max. razmak do 2,7 m.

VdS CEA 4001en:2008-11(03) *VdS CEA Guidelines for Sprinkler Systems – Planning and Installation* [250]

- U zahtjevima za zaštitu automatskih parkirnih sustava navodi se da sprinkleri trebaju imati odzivnu osjetljivost "quick", da minimalna gustoća primjene treba biti 7,5 mm/min, da operativno vrijeme dobave vode i pjenila treba biti po 30 minuta i da se u vodi za gašenje mora nalaziti najmanje 3% film forming pjenila.

6.6 Mobilni sustavi

U skladu s EU Directive [75], u blizini portala tunela i u unutrašnjosti tunela na međusobnoj udaljenosti od najviše 250 m moraju se postaviti hidranti za pokrivanje potreba za vatrogasnom vodom[215], a ako dobava vode nije predviđena, mora se nedvojbeno osigurati dostatna količina vode na neki drugi način. RABT [87] traži postavljanje vatrogasnih hidranata s protokom od 1200 L/min na međusobnom razmaku od max. 150 m ako je tunel

[213] Protokole za požarno testiranje sustava vodene magle razvile su: IMO – International Maritime Organization, London, U.K.; FM – Factory Mutual Research Corp., Norwood, SAD; UL – Underwriters Laboratories Inc., Northbrook, SAD; VdS Schadenverhütung GmbH, Köln, Njemačka.

[214] Primjena pjene ručnim mlaznicama ili monitorima smatra se nasilnom, pa su gustoće primjene u normama i standardima približno 50% veće nego kod primjene drugim metodama (npr. sprinklerima).

[215] U RH je maksimalni razmak hidranata za postojeće tunele 250 m, a za nove tunele razmak je najviše 150 m, Pravilnik [18].

dulji od 600 m (400 m za promet > 4000 HGV·km/cijev·dan), dok Pravilnik [18] traži bezuvjetni kapacitet hidrantske mreže od 1200 L/min tijekom 1 h[216].

Da bi se požar ugasio, voda se mora dopremiti do njegovog žarišta, što pri požaru vozila u tunela može biti posebno teško. Rhodes i sur. [127] došli su do minimalno potrebnih količina vode za mobilno gašenje požara (tablica 6.8).

Tablica 6.8. Apsolutno minimalne potrebe za vodom pri gašenju požara vozila [127]

Vrsta vozila	Površina požara A, m^2	Toplinska snaga HRR, MW	Minimalno potreban protok vode $\dot{V}$, L/min	Broj mlazova od po 360 L/min
Osobno vozilo	10	5	226	1
Furgon	35	15	462	2
HGV	200	100	1250	4

Zbog ograničenog dometa mlaza, vatrogasci se moraju znatno približiti požaru, a zatim protok medija održavati tijekom relativno dugog vremenskog perioda. Realistički je očekivati da će period do gašenja HGV biti približno 30 minuta uz uporabu barem navedenog protoka vode. Iako vatrogasci nose osobnu zaštitnu opremu koja ih štiti od toksičnog dima i visoke temperature, njihovo je vrijeme rada ograničeno na najviše 30-40 minuta[217], koliku autonomiju normalno dopušta količina zraka u bocama prosječnog dišnog aparata.

Nadalje, eksperimentima je ustanovljeno da vatrogasac može izdržati toplinsko opterećenje od 5 kW/m^2 barem 7 minuta, ali ne više od 20 minuta ako toplinsko zračenje iznosi do 2 kW/m^2, Rhodes i sur. [127]. Daleko najveći dio zračenja potječe od plamena požara i od vrućeg dima koji se može širiti i u suprotnu stranu od strujanja zraka (backlayering). Najveća zapreka za veću efikasnost rada i veći „akcijski radijus“ vatrogasnih snaga u tunelu vjerojatno su potreba za kontinuiranim nošenjem respiratorne zaštitne opreme i loša vidljivost. Rezultati testiranja pokazali su da su brzine kretanja vatrogasaca koji na sebi nose autonomni dišni aparat svega 5-8 m/min i da im je efektivni radni doseg u tunelskom okolišu vrlo ograničen (tablica 6.9).

Tablica 6.9. Brzina kretanja i doseg intervencijske ekipe u tunelu [127, 251]

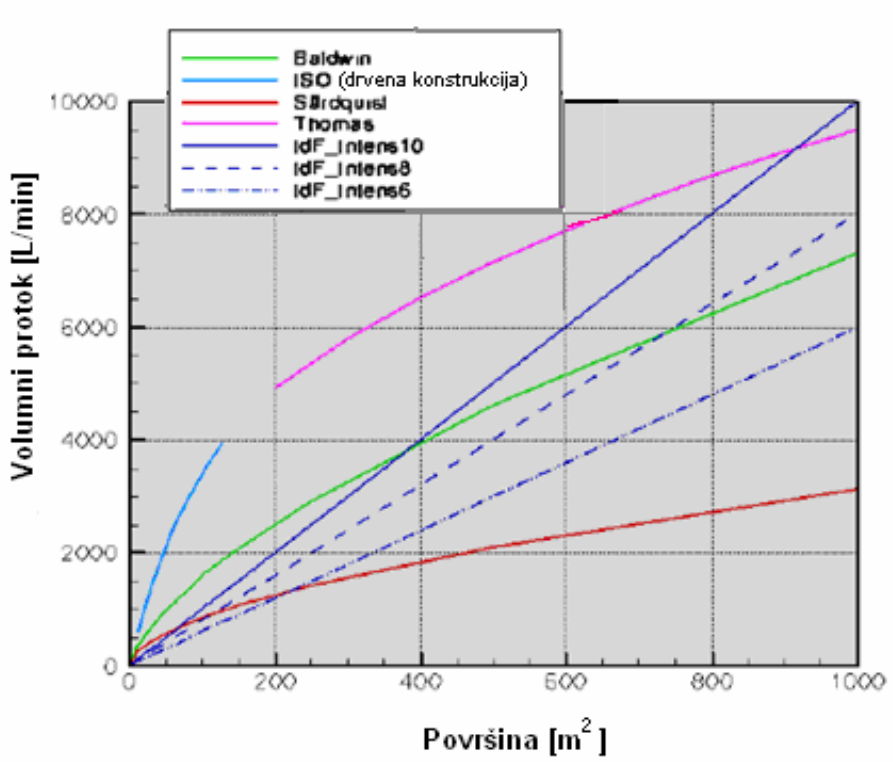
Uvjeti testiranja	Prosječna brzina kretanja, m/s	Teoretski max. doseg[218], m*
Tunel ispunjen dimom, suha vatrogasna cijev (bez vode)	0,08-0,13 (prosjek 0,1)**	58***
Tunel bez dima, voda u cijevi	0,3*/0,1**	243***
Tunel bez dima, bez cijevi	1,33*	1080***
Tunel ispunjen dimom, voda u cijevi	0,09**	52****

* Vrijednosti na bazi brzine hodanja bez spajanja cijevi
** Vrijednosti s uključenim spajanjem cijevi
*** Na bazi raspoložive količine zraka od 1600 L (2400 L ukupno, od čega je 1600 L raspoloživo sa sigurnosnom rezervom), potrošnjom od 62 L/min i vremenom za povratak
**** Izračunato na bazi prethodnih rezultata

[216] Ako priključak na lokalnu vodovodnu mrežu nije moguć, postavlja se rezervoar od 80 m^3, Pravilnik [18].
[217] Ovisno o broju i veličini boca komprimiranog zraka, tlaku u bocama (200 ili 300 bara), te specifičnoj potrošnji zraka (L/min), koja uglavnom ovisi o intenzitetu rada, te masi i uvježbanosti korisnika.
[218] Autonomni dišni aparat daje automatski signal za povlačenje kad se zaliha zraka u bocama smanji na cca 20% početne (u tom je trenutku potrošeno 80% od ukupnog početnog sadržaja).

Ovu činjenicu treba imati u vidu pri planiranju mogućih intervencija. Posebno je važno da vatrogasci imaju osiguranu dobavu dovoljne količine vode iz hidrantske mreže, tako da ne moraju povlačiti dodatne cijevi pri intervenciji.

Kohl i sur. [252] su ustanovili da potpuno razvijeni požar s velikom *HRR* može predstavljati bitno veći problem za gašenje u stvarnosti nego što bi se to moglo očekivati na temelju rezultata izvedenih eksperimenata. Pregledom niza različitih objavljenih radova jasno su zaključili da postoji signifikantna razlika između količina medija za gašenje eksperimentalno utvrđenih putem testova u laboratorijskom mjerilu i stvarno potrošenih količina vode za gašenje prezentiranih u statističkim izvještajima o stvarnim požarima. U radu koji je pritom korišten, Davis [108], ti se protoci razlikuju čak do jednog reda veličine. Na slici 6.15 prikazani su sumarni podaci o potrebnim protočnim količinama vatrogasne vode koji se baziraju na statističkim podacima i na njihovim eksperimentima, Pleß i Kohl [253]. Očigledno je da funkcije Särdqvist s jedne strane, te američkog ISO[219] i Thomasa s druge strane predstavljaju donje i gornje granične vrijednosti. Simplificirane linije (pravci) IdF[220] u sredini evidentno podcjenjuju potrebne protoke vode za površine manje od 200 m^2. U tablici 6.10 prikazane su relacije koje povezuju potreban protok vatrogasne vode s površinom požara, pri čemu se relacije za prva tri autora baziraju na Davis [108].



Slika 6.15. Potrebni protoci vatrogasne vode u funkciji tlocrtne površine [252]

Na temelju ovih relacija Kohl i sur. [252] su, koristeći se podacima iz Ingason i sur. [105], napravili procjenu potrebnih protoka vatrogasne vode za pojedine objekte u tunelskom požaru (tablica 6.11).

[219] ISO, Insurance Services Office.
[220] IdF, Institut der Feuerwehr.

Tablica 6.10. Relacije između površine izgaranja i protoka vatrogasne vode [252]

Autor	Površina gorenja A, m^2	Protok vode $\dot{V}$, L/min
Thomas	> 200	$\dot{V} = 560\ A^{0,41}$
Baldwin	> 20	$\dot{V} = 74\ A^{0,66}$
Särdqvist	0,1 – 1000	$\dot{V} = 61\ A^{0,57}$
IdF, puni mlaz	< 1000	$\dot{V} = 10\ A$
IdF, raspršeni mlaz	< 1000	$\dot{V} = 8\ A$
IdF, raspršeni mlaz s močilom	< 1000	$\dot{V} = 6\ A$

Tablica 6.11. Protoci vode za gašenje požara [252]

Opožareni objekt	Površina gorenja, m^2	*HRR*, MW	Protok vode $\dot{V}$, L/min	Broj mlazova od po 360 L/min
Automobil	≈ 10	10	227	1
HGV	≈ 200	100	1250-4916	4-14
HGV s prikolicom	≈ 400	200	1856-6532	5-18
Dvostruka kolijevka od borovine	≈ 4	5	134	1

Uočljiva je sličnost rezultata protoka vode i broja mlaznica na donjoj granici s onima iz tablice 6.8 za osobna vozila i kamione. Gornje granice ukazuju na mogući raspon potreba pri težim intervencijama.

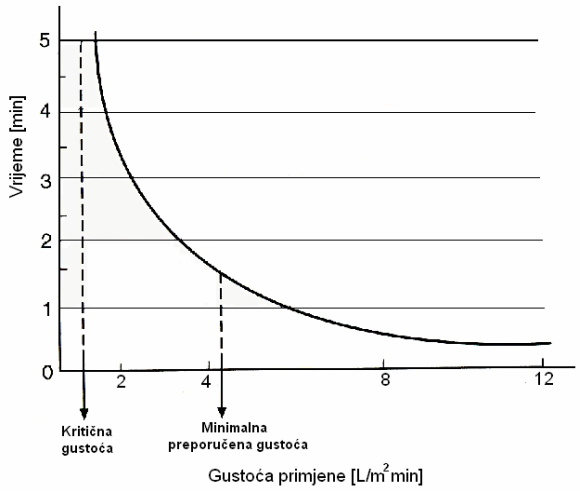
Za usporedbu s vatrogasnom praksom može poslužiti jednostavna procjena potrebe za vodom do koje je povezivanjem snage požara i efikasnosti korištenja vatrogasne vode na bazi statističkih istraživanja 100 stvarnih požara došao Grimwood, [254]. Rezultati istraživanja pokazali su da je pri akcijama gašenja manjih zatvorenih prostorija koje su izveli vatrogasci u Londonu i u SAD, prosječni stupanj korištenja sposobnosti apsorpcije topline vatrogasne vode bio oko 50%[221]. To znači da je pri protoku vatrogasne vode od 1 kg/s moguće apsorbirati približno 1,3 MW toplinske snage požara, odnosno da je za gašenje požara snage 10 MW potreban protok od 7,7 L/s (462 L/min). Do sličnih je podataka došao i Barnett [255].

U radu Pless i Kohl [253] su pokazali da oblik funkcije gustoće primjene vatrogasne vode (L/m^{2}min) u ovisnosti o vremenu gašenja za seriju sličnih požara odgovara hiperboli. Pri velikim gustoćama primjene, vrijeme gašenja je vrlo kratko i asimptotski se približava prema maloj konstantnoj vrijednosti, što znači da se daljnjim povećanjem gustoće primjene vrijeme gašenja više ne skraćuje. Pri malim gustoćama primjene, vrijeme gašenja se produljuje prema beskonačnom, a gustoća primjene se asimptotski približava graničnoj vrijednosti pri kojoj se požar održava u nepromijenjenom stanju. Vrlo slična načelna krivulja oblika hiperbole izvedena je u Scheffey [256] za primjenu pjene (slika 6.16).

Pritom treba imati u vidu da je stvarna hiperbola specifična za svaku požarnu situaciju, vrstu vatrogasnog medija, način primjene i druge relevantne varijable požara i gašenja. Produkt svakog pojedinog vremena gašenja i odgovarajuće gustoće primjene pokazuje ukupnu potrošenu količinu vatrogasnog medija, što je prikazano u ovisnosti o vremenu gašenja (slika

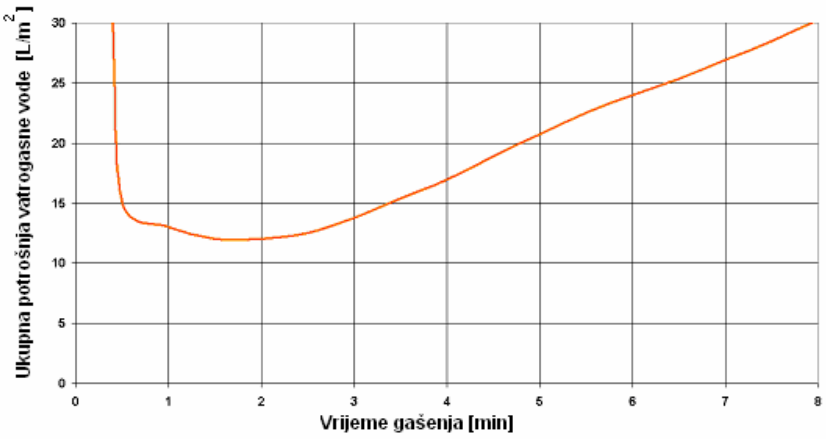
[221] Izračunato kao razlika entalpija pare pri 100 ^{0}C i vode pri 18 ^{0}C.

6.17). Iz grafa krivulje vidi se da za svaku vatrogasnu akciju, uzimajući u obzir komparabilne požarne situacije, uvjete gašenja i vatrogasnu taktiku, postoji određeni raspon gustoća primjene, unutar kojeg je za gašenje gorućeg objekta potrebna minimalna ukupna količina vode ili pjene. Izvan ovog raspona potrošnja vatrogasnog medija se povećava, a učinkovitost njegovog korištenja opada. Korištenje prekomjernih gustoća primjene dovodi do neefikasne primjene vatrogasnog medija i povećanja šteta uzrokovanih vodom, a pri nedovoljnim gustoćama primjene požar neće biti ugašen.



Slika 6.16. Opći prikaz ovisnosti vremena gašenja o gustoći primjene pjene [256]

S tim u vezi treba naglasiti da je svaka požarna situacija drugačija, da su mogući neočekivani obrati, da se vatrogasni medij u stvarnosti u pravilu neće nanositi na optimalan način itd., pa je za praktičnu uporabu uvijek potrebno imati izvjesnu rezervu kapaciteta gašenja.



Slika 6.17. Ukupna potrošnja vatrogasnog medija u ovisnosti o vremenu gašenja [253]

Na bazi kriterija da je optimalna gustoća primjene vatrogasnog medija ona koja uzrokuje njegovu najmanju ukupnu potrošnju, ustanovljeno je da se ta potrošnja kreće u rasponu od 4-10 L/m^{2}min, ovisno o načinu distribucije medija i dodataka vodi (močila i pjenila), Pless i Kohl [253]. Iako je ovdje u pitanju mobilna primjena vatrogasnih medija, navedene gustoće ne odstupaju znatno od onih koje su prethodno navedene za stacionarne sustave.

Naknadni radovi Pless i Seliger [197] pokazali su da su navedene gustoće dovoljne jedino ako medij za gašenje može biti nesmetano nanesen na površine gorućih tvari. Ako su površine gorućeg objekta ili lokve pokrivene ili zaklonjene (npr. u različitim kanalima ili sl.), pa vatrogasni medij ne može doći do njih i pokriti ih u cijelosti, gustoće primjene se bitno povećavaju. U nekim slučajevima gašenje uopće nije moguće dok se gorući objekt ne uruši ili se na drugi način prepozicionira.

Tablica 6.12. Gustoće primjene vatrogasne vode, L/m^{2}min [253]

Gorivo	Puni mlaz		Raspršeni mlaz	
	Voda	„Mokra“ voda[222]	Voda	„Mokra“ voda
Kruto, koje karbonizira	10	8	8	6
Kruto, koje se tali	8	6	6	4

Imajući u vidu strujanje zraka, tunelski požar u pravilu se širi u longitudinalnom smjeru niz vjetar, pa se vatrogasne snage u većini slučajeva požaru mogu približiti jedino s uzvjetrene strane. Za nanošenje vatrogasnog medija na raspolaganju imaju samo frontu širine tunela, odnosno poprečni presjek tunela, pa iz takve pozicije često nije moguće medij nanijeti na sve požarom zahvaćene površine. Ipak, poprečni je presjek tunela relativno malen, pa ga je lako u cijelosti pokriti mlaznicama s raspršenom vodom, što onda omogućuje da se većina površina zahvaćenih gorenjem može postepeno indirektno doseći. Da bi se postigao uspjeh pri gašenju, navedene donje granice gustoće primjene vode i pjene treba poštovati kao apsolutno minimalne.

Tablica 6.13. Gustoće primjene vatrogasne pjene, L/m^{2}min otopine[223] [253]

Gorivo	Pjena niske ekspanzije		Pjena srednje ekspanzije		Raspršeni mlaz iz mlaznice	
Zapaljiva tekućina	AFFF/FFFP	Sintetička detergentna[224]	AFFF/FFFP	Sintetička detergentna	AFFF/FFFP	Sintetička detergentna
	4-6	8	4-6	6	4-6	-

Daljnji aspekt gašenja požara u tunelu je zaštita vatrogasnih snaga od direktnog djelovanja topline. Na početku vatrogasne akcije vrlo je teško procijeniti u kojoj je fazi razvoja pojedini požar i što je sve požarom zahvaćeno. Režim izgaranja u tunelu sličan je izgaranju u industrijskoj peći, ali nisu isključena moguća iznenađenja, kao što su npr. promjena smjera strujanja zraka (backlayering) ili eksplozija plina/para (VCE). Za takve slučajeve vatrogasne snage moraju zbog vlastite sigurnosti imati odgovarajuću aktivnu zaštitu, što se u pravilu svodi na korištenje zalihe vatrogasne vode koja se raspršuje kroz mlaznice. Pri direktnoj vatrogasnoj navali punim mlazom s univerzalnom mlaznicom i tlakom na mlaznici od 7 bara, pri protoku od 450 L/min nastaje sila reakcije mlaza veličine 268 N, a pri protoku od 560 L/min sila od 333N[225]. Ove sile su unutar ergonomski prihvaćenih granica koje dozvoljavaju

[222] „Mokra“ voda zbog primiješanog malog postotka površinski aktivnih tvari (načelno 0,1-1%; močila ili pjenila) ima znatno bolju prodornost i površinsko širenje po velikoj većini krutih, posebno poroznih tvari.

[223] Navedene gustoće vrijede za tekuće ugljikovodike. Za polarne tekućine potrebne su u pravilu veće gustoće primjene, koje se dobijaju ispitivanjem za pojedine takve tekućine.

[224] U anglo-saksonskoj vatrogasnoj teoriji i praksi smatra se da su sintetička detergentna pjenila prikladna samo za proizvodnju pjene srednje i visoke ekspanzije.

[225] Sila reakcije mlaza može se izračunati pomoću izraza: $F = 0{,}22563\ \dot{V}$ (L/min) $p^{0,5}$ (bar).

jednom odnosno dvojici vatrogasaca da s navalnom cijevnom prugom napreduju lako i sigurno iz statičke pozicije, Grimwood [254]. Imajući u vidu potrebu za vlastitom zaštitom, vatrogasne bi snage čak i u slučaju da se suoče s malim požarom u fazi razvoja trebale koristiti mlaznice s protokom od najmanje 400 L/min. Stvarni protok vatrogasnog medija, odnosno broj i veličinu navalnih pruga, odrediti će zapovjednik vatrogasnih snaga na samom požarištu.

Protok vatrogasne vode od 1200 L/min koji se traži propisima [87, 18] omogućava vatrogasnim snagama relativno ograničene sposobnosti za gašenje požara. Na bazi gustoća primjene iz tablica 6.12 i 6.13 može se izračunati da su maksimalne veličine površina koje je moguće uspješno ugasiti cca 120-200 m^2 za zapaljive krutine, odnosno od cca 150-300 m^2 za zapaljive tekućine. Pretvoreno u konkretne objekte u tunelu, to znači da se kapacitet hidrantske mreže vjerojatno može smatrati dostatnim za gašenje jednog HGV, dok će za gašenje većeg požara koji bi zahvatio nekoliko vozila biti nužno povlačiti dodatne pruge pomoću fleksibilnih vatrogasnih cijevi. Imajući u vidu da je to u skladu s podacima iz tablice 6.9 iznimno težak, spor i naporan posao u uvjetima tunelskog požara, koji traži rad velikog broja vatrogasaca, realistički se može očekivati da će razvoj požara biti brži od razvoja vatrogasnih snaga, s posljedicom rasta akcidenta u smjeru katastrofalnog požara.

Sljedeće ograničenje pri gašenju tunelskog požara je (ne)sposobnost da se medijem za gašenje pokrije čitavo žarište. Zbog razloga sigurnosti i smanjenja izlaganja vatrogasnih snaga toplinskom zračenju i dimnim plinovima, navalnu vatrogasnu akciju u tunelu moguće je redovito izvesti samo s uzvjetrene strane požara. S uobičajenim tlakom vode u hidrantskoj mreži i uobičajenim vatrogasnim mlaznicama, moguće je postići domet mlaza od približno 25 m pa do najviše 40 m, što ovisi o obliku mlaza i protoku vatrogasnog medija.

U skladu sa Stefan-Boltzmannovim zakonom, razina toplinskog zračenja s emisijskim koeficijentom ε = 1, pri temperaturi graničnog sloja plamena već kod 1000 ^{0}C dosiže toplinski tok od 149 kW/m^2. Kod svjetlećih plamena, ova se razina postiže s debljinom plamenog sloja od svega 0,1-0,2 m. Stoga se s gašenjem požara započinje već na udaljenosti od 20-25 m, uz istodobno korištenje mlaza raspršene vode za zaštitu vatrogasnih snaga. Zadovoljavajuća apsorpcija toplinskog zračenja može se postići jedino s finom distribucijom sitnih kapljica vode. Takvu distribuciju daje samo fino raspršeni mlaz vode, koji će pri protoku od približno 1000 L/min imati domet od 13-18 m, no raspršeni mlaz (sprej) se praktički zaustavlja na plamenoj fronti, pa gašenje u dubinu nije moguće. Ako se istodobno žele postići oba cilja, zaštita od toplinskog zračenja i dovoljan domet mlaza, potrebno je dio raspoložive vatrogasne vode koristiti za zaštitu od zračenja, a ostatak za gašenje požara.

Raspršeni mlaz (sprej) vode s dovoljnim dometom i dovoljnom gustoćom kapljica može se pri tlaku od oko 8 bara generirati pri protoku od oko 400 L/min, čemu odgovara domet od cca 10-15 m. Uzevši u obzir da propisi [18, 87] predviđaju dobavu hidrantske mreže od 1200 L/min, za samo gašenje požara preostaje oko 800 L/min[226]. U uvjetima intenzivnog toplinskog zračenja, protok od 800 L/min dostatan je za gašenje požara čvrstih objekata veličine do oko 100 m^2, odnosno lokve zapaljive tekućine površine do oko 120 m^2. Ovaj protok biti će jedva dostatan za gašenje požara HGV. U inicijalnoj fazi gašenja požara, potrebno je postići što veći domet mlaza korištenjem malog izlaznog kuta mlaza iz

[226] English navodi da bi dobavu vode za vatrogasce trebalo dimenzionirati na približno 3800 L/min [257].

univerzalne mlaznice[227], ili pomoću mlaznice s punim mlazom. Uspješna navala i supresija požara omogućiti će približavanja žarištu, pa se izlazni kut mlaza univerzalne mlaznice može postepeno povećavati, te time omogućiti optimalna distribucija medija za gašenje po površini gorenja. Ipak, ako je požarom zahvaćeno nekoliko vozila, domet vatrogasnog mlaza omogućit će samo ograničenu penetraciju vatrogasnog medija u dubinu požara, pa će bez dovoljne i pouzdane supresije bliskog požara unutar dometa mlaznice biti vrlo teško postići gašenje požara po njegovoj dubini, odnosno spriječiti daljnje širenje požara. Određeno poboljšanje moglo bi se postići korištenjem mokre vode ili pjene klase A (na požarima A klase), odnosno pjene klase B na požarima zapaljivih tekućina.

Zaključci glede mobilnog gašenje tunelskih požara su da:

- Dobava vatrogasne vode koju predviđaju propisi [18, 87] omogućava vatrogasnim snagama samo ograničenu sposobnost gašenja velikog požara HGV. Vatrogasne snage nemaju mogućnost spriječiti širenje takvog požara na susjedna vozila ako su okolnosti za širenje požara povoljne, budući da nemaju dovoljno velik protok vode koji bi im to omogućio. Uz to, domet mlaznica je nedovoljan, a upitna je i dostatnost ukupne rezerve vode ako se voda crpi iz rezervoara ograničenog volumena.
- Da bi se rizik proširenja požara što više smanjio, akcija gašenja mora započeti što ranije[228].
- Gašenje požara HGV treba započeti s najvećim mogućim protokom vatrogasnog medija. Svako odlaganje navale znači gubitak dragocjenog vremena, širenje požara i smanjenje šansi za njegovo brzo i uspješno gašenje.
- Za zaštitu od toplinskog zračenja potrebno je odvojiti najmanje 1/3 raspoložive dobave vatrogasne vode.
- Akcija gašenja može se učinkovito provesti jedino ako ručne mlaznice imaju dovoljan domet. Direktno gašenje požara mogu istodobno izvoditi najviše 2 navalne grupe.
- Sve pripadnike vatrogasnih snaga potrebno je zaštititi od utjecaja toplinskog zračenja pomoću odgovarajuće osobne zaštitne opreme. Za zaštitu od zračenja može biti potrebno koristiti i dodatnu opremu s „aluminiziranim“ vanjskim slojem.
- Zaštita od toplinskog zračenja raspršenom vodom ne može se smatrati potpuno pouzdanom. Iako je moguće postaviti automatski djelujuću mlaznicu za raspršenu vodu, za optimalnu zaštitu od zračenja mlaznicu je potrebno nadzirati.
- Mali požar, npr. osobnih automobila, ne smije se podcijeniti, posebno ako u njemu sudjeluje nekoliko vozila, jer je i uz vrijeme početka akcije od 10-15 minuta po njegovom izbijanju, prisutan rizik širenja požara.

6.7 Priručna vatrogasna oprema, osobna zaštitne oprema (OZO) i dodatna tehnička oprema

Priručna vatrogasna oprema u tunelima postavlja se redovito u stanice za hitne slučajeve u skladu s nacionalnim propisima i/ili međunarodno priznatim preporukama i uputama [18, 75, 87, itd.] i služi za gašenje početnih požara. Ova oprema normalno obuhvaća 2 prijenosna

[227] Suvremene univerzalne mlaznice dozvoljavaju bezstepenu promjenu oblika mlaza vode od punog mlaza do posve raspršenog mlaza (spreja) oblika stošca s vršnim kutem od oko 120^0, pa čak i istodobno korištenje punog mlaza i zaštitnog spreja vode.

[228] Vatrogasna navala na tunelski požar mora započeti prije nego što se požar razvije i proširi na okolna vozila, Kim i sur. [143]. Iako je ova tvrdnja načelno primjenjiva na svaki požar, u slučaju tunelskog požara ona je još značajnija nego u slučaju požara na otvorenom prostoru zbog karakteristika tunela (ograničene mogućnosti prilaza i zatvorenost prostora otežavaju gašenje i evakuaciju).

vatrogasna aparata od po 9 kg za gašenje požara klase A i B i vatrogasnu C cijev[229] s mlaznicom i priključkom na hidrantsku mrežu, a namijenjena je prvenstveno za uporabu korisnicima tunela, Pravilnik [18]. U nekim stanicama za hitne slučajeve nalazi se i manja količina pjenila (npr. 1 ili 2 bačvice od po 20-25 L), što onda pruža mogućnost gašenja požara zapaljivih tekućina. Ipak, od prosječnih neuvježbanih korisnika tunela može se očekivati da će u slučaju potrebe u najboljem slučaju biti sposobni koristiti vatrogasne aparate, dok se na učinkovitu uporabu C-mlaza vode, a posebno pjene, praktički ne može računati[230]. Raspoloživu opremu u stvarnosti može, osim vatrogasaca, koristiti uvježbano osoblje tunela, imajući uvijek u vidu da ona nije namijenjena za slučaj većeg akcidenta, Kaiser [259]. Mogućnost korištenja mlaza vode od strane prosječnih korisnika tunela mogla bi se bitno povećati kada bi se na hidrantske priključke stanica za hitne slučajeve pridodala cijevna vitla s polukrutim cijevima manjeg promjera[231], kod kojih do istjecanja vode dolazi jednostavnim povlačenjem cijevi s mlaznicom. Iako se posljednjih godina sve više razmišlja o takvim rješenjima, za sada se cijevna vitla u europskim tunelima uglavnom traže i koriste jedino u Vel. Britaniji [83].

Za izvođenje vatrogasnih i spasilačkih operacija u tunelima intervencijsko osoblje mora biti opremljeno uobičajenom vatrogasnom OZO za strukturne požare[232], odgovarajućim autonomnim izolacijskim dišnim aparatima, a po potrebi i specijalnom opremom za zaštitu od toplinskog zračenja i opasnih kemikalija. Zbog ograničene slobode gibanja u tunelu, intervencije pri akcidentima s ozljedama ljudi, posebno ako su oni ostali blokirani u vozilima nakon akcidenta, znatno su teže nego na otvorenoj cesti. Tehnička oprema vatrogasaca mora biti prikladna za djelovanje na malim i na velikim vozilima, a redovitim treninzima mora se postići sposobnost za njenu brzu i efikasnu primjenu. Imajući u vidu da pri sudarima može doći do izlijevanja zapaljivih tekućina ili ispuštanja ukapljenih plinova, nužno je imati opremu i potrebnu vještinu za ublažavanje i ograničavanje posljedica takvih događaja. Ispuštanje toksičnih plinova i para može osim uobičajene učinkovite zaštite respiratornih organa zahtijevati i posebna plinonepropusna kemijska zaštitna odijela. OZO za zaštitu respiratornih organa nužna je i za ne-vatrogasno intervencijsko osoblje u tunelu ako širenje dima i/ili opasnih plinovitih kemikalija nije moguće pouzdano spriječiti u zonu njihovog boravka. U tunelima se toksične tvari normalno mogu širiti samo u smjeru strujanja zraka, pa će njihovo razrjeđivanje ovisiti o protoku zraka, a vrijeme kontaminacije svakako će biti dulje nego na otvorenom prostoru.

Osobina tunelskih požara je razvijanje visokih temperatura, koje dosežu i do 1300 ^{0}C. Svjetleći plamenovi već i kod male debljine postižu maksimalne vrijednosti topline zračenja, tako da toplinska snaga emitirana od plamene fronte odgovara maksimalnim vrijednostima zračenja za datu temperaturu. Ovu toplinu apsorbiraju stijenke tunela i zaustavljena vozila, odnosno čitava bliska okolina žarišta, pa su vatrogasne snage izložene visokim temperaturama zraka kao i snažnom toplinskom zračenju plamena i okoline. Za zaštitu od vanjskog djelovanja topline i plamena nužno je osim mlazova raspršene vode koristiti i vatrootpornu odjeću s dovoljnim stupnjem toplinske izolacije. Zbog visoke vanjske temperature, takva toplinska zaštitna odjeća ipak nije u mogućnosti spriječiti postepeni porast tjelesne

[229] Vatrogasna C cijev ima promjer od 52 mm.
[230] Studija ljudskog ponašanja, Klein [270], pokazuje da oko 37% ljudi u tunelskom požaru pokušava gasiti požar, 24% upozorava ostale ljude, a samo 16% pokušava pobjeći. Uz to, ustanovljeno je da većina ljudi ne zna kako koristiti vatrogasnu opremu .
[231] To su polukrute cijevi tipičnog promjera 19 mm.
[232] Vatrogasna OZO za strukturne požare sastoji se barem od intervencijske kacige, odijela, rukavica, čizmi i podkape.

temperature vatrogasaca, Regent [260]. Uz to će intenzivan tjelesni napor u zajednici s dobrom toplinskom izolacijom odjeće uzrokovati brzu akumulaciju metaboličke topline[233], pa će biti nužno vatrogasno osoblje povremeno zamijeniti zbog snižavanja njihove tjelesne temperature i rehidracije organizma[234]. Značaj OZO, napose one od nedovoljno poznatih i na prvi pogled nevidljivih profesionalnih opasnosti, ističu Polajnar i Mišina [280].

U uvjetima tunelskog požara mora biti osigurana besprijekorna radio-komunikacija intervencijskog osoblja međusobno i s kontrolnim centrom tunela. Za tu se svrhu u tunelu i na portalima postavljaju posebne antene, što intervencijskom osoblju omogućava normalno korištenje njihovih uobičajenih radio-uređaja. Korisnici duljih tunela u većini slučajeva mogu primati signal lokalne radio-stanice koji kontrolni centar može prekinuti zbog davanja hitnih poruka, a neki tuneli imaju i posebnu radio-frekvenciju koja se objavljuje na obavijesnoj ploči na ulazu u tunel. Na taj se način svakom korisniku tunela mogu pouzdano priopćiti potrebne upute u slučaju akcidenta. Informacije korisnicima mogu se također priopćavati i putem zvučnika u tunelu, mada je razgovijetnost takve komunikacije često upitne kvalitete. Zvučnici na evakuacijskim putovima i na sabirnim mjestima obično mogu dati jasniju zvučnu poruku.

Važne sigurnosne instalacije pri akcidentu u tunelu su rasvjeta, normalna i ona za slučaj nužde, te različite oznake. Nužna (sigurnosna, „panična“) rasvjeta izvodi se tako da korisnicima tunela omogući dolazak do izlaza za slučaj nužde čak i kad se tunel ispunjava dimom. Vatrogascima nužna rasvjeta može uz to biti važna pripomoć za orijentaciju, a također i pomoć za procjenu brzine širenja požara.

[233] Rektalna temperatura čovjeka ne bi trebala prijeći 38 ^{0}C, Kroemer, Grandjean [261], Parsons [262]. Ergonomski testovi s vatrogasnom odjećom u laboratorijskim uvjetima prekidali su se ako bi se unutarnja temperatura ispitanika povisila do 39,2 ^{0}C, Donovan [263].

[234] Dehidracija do 3% tjelesne mase smatra se graničnom za industrijski rad, Parsons [262].

7. Scenariji za vatrogasnu službu u slučaju akcidenta u tunelu

Svaki ozbiljan prometni akcident predstavlja potencijalnu opasnost za život i zdravlje osoba u tunelu, budući da može biti „okidač" za razvoj požara, eksplozije ili ispuštanje opasnih tvari, koje mogu imati i toksično djelovanje. Razvoj opasnog događaja ne mora nužno biti izazvan akcidentom, već može biti posljedica tehničke greške ili havarije, pa čak i kemijske reakcije nekih tvari. Tvari koje su klasificirane kao opasne normalno se prevoze zatvorene u prikladnim spremnicima, specifičnima prema vrsti i stanju tvari. Pri izlasku zbog propuštanja ili kidanja takvog spremnika one odmah predstavljaju opasnost za okolinu. Ipak, i tvari koju nisu klasificirane kao opasne (drvo, plastični materijali i proizvodi, hrana, tkanine) zahvaćene požarom mogu dovesti do scenarija koji ponekad nisu bitno manje opasni od scenarija s opasnim tvarima. U stvarnosti će opasni scenarij uključivati i opasne i neopasne tvari, a razvoj akcidenta ovisiti će o nizu okolnosti specifičnih za svaki akcident zasebno. Svaki scenarij normalno započinje nekim primarnim događajem, za kojem slijede daljnji događaji. U tablici 7.1 prikazani su scenariji događanja s gledišta vatrogasne službe, uključivši i hitnu medicinsku pomoć.

Tablica 7.1. Scenariji djelovanja vatrogasne službe

Primarni događaj	Daljnji događaj	Daljnji događaj	Daljnji događaj	Scenarij djelovanja
Prometni akcident	Bez ozlijeđenih osoba			Ništa
	S ozlijeđenim osobama			Izvlačenje iz vozila, prva medicinska pomoć[235]
	Ispuštanje plina	Toksični plin (oblak)		Ventilacija (razrjeđivanje), precipitacija
		Zapaljivi plin (oblak)	Eksplozija	Nema intervencije, raščišćavanje
			Požar	Gašenje požara plina ?
			Eksplozija i požar	Gašenje požara plina ?
	Ispuštanje tekućine	Lokva tekućine	Toksična	Prikupljanje, odlaganje
			Požar	Gašenje požara tekućine
			VCE i požar	Gašenje požara tekućine
	Zapaljenje krutine		Požar	Gašenje požara krutine
			Eksplozija	Nema intervencije, raščišćavanje
Tehnička greška	Zapaljenje krutine		Požar	Gašenje požara krutine
	Zapaljenje tekućine		Požar	Gašenje požara tekućine
Terorizam, djelo piromana	Ispuštanje toksične tvari			Dekontaminacija
	Eksplozija			Nema intervencije, raščišćavanje
	Požar			Gašenje požara tekućine, krutine, plina

Rezultirajući scenariji za intervencijske službe mogu se, u skladu s analizom u tablici 7.1, svrstati u 3 osnovne grupe:

- Medicinska pomoć pri akcidentima s ozlijeđenim i/ili poginulim osobama,
- Prikupljanje, uklanjanje i odlaganje pri ispuštanju opasnih tvari,
- Gašenje požara.

[235] Medicinska pomoć potrebna je i pri svakom drugom akcidentu gdje ima ozlijeđenih osoba.

Veličina (opseg) scenarija može biti od beznačajno malog pa do ekstremno velikog. Zbog lakšeg praćenja i komuniciranja, uvriježena je praksa pri procjeni rizika da se ovakvi događaji podijele u 3 veličinske grupe: na male, srednje i velike, Persson [158].

Vergnault i sur. [148] su tunelske požare podijelili u 3 kategorije:

- Kategorija 1: toplinska snaga ovih požara je takva, da je čak i bez vanjske intervencije malo vjerojatno da će prouzrokovati ozljede korisnicima tunela.
- Kategorija 2: ovi požari mogu prouzrokovati ljudske žrtve među korisnicima tunela. Iako oni pričinjavati značajne teškoće, vatrogasna i intervencijska služba još uvijek mogu obaviti intervenciju.
- Kategorija 3: toplinska snaga ovih požara je tako visoka, da je rizik približavanja čak i za dobro opremljene vatrogasce prevelik.

Snaga požara vezana je s njegovim vremenom trajanja. Bez obzira na trajanje požara, razumno je procijeniti da će izolirani požar motorkotača ili malog automobila ostati u kategoriji 1 čak i bez intervencije vatrogasne službe. Požar HGV biti će prve 3-4 minute u kategoriji 1. S razvojem požara, on će se sljedećih 8-10 minuta nalaziti u kategoriji 2, a zatim će prijeći u kategoriju 3. Ipak, ozbiljan akcident može praktički trenutno „preskočiti“ u kategoriju 2 ili 3. Pri „normalnom“ i vjerojatnom razvoju požara HGV bitno je onemogućiti da se on razvije do 3. kategorije, jer tu akcija vatrogasaca više nije moguća, a time niti spašavanja ljudi odnosno ograničavanje štete na tunelu i njegovim sustavima. Analizom stvarnih tunelskih požara ustanovljeno je da će se požar HGV do 3. kategorije vjerojatno razviti kroz 11-14 minuta ako u međuvremenu ne uslijedi vatrogasna navala, Vergnault i sur. [148].

Scenariji koji se isključivo odnose na spašavanje osoba ozlijeđenih i/ili ukliještenih u vozilima prilikom akcidenata i na medicinsku pomoć nisu analizirani. Scenariji koji se isključivo odnose na ispuštanje toksičnih tvari u tekućem ili plinovitom stanju također nisu analizirani. Sve takve tvari klasificirane su kao opasne, a mogu se transportirati kao komprimirani plin, kao ukapljeni plin ili kao tekućina s vrelištem nižim ili višim od temperature okoline. Uz to što su toksične, ove tvari mogu istodobno biti i zapaljive. Sve što pri ovakvim scenarijima vatrogasne ili općenito intervencijske snage mogu poduzeti je zatvaranje mjesta ispuštanja na spremniku, razrjeđivanje plina/para upuhivanjem vanjskog zraka ili djelomična precipitacija mlazovima raspršene vode, odnosno razrjeđivanje vodom[236]. Primijenjeni operativni postupak biti će specifičan za svaku toksičnu tvar, njeno agregatno stanje, temperaturu, tlak itd. i bitno će ovisiti o mnogim specifičnim okolnostima na mjestu događaja[237]. Ako je plinovita ili lako hlapljiva tvar ujedno i zapaljiva, treba uzeti u obzir na ventilatori i druga tehnička oprema u tunelima u najvećem broju slučajeva neće biti u protueksplozijskoj izvedbi. U zatvorenom prostoru kao što je tunel, ovakva intervencija može zbog opasnosti od eksplozije biti vrlo rizična za intervencijsko osoblje.

[236] Bezopasne koncentracije toksičnih tvari u zraku su redovito vrlo niske, pa razrjeđivanje postignuto upuhivanjem zraka najčešće neće koncentraciju sniziti ispod opasne. Od precipitacije raspršenom vodom također se zbog vrlo kratkog kontaktnog vremena s kapljicama vode ne mogu očekivati znatni rezultati.

[237] Ovakve intervencije u pravilu se izvode prema uputama eksperata za pojedinu toksičnu tvar ili skupinu tvari.

7.1 Požarni scenariji sa normalnim zapaljivim krutinama (ne opasnim)

U ovu su grupu svrstani požari svih vozila koja prvenstveno služe za transport osoba (osobni automobili, autobusi itd.), te požari kamiona koji prevoze zapaljive krutine koje nisu klasificirane kao opasne tvari. Među ove krutine pripadaju mnogi zapaljivi građevinski materijali, uključujući drvo, ugljen i proizvode od ugljena, papirnati i celulozni proizvodi, prirodni proizvodi uključujući hranu, plastike itd. Ova vozila normalno će kao pogonsko gorivo sadržavati zapaljive tekućine (diesel gorivo ili benzin, rjeđe ukapljeni naftni plin), kao i zapaljive tekućine za pomoćne funkcije (npr. maziva ulja). Udio toplinskog sadržaja ovih opasnih tvari relativno je mali u odnosu na toplinski sadržaj tereta i opreme vozila (npr. kod autobusa), pa se ovdje neće posebno razmatrati. Ipak, u požarnom i vatrogasnom smislu, sadržaj zapaljivih tekućina je vrlo značajan jer se požar vrlo često širi njihovim istjecanjem, a gašenje lako zapaljivih tekućina, kao i tekućina ugrijanih na temperaturu višu od njihovog plamišta, u pravilu nije moguće postići samo primjenom vode.

U male požare mogu se svrstati požari 1–2 osobna automobila. Toplinska snaga požara biti će približno 5 MW po automobilu. Gašenje požara ometa prisustvo negorivih materijala (metali, staklo itd.) i sama konstrukcija vozila, koja stvara ograničene prostore teško dosegljive za vatrogasni medij. Uz to, prisustvo velike količine plastičnih materijala od oko 90 kg po vozilu, Lyon i Walters [44], uzrokuje nastanak gustog toksičnog dima[238]. Istjecanje upaljenih tekućina može pridonijeti prijenosu požara na ostala vozila.

U tipičnom požaru srednje veličine izgara furgon ili „normalni“ manji kamion. Toplinska snaga požara biti će 30-40 MW, što odgovara površini od oko 90–120 m^2. Granični uvjeti slični su onima u malom požaru, a dosegljivost prostora mediju za gašenje može dodatno otežavati npr. zapaljiva cerada na kamionu koja pokriva teret.

Veliki požar reprezentira zapaljeni veliki kamion s teretom, čija toplinska snaga iznosi 100-200 MW[239], što odgovara površini izgaranja od oko 200-600 m^2. Ovakav požar težak je za gašenje i na otvorenom prostoru. Pod povoljnim okolnostima, raspoloživi protok vatrogasne vode od 1200 L/min može biti dostatan za gašenje požara površine do oko 200 m^2, tako da potreba za postavljanjem mobilnih cijevnih pruga za dobavu dodatne vode postaje realna opcija. Zbog jednostrane vatrogasne navale s uzvjetrene strane, potreban domet vatrogasnih mlaznica za pokrivanje čitavog HGV-a je približno 40-45 m[240] ako se vatrogasna akcija započne na udaljenosti od oko 15 m od plamene fronte. Budući da se dometi mlaznica uvijek iskazuju za optimalni domet s nagibom od 32^0 prema horizontali [265][241], traženi je domet nemoguće postići u tunelu, jer je tjeme parabolične trajektorije mlaza osjetno više od visine tunela. Stoga će stvarni domet biti bitno manji.

Pri sve ove 3 veličine požara treba računati da je spašavanja osoba moguće jedino tijekom faze razvoja požara, tj. unutar realnog perioda od 4-8 minuta po zapaljenju. Razvijeni požar uspostavlja se nakon približno 10 minuta od zapaljenja, do kada će osobe u vozilima biti mrtve zbog utjecaja dima i topline.

[238] Površina zapaljivih plastičnih materijala, tkanina i pjenastih površina prosječno iznosi oko 20 m^2 po osobnom vozilu, Digges i sur. [264].
[239] Prema Ingason i Lönnermark [64], *HRR* kamiona s 30 t zapaljivog krutog tereta može biti osjetno veća.
[240] Kao što je već navedeno, duljina HGV s prikolicom može iznositi više od 18 m, a u nekim zemljama EU i više od 25 m.
[241] Eksperimentalno je dokazano da se najveći domet kosog mlaza vode postiže pri nagibu mlaznice od 32^0 prema horizontali.

7.2 Požarni scenariji s tekućim opasnim tvarima

Transport zapaljivih tekućina (ugljikovodika) predstavlja daleko najveći udio u transportu opasnih tvari, što je posljedica njihovog masovnog korištenja kao izvora energije za pogon motornih vozila i mnoštva drugih strojeva i uređaja pogonjenih motorima s unutarnjim izgaranjem, kao i za proizvodnju toplinske i električne energije. Spremnici na autocisternama mogu imati sadržaj od 30 m^3 pa i više, a izrađuju se od aluminijskih legura ili nehrđajućeg čelika. Vanjski plašt im je jednostruk, a u unutrašnjosti sadrže pregrade za smanjivanje zapljuskivanja pri vožnji. Spremnici normalno nisu podijeljeni na komore, pa će u slučaju oštećenja iscuriti sva tekućina sadržana iznad razine pukotine. Slični spremnici služe i za prijevoz polarnih zapaljivih tekućina kao što su to npr. alkoholi, amini, amidi, esteri i ketoni. Požar svake zapaljive tekućine u pravilu se može ugasiti samo primjenom vatrogasne pjene, pri čemu je za gašenje agresivnih polarnih tekućina nužno koristiti specijalne AR pjene, kao što je to prikazano na slici 6.5. Konstrukcija ovih spremnika je u požarnom smislu vrlo „nježna“, tako da je pri izgaranju lokve zapaljive tekućine ispod vozila teško odrediti kada će se i koliko požar proširiti. Ipak, požarni se scenariji prema veličini opet mogu podijeliti u 3 skupine.

Tipični mali požar zapaljive tekućine nastati će zbog manjeg oštećenja transportnog spremnika autocisterne i istjecanja tekućine na kolnik, što će stvoriti lokvu površine oko 10 m^2. Plameni nastalog požara snage približno 17 MW zahvaćati će spremnik, pa je opasnost od povećanja brzine istjecanja stalno prisutna. Vatrogasnom intervencijom nastojati će se hlađenjem zaštititi spremnik od djelovanja topline, požar ugasiti, a pukotina začepiti.

Požar zapaljive tekućine srednje veličine imati će površinu od oko 100 m^2 i toplinsku snagu od oko 170 MW. Značajan dio istekle zapaljive tekućine otječe u odvodnu kanalizaciju i može pridonijeti širenju požara najmanje do najbližih sifona. Opasnost od potpunog kolapsa spremnika je stalno prisutna, što bi dovelo do skoro trenutnog izlijevanja 20 ili 30 m^3 zapaljive tekućine. Vatrogasnom intervencijom nastojati će se hlađenjem zaštititi spremnik od djelovanja topline, požar ugasiti, a pukotina začepiti. Ipak, ovu je akciju daleko teže izvesti nego u prethodnom slučaju, a raspoloživa količina vatrogasne vode iz hidrantske mreže je na granici dostatnosti.

Veliki požar zapaljive tekućine nastao bi pri potpunom kidanju spremnika autocisterne ili njegovih armatura i naglom istjecanju cjelokupnog sadržaja na kolnik. Persson smatra se da bi rezultirajuća površina lokve iznosila oko 300 m^2, a toplinska snaga oko 300 MW [158], dok bi prema Ingason i Lönnermark [64] mogla biti i znatno veća. Pri ovom scenariju moguće je očekivati uspostavljanje pulsirajućeg izgaranja, a plameni jezici mogli bi imati takvu duljinu da požar prenesu i na obližnja vozila u smjeru niz vjetar. Istodobno bi istekla tekućina vjerojatno premašila kapacitet odvodnje kanalizacijskog sustava i time uzrokovala daljnje širenje požara. Imajući u vidu da je raspoloživi protok vatrogasne vode dostatan za gašenje požara površine najviše 150 m^2, za eventualno uspješno gašenje bilo bi nužno postavljanje mobilnih cijevnih pruga za dobavu dodatne vode. Ipak, s obzirom na relativno malu dubinu goriva, upitno je da li bi se takve cijevne pruge mogle postaviti prije nego što požar lokve sam dogori do kraja.

7.3 Požarni scenariji sa zapaljivim plinovima

Pri požarnom scenariju sa zapaljivim plinovima vrlo je teško postaviti granice između malog, srednjeg i velikog akcidenta. Istjecanje zapaljivog plina uvijek nastaje kao posljedica

oštećenja spremnika ili njegovih armatura, a maseni protok na pukotini ovisiti će o tome da li je plin u ukapljenom ili u komprimiranom stanju, da li je pukotina u području parne ili tekuće faze, tlaku u spremniku, vrelištu (ukapljenog) plina itd. U svakom slučaju uspostaviti će se mlaz istječućeg plina, koji se može odmah zapaliti i time stvoriti plamenu buktinju. Ako buktinja izgara, ona predstavlja najbolji osigurač protiv eksplozije i ne smije se nikako ugasiti, ali se mogu hladiti zahvaćene površine. Posebna opasnost nastaje ako plamenovi dolaze u kontakt s plaštem spremnika, jer to može izazvati pojavu BLEVE. S druge strane, ako se plin ne upali odmah, stvoriti će se rastući oblak zapaljivog plina koji će se kretati niz vjetar sve dok ne dođe do izvora paljenja. Rezultat toga je eksplozija, VCE. Dok je u prvom slučaju moguća akcija hlađenja, a možda i akcija začepljenja pukotine, u drugom slučaju nema mogućnosti za bilo kakvo djelovanje intervencijskih snaga.

Glede sigurnosti intervencijskog osoblje treba imati u vidu da je svaka akcija u zatvorenom prostoru u kojem dolazi do oslobađanja zapaljivog plina/para zbog moguće eksplozije ekstremno rizična za vatrogasne snage, te je uvijek upitno da li intervenciju uopće poduzeti ili ne.

7.4 Požarni scenariji s toksičnim zapaljivim tvarima

Toksične zapaljive tvari mogu postojati u bilo kojem agregatnom stanju, a ako su plinovite, mogu biti ukapljene ili komprimirane. Izgaranjem takvih tvari često se eliminira njihova toksičnost, pa u tom slučaju nema širenja toksičnog oblaka. Ako izgaranjem nastaju drugi toksični produkti, situacija postaje složenija. Primijenjeni operativni postupak biti će specifičan za svaku toksičnu tvar posebno, njeno agregatno stanje, temperaturu, tlak itd. i bitno će ovisiti o mnogim specifičnim okolnostima na mjestu događaja. Ovakve intervencije u pravilu se izvode prema uputama eksperata za pojedinu toksičnu tvar.

7.5 Vatrogasna služba i djelovanje u tunelima

Akcije spašavanja i vatrogasne akcije u tunelima postavljaju pred intervencijske timove signifikantno veće zahtjeve nego požari zgrada. Neki od razloga za to su:

- Raspoloživa površina za odvođenje produkata izgaranja je mnogo manja[242], pa su temperature okoliša bitno veće čak i na relativno velikoj udaljenosti od žarišta. To stvara dodatno fiziološko opterećenje vatrogasaca.
- Prostor za djelovanje ograničen je dimenzijama tunela.
- Pristupi do tunela redovito su dulji nego pristupi do zgrada, što produljuje vrijeme odziva vatrogasaca.
- Pristup od portala do mjesta požara može biti dug, zakrčen vozilima i ometan ljudima koji bježe od požara te ih ponekad treba spašavati, što sve usporava akciju gašenja.
- Uvjeti u tunelu, na putu do mjesta požara, često su karakterizirani lošom vidljivošću, strujanjem zraka, povišenom temperaturom, smanjenom koncentracijom kisika uz povećanu koncentraciju CO, CO_2 i drugih opasnih plinova.
- Prepoznavanje uvjeta na požarištu odnosno akcidentu ometaju loša vidljivost i vizura iz dvaju ili čak samo jednog smjera.

[242] Pri uzdužnoj je ventilaciji najveća i jednaka je poprečnom presjeku tunela.

- Požari u tunelu mnogo su rjeđi nego požari zgrada, pa vatrogasci (posebno dobrovoljni) imaju općenito manje iskustva.
- Respiratorna zaštitna oprema mora se stalno nositi, što povećava fiziološko opterećenje, skraćuje vrijeme boravka u opasnoj zoni i umanjuje sposobnosti percepcije okolišnih uvjeta (vidom, sluhom, mirisom itd.).

Stoga bi vatrogasci koji po potrebi interveniraju pri tunelskim požarima morali proći poseban trening u realističkim uvjetima, Wetzig i sur. [266].

Stalna profesionalna vatrogasna služba stacionirana u neposrednoj blizini portala tunela bitno pridonosi brzini intervencije i sigurnosti prometa u njima, no činjenica je da je to rješenje relativno skupo[243]. Prevladavajuće mišljenje neposredno prije izbijanja triju katastrofalnih požara u europskim tunelima[244] bilo je da su u prošlosti tuneli često imali vlastite vatrogasne postrojbe, ali da novi tuneli obično ovise o suradnji s obližnjim javnim vatrogasnim postrojbama, PIARC [9]. To je mišljenje nakon ovih požara donekle korigirano, no cijena zaštite se nije smanjila. U RH požarna i opća sigurnost tunela dobrim se dijelom oslanja na profesionalne vatrogasce zaposlene kod operatora tunela koji dežuraju uz portale tunela na autocestama, što je očito iz relativno velikog broja zaposlenih vatrogasaca (tablica 7.2). Ukupni trošak vatrogasaca zaposlenih kod operatora tunela u RH procijenjen je na 47 miliona kn/god, što iznosi > 55% troška najveće vatrogasne postrojbe u RH (JVP Zagreb) koja je odgovorna za permanentnu zaštitu od požara više od 800 000[245] ljudi.

Tablica 7.2. Vatrogasno osoblje zaposleno kod operatora tunela u RH i trošak

Operator	BINA[246] Istra	ARZ[247]	HAC[248]	Ukupno
Broj postrojbi/postaja	2	3	6	11
Broj tunela	1	12+4[249]	18	31+4
Broj vatrogasaca	21	55	112	188
Procijenjeni trošak[250] (Eur/god.)	693 000	1 815 000	3 696 000	6 204 000

Možda je zanimljivo navesti da susjedna Slovenija ima ukupno 15 TERN tunela duljih od 500 m, od čega je jedan (Karavanke) duljine 8019 m, a 4 su duljine od 2000-3000 m, Merzagora [268]. Unatoč tome, niti jedan od tunela nema stalnu vatrogasnu posadu u blizini portala, već se za intervencije oslanjaju na obližnje gradske vatrogasne postrojbe, Petelin i sur. [179][251], uzimajući kao kriterij dostatnosti vrijeme vožnje do portala od 15 minuta. Uz

[243] Na bazi financijskog proračuna JVP Grada Zagreba, koji za cca 340 operativnih vatrogasaca iznosi oko 85 000 000 kn (uključuje redoviti trošak djelovanja + pričuvu za građevinske objekte + nabavku 1-2 vozila godišnje), godišnji trošak po vatrogascu iznosi oko 250 000 kn (osobna komunikacija sa zapovjednikom). Osobnom komunikacijom s pomoćnikom zapovjednika JVP Grada Rijeka potvrđen je približno isti trošak po vatrogascu i u toj postrojbi za cca 120 operativnih vatrogasaca.

[244] Tri katastrofalna požara koja su uzrokovala preispitivanja pitanja sigurnosti u tunelima izbila su 1999. (Mt Blanc i Tauern) te 2001. (St. Gotthard).

[245] Broj stanovnika u Gradu Zagreb iznosi 792 875 [267]. Uzimajući u obzir boravak zaposlenika/dnevnih migranata i posjetitelja, ukupni broj osoba u Gradu Zagreb tijekom dana sigurno znatno prelazi 800 000.

[246] Podaci dobiveni od tvrtke BINA Istra d.d. Pula (tunel Učka).

[247] Podaci dobiveni od tvrtke Autocesta Rijeka-Zagreb d.d. Zagreb.

[248] Podaci dobiveni od tvrtke Hrvatske autoceste d.o.o. Zagreb.

[249] Tunela ima 12 na autocesti Rijeka-Zagreb, a 4 na riječkoj obilaznici.

[250] Ukupni trošak procijenjen je na temelju godišnjeg troška po vatrogascu od 250 000 kn ≈ 33 000 Eur.

[251] Nedavno je otvorena prva vatrogasna postaja (Vransko) uz samu autocestu Ljubljana-Celje, gdje dežuraju po 3 profesionalna vatrogasca u smjeni, naizmjence iz gradskih postrojbi Celje i Domžale (osobna komunikacija s tehničkim vođom Gasilske brigade Ljubljana).

pretpostavke bazirane na iskustvu da je vrijeme od izbijanja požara do alarma 1-2 minute, vrijeme od prijema alarma u profesionalnoj vatrogasnoj postrojbi do izvoza 1 minuta, te dodajući vrijeme razvoja snaga za gašenje u tunelu od nekoliko minuta Vergnault [139], dolazi se do činjenice da će minimalno vrijeme od izbijanja požara do početka gašenja biti oko 20 minuta. To znači da će u većini slučajeva vatrogasci početi gasiti već potpuno razvijeni požar, što bitno otežava akciju spašavanja ljudi u tunelu kao i samu akciju gašenja. Ovu konstataciju podržavaju podaci Bergqvista [269], prema kojima bi vatrogasne postrojbe trebale biti u stanju stići do žarišta požara i započeti s gašenjem unutar 10 minuta nakon požarnog alarma, ističući da požari vozila redovito hitro rastu nakon prvih 5-10 minuta.

Za usporedbu s gornjim podacima zanimljivo je spomenuti jedan drugačiji primjer. Analiza mogućnosti djelovanja lokalne vatrogasne postrojbe na tunelu Hsuehan[252] pokazala da je vrijeme njihovog pristupa do mjesta požara između 22,8 i 26,4 minute. Procjenjujući da je optimalno vrijeme za početak gašenja požara autobusa < 10 minuta, te da je realno očekivanje da će se u procijenjenom vremenu odziva požar već proširiti na obližnja vozila i da se vatrogasci neće moći približiti dovoljno da uspješno izvedu akciju gašenja, uz oba portala tunela uspostavljene su vatrogasne postaje sa stalnom posadom Chien i sur. [258]. Prema English [257], vatrogasna postrojba može relativno točno odrediti vrijeme „odzivnog refleksa“[253], no vrijeme do početka intervencije može bitno ovisiti o okolnostima na mjestu događaja. Ako vatrogasci imaju na raspolaganju slobodnu voznu traku i ako je vidljivost u tunelu dobra, moći će se dovesti do žarišta. S druge strane, ako je tunel ispunjen dimom, možda će se morati provlačiti između zaustavljenih i različito blokiranih vozila, a eventualno spašavanje ugroženih osoba može intervenciju dodatno usporiti. Brzina pristupa može biti od svega 4,3 m/min u dimu, pa do 80 m/min u uvjetima dobre vidljivosti [257].

Kao što je već navedeno, vatrogasne su postrojbe služba za koju se vrlo često među laicima, ali isto tako i u krugovima projektanata sigurnosnih sustava, operatora i znanstvenika koji se bave pitanjem sigurnosti i zaštite od požara tunela smatra da je jedini problem brzi alarm i njihov pravovremeni pristup do tunela. Ova predodžba je pogrešna, jer vatrogasne snage imaju granice do kojih njihova intervencija može biti izvedena uspješno i sigurno. Granice mogućnosti intervencije i dovođenja u pitanje vlastite sigurnosti do kojih će vatrogasna služba ići nalaze se u opće prihvaćenim pravilima, koja se mogu sažeti u sljedeće, Klein [271][254]:

- Mi smo spremni riskirati naše živote u znatnoj mjeri pod striktno kontroliranim uvjetima da spasimo ljudski život koji je moguće spasiti.
- Mi smo spremni riskirati naše živote malo da spasimo imovinu koju je moguće spasiti.
- Mi nismo spremni riskirati naše živote uopće da spasimo živote ili imovinu koji su već izgubljeni.

U predavanju održanom u Greenbelt, MD, SAD, zamjenik zapovjednika Vatrogasne postrojbe Boston, Fleming [273], iznio je ocjenu da je požar od 20-30 MW maksimalno što njihova postrojba može vrlo vjerojatno savladati, ne izlažući vatrogasce prekomjernom riziku. Pritom je naglasio da se s gašenjem mora započeti najviše 8-10 min. nakon izbijanja požara, da

[252] Tumel Hsuehan je najdulji na Taiwanu i peti najdulji cestovni tunel na svijetu (12,9 km).

[253] Reflex time je vrijeme od primitka poziva pa do dolaska do portala tunela, što uključuje primanje poziva, selekciju i obavještavanje intervencijskog tima, vrijeme izlaska iz postrojbe i vrijeme vožnje do portala prema NFPA 1710:2010 [270].

[254] Vrlo slično stajalište iznosi IAFC, International Association of Fire Chiefs [272]: Ne riskirajte svoj život za spašavanje života i imovine koje je nemoguće spasiti; preuzmite ograničeni rizik da zaštitite imovinu koju je moguće spasiti.

uporaba praha ili vode moguće neće biti dovoljna i da je za gašenje potrebno koristiti pjenu (AFFF)[255]. U zaključku se ističe da projektanti precjenjuju, ili čak niti ne uzimaju u razmatranje, stvarne mogućnosti mjesne vatrogasne postrojbe pri osmišljavanju projekta i sustava djelovanja tunela. Zamjenik zapovjednika Vatrogasne postrojbe Seattle i pomoćni Fire Marshall[256], English [257], vrlo dobro opisuje ulogu vatrogasaca i njihove mogućnosti djelovanja, dajući pritom opsežan osvrt i na pitanje da li je FFFS potreban u tunelu[257].
Jednake granice, tj. da su gornje granice djelovanja prosječne vatrogasne postrojbe tunelski požari koji uključuju do 2 osobna automobila, istovremeni požar autobusa i automobila ili jedan HGV u kojem je požar započeo u vozilu i nije se proširio na teret HGV u ranoj fazi požara (sve u ovisnosti o teretu koji se prevozi) navode Kim i sur. [143], zaključujući da su to požari toplinske snage do približno 20-30 MW. Ovaj zaključak temelji se na izvještajima vatrogasnih brigada i opisima akcidenata iz prošlosti te predstavlja samo grubu procjenu izvedenu na temelju ograničenog broja informacija, a ovisi i o mnogim faktorima kao što su tip vozila, osobine tereta, ventilacija, visina tunela, dostupnost vode i spremnost vatrogasne službe.

[255] Za usporedbu se navodi da se za požar autocisterne u tunelu računa s toplinskom snagom od 100 MW, što je ekvivalent izgaranja lokve površine 44,7 m^2, odnosno da je to lokva koju stvara 100 gallona (378,5 L) goriva (dubine 8,7 mm), dok su pri nedavnom požaru autocisterne od 10 000 gallona (37 850 L) imali površinu gorenja oko 750 m^2, što ne mogu savladati ni FFFS niti vatrogasci i što će spriječiti sigurnu evakuaciju osoba na stotine metara udaljenosti s obje strane akcidenta.

[256] Fire Marshal je časnik zadužen za preventivu i/ili istrage o požarima u gradu, provinciji ili državi, Burklin i Purington [260].

[257] „FFFS predstavlja relativno nov koncept za mnoge organe vlasti nadležne za tunele, što je djelomice posljedica nesporazuma vezanih uz FFFS. U gradu Seattle, država Washington, postoji 30000 sustava koji čuvaju ljudske živote i štite ih od požara, što uključuje i 6000 FFFS-a. Od svih njih, svega 5 su u cestovnim tunelima, a u 2 od tih tunela postavljen je kombinirani deluge sustav pjene. Najstariji tunel sa supresijom je Battery Street Tunnel, otvoren 1952. godine. Od tada on djeluje uspješno, s malim brojem mehaničkih grešaka i još manjim brojem lažnih aktiviranja. Naše lokalne vatrogasne snage nekoliko su puta vozile kroz raspršeni mlaz.
Fiksnu supresiju požara treba pažljivo razmotriti u fazi projektiranja. Uspješna uporaba fiksne supresije dokazala se prilikom požara u tunelu Burnley 2007. godine, kojom prilikom su 3 osobe poginule u sudaru vozila, ali nitko više nije izgubio život u sljedećem događaju koji bi se bio razvio u poprilično veliki požar da nije bilo FFFS. Nesporazumi s fiksnom supresijom su uobičajeni. Prije svega treba istaknuti da mnogi ljudi vjeruju da „testni požar“ u tunelu reprezentira tipični požar. No za testni požar se koriste zapaljive tekućine, tj. benzin ili diesel gorivo. Ova kombinacija proizvodi silnu količinu dima iz „vrlo vrućeg“ požara. Stvarni požari vozila su rijetko toliko vrući, budući da se vozila sastoje od niza različitih „goriva“, kao što su izolacije, kablovi, podstava stolica, teret itd., što sve izgara pri nižim temperaturama. No kako ova kombinacija materijala može stvoriti iznimno toksičan dim, posebno uz nedovoljno prisustvo kisika, automobilisti i intervencijsko osoblje trebali bi izbjeći izlaganje dimu ako je to ikako moguće. Ovaj skup proizvoda stvara „hladniji požar“ nego benzin, pa se stoga dim ne stratificira tako lako kako mnogi vjeruju. Čak i pri vrućim požarima, kao što je požar benzina, dim se hladi brzo jer se miješa s hladnim zrakom i destratificira prilikom širenja. S uključenom mehaničkom ventilacijom, to se događa relativno brzo, slično kao i pri aktiviranju FFFS.
U NFPA 502:2008 se navodi: „Požarni testovi su pokazali da se dim obično ne formira u sloj uz tjeme tunela, već ubrzo ispunjava njegov poprečni presjek. Normalno kretanje zraka u tunelu ubrzava ovaj proces. FFFS s vodom smanjuje temperaturu i rizik od prijenosa požara na druga vozila“. NFPA 502 se zatim osvrće i na bojazan da će se deluge aktivirati na neispravnim lokacijama: „Zonski sustavi se aktiviraju preko sustava detekcije, koji je precizan čak i pri forsiranoj ventilaciji“, a općenito se navodi: „Ispravno projektirani FFFS s vodom supresira požar i hladi tunelski okoliš. Budući da je pri požaru HGV potrebno svega 10 minuta da prijeđe 100 MW i 1200 ^{0}C, što su fatalni uvjeti, bitno je da se FFFS uključi što je ranije moguće“.
Potrebno je istaknuti da je brzo aktiviranje deluge sustava bitno, jer će se, ako ispravno djeluje, voda primijeniti na relativno kratku sekciju tunela, dok će ventilacija ohladiti i destratificirati dim duž velikog dijela tunela. Zapovjednik na požarištu koji razumije sustave supresije shvaća da do njihovog aktiviranja treba doći što je ranije moguće i da se požar vrlo vjerojatno neće proširiti ako sustav supresije djeluje ispravno.
Istraživanju fiksne supresije u tunelima treba posvetiti znatno više pažnje, kako bi se utvrdili: učinak mase vode na ventilacijski zrak, granice vidljivosti pri supresiji s višom gustoćom primjene te prednosti/nedostaci ranog aktiviranja, English [257]“.

Snaga požara od oko 30 MW realna je granica i onoga što vatrogasci Gasilske brigade Ljubljana mogu savladati u tunelskom požaru (tuneli Šentvid, 1033/1060 m, Golovec 563/594 m)[258, 259].

Vatrogasne postrojbe zemalja koje su prihvatile FFFS imaju vrlo pozitivno mišljenje o njihovoj učinkovitosti. Bryant [261] navodi: „Nakon tragičnih tunelskih požara u inozemstvu, NSWFB[260] je još zadovoljnija što je odlučila nastaviti sa sustavima raspršene vode. Ostali članovi AFAC[261] podržavaju ovo stajalište …. Mnogi argumenti protiv sustava supresije fokusirali su se na primjenu vode na požare snage 50 MW ili više. Mi smatramo da će ispravna uporaba ovog sustava spriječiti rast požara, a u slučaju skrivenih požara onemogućiti prijenos požara kakav se dogodio u spomenutim inozemnim događajima.“ Stav o poželjnosti sprinkler ili drugog odgovarajućeg FFFS zagovaraju i znanstvenici koji se prvenstveno bave ventilacijom tunela, Modic [135].

Prema Kim i sur.[143], iako na bazi vrlo ograničenih informacija koje su na raspolaganju, može se usvojiti da bi požare koji su posljedica sudara trebalo započeti gasiti unutar 7 minuta od izbijanja, dok bi s gašenjem požara pojedinačnog vozila koji nije izazvan sudarom trebalo započeti u periodu od 13-20 minuta[262]. Time bi se osigurala kontrola inicijalnog požara i izbjegao katastrofalni ishod. Slično tome, Drakulić [73] navodi da je potrebno intervenciju vatrogasaca izvršiti unutar 8 odnosno10 minuta[263].

U nekim radovima ipak se priznaje da su granice mogućnosti djelovanja vatrogasnih snaga u tunelu niže od normalno predvidljivih scenarija. Ingason [276] navodi da su poteškoće s gašenjem velikih požara (75-200 MW) takve, da pokušaji približavanja kroz dim s nizvjetrene strane nisu uopće mogući, dok će pokušaj približavanja požaru snage 75 MW s uzvjetrene strane biti znatno otežan zbog toplinskog zračenja. Nadalje, s gašenjem se mora započeti već na udaljenosti od 15-20 m od žarišta, a za stavljanje požara pod kontrolu biti će potrebno djelovanje najmanje 8 mlazova tijekom 20-30 minuta. Pri požaru snage > 100 MW, toplinsko zračenje na uzvjetrenoj strani vjerojatno će pokušaj približavanja žarištu zbog gašenja učiniti ekstremno teškim. Današnji dišni aparati vjerojatno nisu dovoljno prikladni za gašenje požara u tunelima, što zahtijeva razvoj novih metoda gašenja, Ingason [276].

---

[258] J. Ložnar, tehnički vođa postrojbe, ističe nedovoljnu količinu vode kao glavni problem (osobna komunikacija, 19.7.2011.)

[259] Stavovima vatrogasca, kao konačnim „izvoditeljima“ akcije spašavanja i gašenja u tunelima dat je relativno velik značaj, jer se njihovo mišljenje vrlo rijetko čuje na stručnim i znanstvenim skupovima ili iznosi u različitim publikacijama, pa se opravdano stječe dojam da se to mišljenje ne akceptira u propisima, preporukama, pri projektiranju sustava zaštite itd. Za ilustraciju se navode 2 primjera:
Na Međunarodnoj radionici PIARC TO C3.3 WG6 „Suvremena dostignuća zaštite od požara u cestovnim tunelima – propisi, smjernice i primjena“ u Zagrebu, 8-9.2.2007., od 180 sudionika, bilo je prisutno svega nekoliko vatrogasaca (zapovjednika) ili profesionalaca zaduženih za zaštitu od požara (ARZ i HAC). Radionici nije prisustvovao niti jedan predstavnik neke gradske JVP (javne vatrogasne postrojbe), nitko iz DUZS (Državna uprava za zaštitu i spašavanje) i nitko iz HVZ (Hrvatska vatrogasna zajednica).
Na 5. simpoziju Tunnel Safety and Ventilation u Grazu, 3-4.5.2010., autor je na pitanje koliko ima prisutnih vatrogasaca dobio odgovor da je to jedan. Na listi sudionika simpozija bilo je 278 imena različitih stručnjaka.

[260] NSWFB, New South Wales Fire Brigades, Australija.

[261] AFAC, Australian Fire Authorities Council.

[262] Pri sudarima vozila često dolazi do probijanja rezervoara goriva i istjecanja goriva na kolnik, što pridonosi osjetno bržem rastu požara.

[263] Intervenciju vatrogasaca i pristupanje gašenju potrebno je obaviti u što kraćem vremenu, kada požar još nije postigao svoju maksimalnu snagu [73].

8. Rasprava

8.1 Uvodna razmatranja

Kao i u svakoj drugoj vrsti zaštite, u zaštiti od požara primjenjuju se i preventivne i represivne mjere[264]. Iako se načelno uvijek preferiraju preventivne mjere, teško je zamisliti uspješan sustav zaštite bez represivnih mjera.

Stacionarni sustavi za gašenje požara čine jednu od sastavnica u sustavu sigurnosti građevine koja je dio cjelovitog sustava zaštite od požara. Iako je svaka sastavnica nezavisna od ostalih, one se međusobno dopunjavaju i potpomažu, pa se moraju promatrati kao jedna cjelina. Stupanj značaja svake od njih ovisan je o prirodi rizika u pojedinom objektu. Sastavnice represivnog sustava zaštite od požara u logičnom prirodnom i funkcionalnom redoslijedu su:

a) Početno gašenje požara, npr. ručni vatrogasni aparati, cijevna vitla i požarni pokrivači.
b) Stacionarni sustavi za gašenje požara[265].
c) Djelovanje vatrogasne postrojbe, što uključuje uporabu njene vlastite opremu, ali i stacionarne opreme građevine, kao što su npr. hidrantska mreža, hidrantski vodovi i priključci za pjenu.
d) Ugrađene vatrozaštitne osobine građevine i sadržaja, tj. vatrootporni sadržaji, požarna otpornost elemenata građevine i požarne zone.

Jasno je da uspjeh akcije a) može akcije b), c) i d) učiniti nepotrebnima. Isto tako, uspjeh b) može otkloniti potrebu za c) ili nju reducirati s velike akcije na obično događivanje. Uspjeh c) može značiti da funkcija d) ne bude bitno potrebna niti iskorištena. Važno je znati da se u nekim objektima, zbog vrste aktivnosti i zaposjednutosti u objektu, kao i zbog tipa sustava za gašenje, očekuje aktivnost i doprinos od a), b), c) i d). U drugim slučajevima čitava odgovornost za detektiranje i gašenje požara se bez alternative oslanja na stacionarni sustav. U trećim pak slučajevima, stacionarni sustav je projektiran tako da na sebe preuzme veći dio rizika, dok će podršku po potrebi i kao rezerva pružiti vatrogasna postrojba. Stupanj međuzavisnosti ovih sastavnica varira i ovisi o tipu sustava i karakteristikama rizika u objektu. Potrebu za pojedinom sastavnicom može umanjiti ili eliminirati uspjeh neke druge od njih, no u nekim su slučajevima sve sastavnice potrebne. Stacionarni sustav za gašenje požara (FFFS) može predstavljati jednu od vrlo efikasnih sastavnica u sustavu zaštite od požara, budući da je na raspolaganju uvijek i trenutno, a projektiran je specifično za određeni rizik.

Statistički podaci iz prošlosti nedvojbeno pokazuju da je od mogućih triju vrsta opasnih/katastrofalnih događaja (požar, eksplozija, ispuštanje toksičnih tvari), požar sasvim sigurno daleko najčešći akcident u cestovnim tunelima. U slučaju brzo rastućeg tunelskog požara koji ima potrebne predispozicije da se razvije u katastrofalni požar, sekvence događanja normalno su sljedeće:

- Dim hitro postaje vrlo gust, što korisnicima tunela bitno otežava ili čak onemogućuje da neozlijeđeni dođu do sigurnih izlaza.

[264] Represivne mjere, u odnosu na požar koji je nastao ako preventivne mjere nisu dale očekivani rezultat. Alternativno bi se represivne mjere mogle nazvati korektivnima (po analogiji sa sustavom upravljanja kvalitetom ili sustavom upravljanja okolišem) ili kurativnima (po analogiji s medicinom ili sustavom zaštite na radu).
[265] U skladu s uobičajenom terminologijom, termin „gašenje“ ne mora nužno značiti da je požar ugašen u potpunosti, već može biti supresiran ili samo stavljen pod kontrolu.

- Korisnike tunela koji se nisu uspjeli evakuirati zbog dima ili neshvaćanja opasnosti u kojoj se nalaze, dim i toksični plinovi u dimu mogu lako savladati ili čak usmrtiti u roku od nekoliko minuta.
- Temperature ubrzo dosižu granice izdržljivosti i postaju neizdržljive, što zajedno s dimom i toksičnim plinovima onemogućava samospašavanje.
- Visoke temperature ugrožavaju/prekidaju djelovanje tunelskih sustava kao što su ventilacija, rasvjeta i komunikacije, a nakon toga ugrožavaju i konstrukciju građevine te onemogućavaju spasilačko-vatrogasne akcije.

Cjelokupno dosadašnje iskustvo govori da su događanja tijekom prvih nekoliko minuta takvog požara od bitne važnosti za sigurnost i sudbinu korisnika tunela i samog tunela. Strategija spašavanja ljudskih života normalno se oslanja na 2 konsekutivne faze:

- Samospašavanje – faza tijekom koje korisnici tunela trebaju donijeti ispravne odluke i iskoristiti mogućnosti koje im stoje na raspolaganju da se sami što brže evakuiraju.
- „Potpomognuto“ spašavanje – faza tijekom koje je primarni i glavni cilj intervencijskih ekipa/vatrogasaca da spase ljude koji se još nalaze u tunelu, koji mogu biti potpuno ili samo djelomično sposobni za kretanje, ozlijeđeni ili čak u besvjesnom stanju. Jedan od bitnih ciljeva vatrogasne navale odnosno gašenja požara je upravo omogućavanje spašavanja ljudskih života. Budući da spašavanje života ima prioritet u odnosu na ostale ciljeve, angažiranje vatrogasaca u „potpomognutom“ spašavanju može dovesti do zakašnjelog početka akcije gašenja požara i svih pratećih negativnih posljedica koje tome slijede.

Prvenstvena zadaća ventilacijskog sustava i ostalih sigurnosnih sustava i opreme je da olakša ove dvije faze spašavanja time što će u najvećoj mogućoj mjeri održati i/ili uspostaviti izdržljive uvjete okoline duž putova evakuacije. Nakon toga, njihova je zadaća da vatrogascima osiguraju uvjete u kojima je intervenciju i gašenje požara moguće izvesti, štiteći pritom i tunel i njegovu opremu od oštećenja/uništenja u granicama mogućnosti.

Dosadašnja istraživanja i razmatranje autora disertacije pokazala su da u stvarnim situacijama mogu nastupiti okolnosti pri kojima katastrofalni požar nije više moguće spriječiti ili zaustaviti ako postoje povoljni uvjeti za takav razvoj (količina, vrsta i raspored gorivih tvari, ventilacija itd.). Te okolnosti mogu biti:

- Zakašnjenje vatrogasne akcije uzrokovano dugotrajnim pristupom do tunela zbog kasne dojave požara, prometne gužve, prometnog akcidenta ili teških uvjeta na pristupnom putu (npr. snijeg), velike udaljenosti do tunela, nedovoljne spremnosti vatrogasaca, loše opreme i/ili vozila vatrogasaca itd.
- Zakašnjenje vatrogasne akcije uzrokovano dugotrajnim pristupom od portala tunela do žarišta zbog spašavanja ljudi, gužve zaustavljenih vozila u tunelu, neadekvatne ventilacije i uvjeta okoline u tunelu, pristupa s pogrešne strane tunela, pogrešnih informacija o požaru ili pogreške u zapovijedanju, nedostatka potrebne specifične opreme (npr. IC-kamera, „banke zraka“ na vatrogasnom vozilu i sl.), nedovoljne uvježbanosti postrojbe itd.
- Neuobičajeno brz razvoj požara, npr. zbog izlijevanja veće količine zapaljive tekućine, zbijenog rasporeda stagnantnih vozila, prisustva lako zapaljivog ili eksplozivnog tereta, širenja požara kroz sustav odvodnje, podmetnutog požara itd.
- Nedostatna količina i/ili nedostatan protok vode, pjenila, nedovoljna količina različite vatrogasne i/ili zaštitne opreme, intervencijskih vozila, broja vatrogasaca itd.
- Nekvalitetna i/ili neadekvatna oprema, neuvježbanost vatrogasaca itd.
- Kombinirani utjecaj spomenutih faktora.

Zaključak koji se nameće sam od sebe je da bi se svi ti problemi i nedostaci gotovo uvijek mogli izbjeći ako bi bilo moguće požar ugasiti, supresirati ili barem staviti pod kontrolu u njegovoj najranijoj fazi. Budući da je teško očekivati da bi vatrogasno vozilo moglo pratiti svaki HGV ili barem svaki HGV s opasnim teretom zbog trenutne akcije u slučaju potrebe, FFFS za gašenje/supresiju/kontrolu izgleda da preostaje kao jedino odgovarajuće rješenje.

Pregled literature, rezultata teoretskih i eksperimentalnih istraživanja i iskustava u svijetu pokazuje da na raspolaganju stoji veliko znanje i riznica iskustava o učinkovitosti gašenja/supresiranja/kontrole požara uz pomoć FFFS. Prihvaćanje japanskih ili australskih iskustava s klasičnim deluge sustavom vrlo bi vjerojatno i u Europi dovelo do identičnih ili sličnih pozitivnih iskustava koja već imaju spomenute zemlje. Kako je po svemu sudeći za sada preferencija Europe usmjerena prema sustavima vodene magle, potrebno je naglasiti da za njih ne postoje jasni požarno-tehnološki projektni kriteriji kao za deluge sustave vode ili pjene. Stoga je svaku instalaciju potrebno prilagoditi specifičnim uvjetima konkretnog tunela i zahtjevima lokalnih organa vlasti, što redovito obavljaju veće tvrtke koje razvijaju pojedine sustave vodene magle. Dosad je nedvojbeno dokazano da gotovo svaki FFFS za gašenje/supresiju/kontrolu ima vrlo pozitivan učinak na tunelski požar i da dugogodišnje negativne predrasude, posljedice stavova baziranih na iskustvima Ofenegga, nije više moguće opravdati. Ipak, prije donošenja odluke o postavljanju stacionarnog sustava potrebno je razmotriti niz značajnih faktora.

- Prometno opterećenje je vrlo važan parametar. Nedvojbeno je da veće prometno opterećenje povećava vjerojatnost akcidenta, a time i prosječni broj ljudi koji će akcidentom biti direktno ugroženi. Istodobno, veće prometno opterećenje podrazumijeva i veći prihod operatora tunela, iz kojeg je lakše financirati sigurnosne instalacije i zahvate.
- Važnost tunela za domaći i međunarodni tranzitni promet je sljedeći bitan faktor. Danas će biti teško opravdati prihvatljivost akcidenata kakvi su se prije 10-ak godina dogodili u 3 velika transalpska tunela, pri kojima je poginuo veći broj ljudi, a tuneli su ostajali zatvoreni mjesecima. Također se ne bi smjelo dogoditi da tuneli s vrlo velikim prometnim opterećenjem, čak ako su i kratki, ostanu bez zaštite. To je upravo situacija koja se dogodila u tunelu I-5 u Santa Clarita, Kalifornija, gdje nakon akcidenta u kojem je sudjelovalo više od 20 vozila, požar u tunelu duljine svega 183 m nije bilo moguće ugasiti, pa se tunel urušio i ostao zatvoren više od mjesec dana, a cijena rekonstrukcije popela se na više od 100 miliona USD, Thompson [277].
- Tuneli u blizini većih gradskih aglomeracija, osim što normalno imaju veliko prometno opterećenje, u pojedinim periodima dana mogu imati prometne „špice“ sa zastojima u prometu. U uvjetima zastoja, požarni akcident može hitro prerasti u katastrofu, jer će pristup vatrogasaca biti bitno usporen i otežan. Međutim, kao što pokazuje slučaj i analiza akcidenta u tunelu Burnley, FFFS je u takvim okolnostima neizostavni dio dobrog cjelokupnog sustava sigurnosti.
- Tunele u zabačenim/ruralnim područjima vjerojatno će štititi lokalna dobrovoljna vatrogasna postrojba. Stoga se realistički može očekivati osjetno dulje vrijeme do početka gašenja, što znači da će se vjerojatno operativno i brojčano slabija postrojba suočiti s potpuno razvijenim požarom. Može se očekivati da takva postrojba neće biti u mogućnosti kontrolirati nastalu situaciju, posebno ako akcident uključuje opasne tvari. Situacija je svakako drugačija ako tunel štiti vlastita profesionalna postrojba, no tada su i troškovi nerazmjerno veći.

- Povećano prometno opterećenje uz korištenje sve većih HGV donosi potencijalno sve veće požare, čak ako se radi o transportu normalnih neopasnih gorivih materijala (drvo, plastika, autogume, hrana), pa se rizici povećavaju i u slučaju ako tunel ne dozvoljava prolaz opasnih tvari. S gledišta sigurnosti cjelokupnog društva, odluka da se kroz tunel ne dopusti prijevoz opasnih tvari ne mora biti optimalna, jer će se one tada prevoziti alternativnim putovima, gdje razina sigurnosti može biti još niža, a broj ugroženih osoba veći.

Dobitak na sigurnosti zbog uporabe aktivnih sustava za gašenje/supresiju/kontrolu požara iskazuje se kroz znatno smanjeni rizik za osobe koje koriste tunel, kroz održavanje funkcionalnosti bitnih instalacija i opreme tunela tijekom akcidenta, kroz zaštitu tunelske građevine od većih oštećenja, smanjeno vrijeme zatvaranja tunela nakon akcidenta, manje štete na vozilima, smanjene troškove popravka tunela i manje premije osiguranja. FFFS se može aktivirati gotovo istodobno s nastupom akcidenta, dok je požar još u početnoj fazi. Budući da je maseni dotok dimnih plinova mali, njihova destratifikacija neće imati signifikantan utjecaj na vidljivost u tunelu, a jer je hlađenje okoline i okolnih objekata započelo i prije nego što su se značajno zagrijali, rizik od prenošenja požara je minimalan. Rezultati testova FFFS pokazali su da je pri potpuno razvijenom požaru *HRR* moguće smanjiti i do 80%, pa je realističko očekivanje da će ista količina primijenjenog vatrogasnog medija u fazi razvoja možda postići i bolji rezultat, jer je „predimenzionirana“ u odnosu na žarište (ovisno o primijenjenom sustavu i specifičnim okolnostima akcidenta). Prema Jönsson i Johnson [27], u Australiji se koristi veličina projektnog požara od 50 MW, što može značiti da se u obzir uzima učinkovitost deluge sustava raspršene vode, mada ta relacija nije dosad bila u cijelosti istražena. Isti autori navode da je upitno da li deluge sustav može pod kontrolu staviti požar koji je već dosegnuo 50 MW, pa je cilj vodu hitro izbaciti na požar dok je još malen, svakako ispod 10-20 MW, te time požar ograničiti na 20-30 MW.

Ako je došlo do akcidenta s vozilom koje prevozi veću količinu lako zapaljivih tekućina, bilo u transportnoj cisterni ili u vlastitom spremniku goriva, prolivena će se tekućina trenutno upaliti po čitavoj svojoj površini ako se u blizini nalazi odgovarajući izvor paljenja, McGrattan [278]. Nastali požar vrlo će se brzo proširiti na obližnje zapaljive površine povećavajući *HRR*, što će rezultirati potpuno razvijenim požarom u roku od nekoliko minuta. Ako su te površine dio većeg zapaljivog tereta HGV mase nekoliko tona, vjerojatno će nastati razvijeni požar takve snage da ga prosječna vatrogasna postrojba neće moći uspješno staviti pod kontrolu prije nego što sam dogori skoro do kraja. U takvoj bi situaciji FFFS hlađenjem žarišta i okolnih površina u inicijalnoj fazi mogao smanjiti intenzitet izgaranja i onemogućiti da požar lokve preraste u veliki nekontrolirani požar. Jasno je da odluku o primjeni FFFS u pojedinom tunelu treba sagledati i u vezi s karakteristikama nadležne vatrogasne postrojbe.

U tunelima s velikim prometnim opterećenje, u gradskim i drugim tunelima s velikim rizicima, ali i u slučajevima kada nadležna vatrogasna postrojba ima ograničeno ljudstvo i resurse, FFFS koji je u stanju pokriti razlijevanje lako zapaljivih tekućina sam se nameće kao optimalni izbor. Takav bi sustav u osnovi trebao biti projektiran i izveden barem tako da „kupi vrijeme“ do dolaska vatrogasne postrojbe, koje vrijeme mora uključiti vrijeme puta, razvoja snaga i opreme te izvjesnu rezervu. FFFS bi trebao ostati u funkciji sve dok zapovjednik akcidenta ne odluči da ga je bolje isključiti. Kao medij za gašenje trebalo bi koristiti film-forming pjenu (AFFF ili FFFP) i to svakako s otpornošću na polarne tekućine (AR), što bi jamčilo da se sustav može uspješno suprotstaviti požaru ili samo razlijevanju svake zapaljive tvari, da ne-polarna zapaljiva tekućina neće plutati na vodi i nastaviti gorjeti, da će se onemogućiti odavanje zapaljivih para koje bi se mogle upaliti na nekom drugom

mjestu u tunelu i da će od svih tih opasnosti biti osiguran i sustav odvodnje (kanalizacija). Ipak, neovisno o mogućnostima samog FFFS, optimalna požarna sigurnost može se postići jedino ako su i svi ostali sustavi tunela međusobno usklađeni i funkcionalni.

8.2 Neke dileme i kritička promišljanja

Tijekom izrade ove disertacije i studiranja nekoliko stotina referenci, autor na nekoliko pitanja nije uspio dobiti zadovoljavajući odgovor, a zbog financijskih i prostornih ograničenja nije bio u mogućnosti izvesti odgovarajuće eksperimente. Uz to je uočio i neke potencijalne nedosljednosti ili propuste u testovima i testnim izvještajima, odnosno u radovima putem kojih su ti rezultati publicirani, kao i u praksi zaštite od požara tunela.

Utjecaj eksperimenata u tunelu Ofenegg

Serija eksperimenata izvedena u tunelu Ofenegg 1965. godine, zaključci koji su iz nje izvedeni, te utjecaj koji su ti zaključci imali na sustave zaštite od požara u tunelima tijekom narednih godina (sve do danas), podrobno su prikazani u prethodnom tekstu disertacije. Analizom publiciranih podataka autor je došao do zaključka da su uvjeti eksperimenata bitno odudarali od onih koji su uobičajeni u normalnim suvremenim cestovnim tunelima. Ako se zanemari činjenica da su oblik i veličina poprečnog presjeka tunela Ofenegg znatno različiti od današnjih, nije moguće zanemariti činjenicu da je pri izgaranju većih tava benzina dovod zraka u tunelu bio bitno poddimenzioniran. To je za posljedicu imalo nepotpuno izgaranje i vjerojatno razvijanje koncentracije zapaljivih para u zraku do iznad donje granice zapaljivosti, što je na koncu rezultiralo eksplozijom za koju je kao krivac bio „optužen“ sprinkler sustav. Neprihvatljivim se doima i zaključak autora eksperimenata da je raspršena voda iz sprinkler sustava vrlo brzo ugasila požar, jer se mnogo vjerojatnijom čini pretpostavka da je nakon nekoliko minuta izgaranja sve gorivo (benzin) jednostavno izgorjelo ili isparilo.

Brzina rasta i vršna snaga požara klase A u tunelu

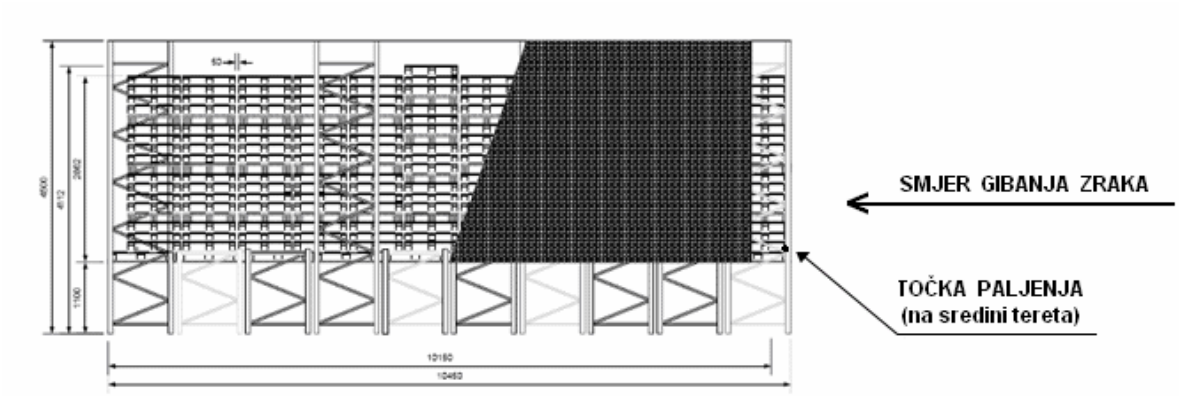
U nizu eksperimenata izvedenih u pravom mjerilu, od kojih je vjerojatno najpoznatija i nedvojbeno najutjecajnija bila serija od 4 velika testa izvedena u tunelu Runehamar godine 2003., dokazano je da se požar klase A može razviti gotovo jednako brzo kao požar klase B i da toplinska snaga takvog požara, sa žarištem koje je po masi približno ekvivalentno teretu jednog HGV (pri T1 cca 11 tona) može biti i do 200 MW. Za autora disertacije ta opasnost, tj. činjenica da se izgaranjem krutog goriva može dobiti praktički bilo koja toplinska snaga ako na raspolaganju ima dovoljno zraka nikada nije bila upitna, posebno ako je to gorivo u dovoljnoj količini prostorno razmješteno tako da je dobro ventilirano kroz masu. Ono što bi moglo biti upitno je veličina rizika[266], tj. vjerojatnost nastupa i brzina razvoja takvog požara. Činjenica je da se o smještaju, količini i vrsti potpale pri testovima[267] (inicijatora požara vozila ili žarišta klase A) najčešće ne izvještava u publiciranim radovima. Međutim, prema izvještaju Rijkwaterstaat [60], mjesto inicijacije testnog požara u odnosu na smjer strujanja

[266] Budući da se sve procjene rizika izrađuju na bazi statističkih podataka o pojedinim akcidentima i njihovim posljedicama, istu bi logiku trebalo slijediti i pri izvođenju eksperimenata. To znači da bi eksperimente trebalo izvoditi tako da simuliraju najvjerojatniji scenarij, a ne onaj koji je najopasniji (najneugodniji), ili barem to posebno naglasiti u izvještaju.

[267] Pri testovima s gorivom klase A, ono se uobičajeno pali tako da se ispod kolijevke od drva ili paleta postavi mala tava s manjom količinom lako zapaljivog tekućeg goriva (npr. heptan), pa se izgaranjem tekućeg goriva u trajanju od nekoliko minuta pali glavno gorivo klase A. Tako se prema EN 3-7 [33] testiraju npr. vatrogasni aparati.

zraka je od odlučujuće važnosti za daljnji razvoj požara, kako za brzinu rasta, tako i za njegovu vršnu toplinsku snagu. Iako je ova pojava zabilježena na osobnom vozilu, nema razloga vjerovati da ona ne bi imala jednak ili čak veći utjecaj i na razvoj požara HGV s teretom klase A. Uočeno je naime da se požar sporo razvija ako je iniciran na prednjem kraju osobnog vozila, a struja zraka dolazi sa stražnje strane vozila, kao što je to normalno pri zastoju vozila u tunelu s jednosmjernim prometom i uzdužnom ventilacijom, gdje se strujanje zraka usmjerava u smjeru kretanja vozila [60].

Pri testovima u Runehamar, scenarij je bio potpuno suprotan, tj. vrlo povoljan za brzi razvoj požara. Kao inicirajuće žarište glavnog požara korištene su 2 male kocke od poroznog vlaknastog materijala natopljenog heptanom, koje su bile smještene među najnižim drvenim paletama tereta na uzvjetrenoj strani tereta klase A, i to u blizini vertikalnog središnjeg "kanala" između slogova tereta HGV. Čitav teret nalazio se na nosivoj čeličnoj platformi visine 1,1 m, koja je simulirala poluprikolicu, Lönnermark i Ingason [63]. Nakon paljenja kocki, teret je zatvoren ceradom. Činjenica je da se normalno u stvarnosti na takvom mjestu teško može očekivati izvor paljenja dovoljan da upali palete ili namještaj. Da je izvor paljenja bio na nizvjetrenoj strani tereta, što bi bila pozicija koja je najbliža moguća motorskom prostoru, gdje se prema Rijkwaterstaat [60] nalazi uzrok 95% požara[268], mjesto izvora paljenja i teret bili bi tlocrtno razdvojeni nekoliko metara. Ako bi paljenje u motorskom prostoru izazvalo izlijevanje goruće zapaljive tekućine na kolnik, izvor paljenja tereta klase A bio bi požar lokve koja bi se uz to nalazila na 1,1 m niže od tereta HGV. Štoviše, strujanje zraka koji putem uzdužne ventilacije dolazi sa stražnje strane HGV, čija brzina je normalno takva da onemogući backlayering, odnosilo bi dimne plinove i skretalo plamenove od HGV prema naprijed, a ne prema teretu. To znači da bi razvoj požara bio signifikantno sporiji od zabilježenog, a vjerojatno i vršna *HRR*. Također je vrlo vjerojatno da bi s ugrađenim FFFS, uz pravovremenu detekciju i njegovo aktiviranje, širenje požara na teret HGV bilo u najmanju ruku značajno usporeno ako bi se koristila voda kao medij za gašenje, no ako bi se koristila pjena, vjerojatnije je očekivati da bi požar razlivene tekućine na tlu bio ugašen prije nego što bi uspio upaliti teret.



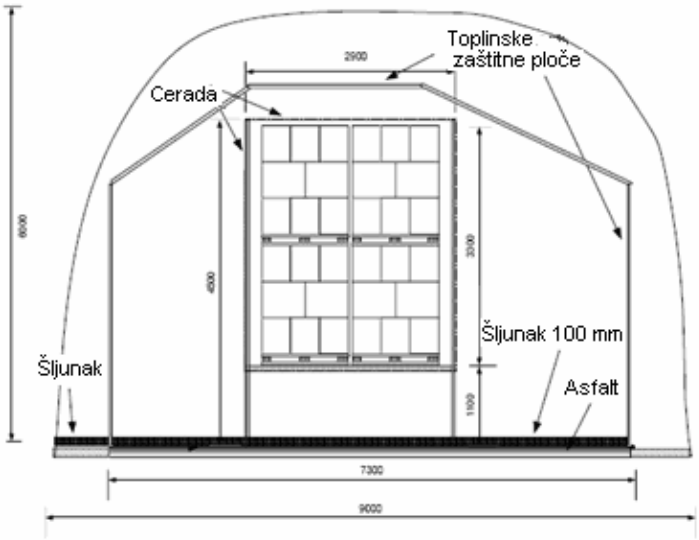
Slika 8.1. Raspored tereta HGV u testu T1 Runehamar s 10911 kg paleta, 72% mase drvenih, 18% mase plastičnih [63]

Ako bi se opisani scenarij dogodio u uvjetima kada inicijalni akcident čini sudar prednjeg dijela jednog HGV ili automobila sa stražnjim dijelom drugog HGV natovarenog teretom

[268] Ako je motorski prostor mjesto gdje započinje 95% požara, Rijkwaterstaat [60], bilo bi uputno istražiti učinak koji bi na širenje požara imala nepropusna pregrada s vatrootpornošću od 15-ak minuta koja bi taj prostor odvojila od kabine vozila. Takav pristup bio bi u skladu s principom požarnog zoniranja i pregrađivanja prostora, koji se normalno koriste npr. pri gradnji zgrada i brodova.

klase A, tada bi se goruća lokva mogla nalaziti ispod stražnjeg dijela tereta udarenog HGV. FFFS s vodom ponovno bi hladio zapaljive tvari na mjestu nastanka inicijalnog požara, a primjena pjene bi vjerojatno dovela do gašenja lokve. Imajući u vidu da se takvi, ali i ostali bitni utjecajni faktori pri svakom testnom projektu biraju samostalno, a da rezultati testova zatim značajno utječu na buduće standarde i preporuke, postavlja se pitanje: ne bi li bilo logično razviti jedan ili nekoliko standardnih reprezentativnih testova za požar u tunelu, na kojima bi se testirale sposobnosti i performanse različitih sustava za detekciju i gašenje požara zbog mogućnosti njihove međusobne naknadne usporedbe i odabira optimalne varijante zaštite?

Glede reprezentativnosti eksperimenata zbog utvrđivanja projektne *HRR* za požare klase A u pravom mjerilu, postavlja se i pitanje koliko je opravdano inicirati požar izgaranjem nekoliko litara benzina (česti slučaj) ispod nekoliko tona goriva klase A. Kako takav požar započinje u stvarnosti i da li bi uopće nastao bez malog inicirajućeg požara klase B? Ako ne bi, a izgleda da često ne bi, nije li dovoljno na vrijeme detektirati i ugasiti mali inicirajući požar klase B aktiviranjem stacionarnog sustava i tako riješiti problem?



Slika 8.2. Pogled straga na testnu maketu u tunelu Runehamar [63]

Slika 8.3. Maketa tereta HGV u testu T1 Runehamar, prije i nakon testa [279]

Slika 8.4. Maketa tereta HGV u testu T1 Runehamar, 5 min (lijevo) i 30 min (desno) nakon početka gorenja, Brekelmans i v.d. Bosch [279]

Požar goriva klase B i gašenje (voda ili pjena)

Za pogon motornih vozila normalno se koriste benzin ili diesel gorivo. Upaljivosti ovih dvaju goriva se međusobno bitno razlikuju. Benzin, s plamištem na oko -40 ^{0}C se pali vrlo lako, praktički u svakim temperaturnim uvjetima. Pare benzina, sa specifičnom gustoćom većom od specifične gustoće zraka, migriraju po površini kolnika normalno u smjeru strujanja zraka, mogu se lako upaliti na udaljenosti od nekoliko metara od lokve ili mjesta istjecanja, a gorenje će se trenutno prenijeti natrag do lokve. Diesel gorivo, s plamištem na oko 60 ^{0}C, pali se vrlo teško. Koncentracija para diesel goriva u zraku pri normalnim je temperaturama okoline vrlo niska, pa je za paljenje lokve diesel gorivo potrebno prethodno zagrijati najmanje do njegovog plamišta[269], tj. na najmanje 60 ^{0}C. Nakon što je izgaranja započelo, gorenje praktički trenutno zahvaća cijelu površinu lokve benzina, dok je to kod lokve diesel goriva proces koji može potrajati i desetak sekundi. Nakon što je gorenje zahvatilo čitavu površinu, nema bitnih razlika između izgaranja jednog i drugog goriva.

Ako se razmatra gašenje na otvorenom prostoru, treba navesti da je lokvu diesel goriva moguće ugasiti primjenom raspršene vode, posebno ako je voda raspršena u maglu. Naprotiv, lokvu benzina nije moguće ugasiti nikakvom primjenom vode ako je koncentracija kisika na bilo kojem dijeliću lokve viša od donje granice zapaljivosti.

U stvarnosti, praktički svako nanošenje raspršene vode na goruće tekuće ugljikovodike može poslužiti isključivo za njihovo djelomično hlađenje i za hlađenje okolnih objekata. Tekući ugljikovodici će uvijek ostati plutati na površini vode i nastaviti izgarati. Ako podloga na kojoj se nalazi lokva nije potpuno horizontalna, voda će prirodno otjecati prema nižoj geodetskoj visini, odnoseći na svojoj površini gorući ugljikovodik. Stoga se u dobroj vatrogasnoj praksi voda za hlađenje pri požaru tekućih ugljikovodika mora pažljivo koristiti, jer je u protivnom moguće da šteta bude veća od koristi. Jedini medij prikladan za gašenje požara veće količine zapaljive tekućine je pjena, što je vrlo dobro poznato u vatrogasnoj praksi u cijelome svijetu. Opasni objekti koji su možda najsličniji situaciji u tunelu sa zaustavljenim prometom su vjerojatno aerodromske piste, hangari za avione i pretakališta

[269] Autor disertacije prisustvovao je većem broju požarnih testova sa svrhom ispitivanja djelotvornosti vatrogasnih aparata s prahom i različitih vrsta pjena/pjenila. Ako je testno gorivo bilo čisto diesel gorivo ili ekstra-lako loživo ulje, bilo je ekstremno teško upaliti ga u tavi površine nekoliko m^2. Stoga se pri testovima u diesel gorivo redovito dodaje nekoliko litara benzina, kako bi se olakšalo njegovo paljenje.

tekućih goriva. Sva aerodromska vozila opremljena su za gašenje požara pjenom, hangari sadrže različite instalacije za gašenje pjenom[270], a pretakališta tekućih goriva redovito se štite instalacijom za nanošenje pjene, bilo instalacijom s deluge pjene ili monitorima.

U posljednje vrijeme u motorna se goriva dodaju različite tekućine koje su mahom polarnog karaktera (MTBE, etanol itd.), sa ciljem da se smanji zagađivanje okoliša i potrošnja fosilnih goriva. Povećana potrošnja tih tekućina dovela je i do njihovog povećanog transporta. Stoga se u tunelskim požarima može u budućnosti očekivati prisustvo takvih „reformuliranih" benzina, ali i čistih aditiva (npr. MTBE, etanol). Gašenje mješavina koje sadrže do 10% polarnih aditiva normalno je moguće izvesti konvencionalnim pjenama koje nisu otporne na alkohole, no za gašenje mješavina s 10 i više % polarnih (oksigeniranih) aditiva potrebno je primijeniti AR pjene, osim ako se neutralnim testom dokaže drugačije, EN 13565-2 [201] i NFPA 11[200]. Čiste polarne tekućine moguće je načelno ugasiti i tako da se one miješaju s vodom sve dok im koncentracija u mješavini ne padne toliko da izgaranje prestane, no gašenje požara u praksi normalno se ne oslanja na taj efekt kao prevladavajući. Opća je tendencija da se postotak polarnih aditiva u motornim benzinima postepeno povećava, prvenstveno iz ekoloških razloga (bio-etanol).

U osobnom kontaktu s predstavnicima proizvođača pojedinih sustava vodene magle, autor je dobio informacije da dodavanje pjenila u vodu nije potrebno, tj. da pri testovima nije dokazan poboljšani efekt. Ipak, činjenica je da požarni testovi ne simuliraju stvarnost u potpunosti jer se tekuće gorivo nalazi u tavi ograničene površine, dok se u stvarnosti ono obično razlijeva slobodno po kolniku. U stvarnosti nikada nisu unaprijed poznati veličina i oblik lokve, smjer otjecanje, dubina goriva, posljedice koje će goruća tekućina izazvati u kanalizacijskom sustavu (da li će se gorenje nastaviti, da li će se pojavljivati male deflagracije oblaka para) itd.

Imajući iznesene činjenice u vidu, nejasno je zbog čega se u stacionarnim sustavima za zaštitu većine tunela ne primjenjuju pjene. One bi po mogućnosti trebale biti otporne na polarne tekućine (AR), tako da imaju zajamčenu učinkovitost na svim zapaljivim tekućinama, a da su istodobno učinkovite i na požarima klase A.

Pjenilo u vatrogasnim vozilima i u hidrantskim nišama

Petelin i sur. [179] navode da bi specijalno tunelsko vatrogasno vozilo na sebi trebalo imati rezervoar s 2500 L vode i rezervoar s 200 L pjenila (doziranje 3-6%), te monitor kapaciteta 2000 L/min. Uz pretpostavku da se koristi 3% pjenilo, količina od 200 L pjenila omogućava djelovanje vatrogasaca s 2 mlaznice od po 400 L/min u trajanju od 8,33 minuta, dok je najdulje vrijeme rada s monitorom svega 3,33 minute[271]. U slučaju da se koristi 6% pjenilo, vremena rada se prepolavljaju. EN 13565-2 [201] i NFPA 11 [200] preporučuju da količina pjenila na početku akcije treba osigurati minimalno vrijeme gašenja od 15 min., što znači da će s raspoloživom količinom pjenila biti teško ugasiti veći požar zapaljive tekućine. Uz ispravno projektiranu hidrantsku mrežu, voda za gašenje u ovom slučaju neće predstavljati kritični faktor, budući da je minimalni protok od 1200 L/ min osiguran tijekom 60 minuta.

[270] EN 13565-2 [201] jasno definira filozofiju sustava pjene za hangare aviona kroz vrijeme od 30 s za postizanje kontrole i 60 s za postizanje potpunog gašenje požara nakon što se dosegne puni kapacitet dobave pjene.
[271] NFPA 11 [200] za gašenje požara lokve prolivenih ugljikovodika na pretakalištima preporučuje minimalnu gustoću primjene od 6,5 L/m^2 min za P i FP pjene, te 4,1 L/m^2 min za film-forming pjene, sve uz vrijeme gašenja ≥ 15 min.

Iz niza osobnih komunikacija, autoru je poznato da vatrogasna vozila koja koriste profesionalni vatrogasci zaposleni kod operatora tunela u Hrvatskoj u pravilu imaju po 2 rezervoara za pjenilo volumena od po 200 L. Iz nepoznatih razloga, jedan od rezervoara sadrži pjenilo za klasu požara A, a drugi pjenilo za klasu požara B[272]. U odnosu na gašenje požara zapaljivih tekućina, njihove su mogućnosti gašenja jednake onima koje su spomenute u prethodnom odlomku, budući da niti jedno pjenilo klase A nije certificirano za gašenje požara klase B (tekućina).

Operatori tunela u RH često u hidrantske niše postavljaju pjenilo. Normalno je to bačvica s 25 L pjenila. Kao što je već navedeno, vrlo je malo vjerojatno da bi bilo koji prosječni korisnik tunela u situaciji požara mogao biti u stanju koristiti vatrogasni cijev C52 s mlaznicom i vodom. Još je manje vjerojatno da bi bio u stanju koristiti pjenu za gašenje, jer to zahtijeva posebna znanja. No čak i u tom slučaju, 25 L pjenila sa standardnom mlaznicom od 200 L/min omogućilo bi mu djelovanje u trajanju od svega 4,16 minuta (3% pjenilo). Ako bi to isto pjenilo koristili vatrogasci s mlaznicom od 400 L/min, vrijeme djelovanja smanjuje se na polovicu. To znači da pjenilo u hidrantskom ormariću neće biti on koristi ni automobilistima u tunelu, niti intervencijskim vatrogascima.

Iz ovih je primjera vidljivo da su i tunelska vozila i hidrantske niše pjenilom opremljeni potpuno nedostatno, jer niti jedan standard, norma ili preporuka ne predviđaju primjenu kraću od 15 minuta za požar prolivene tekućine. S druge strane, rezervoar vode na vozilu mogao bi biti manji od 2500 L, jer se potrebna količina vode može dobiti iz hidrantske mreže. Razlika bi se naravno mogla iskoristiti za povećanje zalihe pjenila na vozilima do potrebne količine.

Klasični deluge ili vodena magla

Kao što je već prethodno navedeno, niža potrošnja vode u sustavima vodene magle često se navodi kao njihova posebna prednost. U prethodnim je razmatranjima ocijenjeno da je zbog niske cijene vode taj argument od vrlo malog značaja, ali da se prednosti u cijeni sustava vodene magle možda mogu realizirati kroz nižu cijenu opreme takvih sustava (manje pumpe, manje dimenzije cijevi i armatura, manji rezervoar na strani dovoda vode, manja potreba za odvodnjom itd.). Suprotno uštedama zbog smanjenja cjevovoda i opreme, valja navesti da se, prvenstveno zbog malih dimenzija otvora na mlaznicama za vodenu maglu, u takve sustave ugrađuju elementi od znatno skupljih materijala (npr. cijevi iz nehrđajućeg čelika). Nadalje, viši radni tlakovi traže deblje stijenke cijevi, armatura, kućišta pumpi itd., a mlaznice za vodenu maglu su kompliciranije i skuplje kako od klasičnih (neaspiracijskih), tako i od aspiracijskih sprinklera deluge sustava. Iz toga se može zaključiti da samo smanjivanje dimenzija ne mora nužno dovesti do niže cijene sustava, već je za svaki poseban slučaj potrebno napraviti analizu troškova.

Razmatrajući pitanje cijene koštanja FFFS, niti u jednom se objavljenom radu na temu FFFS u tunelima ne spominje da bi se napajanje klasičnog deluge sustava moglo izvesti putem zajedničkog cjevovoda za hidrantsku mrežu i deluge. Prema autoru dostupnim podacima, hidrantski vod postavlja se u svaki tunel koji bi potencijalno mogao biti štićen stacionarnim sustavom. Odgovarajućim povećanjem dimenzija dovodnog hidrantskog cjevovoda bilo bi

[272] Na više puta postavljeno pitanje o svrhovitosti korištenja pjenila klase A, odgovor koji je autor dobio od osoba zaduženih za zaštitu od požara operatora autocesta svodio se redovito na to da su takva vozila dobivena od proizvođača. Budući da su požari B klase znatno opasniji, da se s pjenom B-klase može uspješno gasiti požar goriva A- klase, a obratno ne, ovo se ne može smatrati stručno ili tehnički utemeljenim odgovorom.

moguće putem njega napajati i klasični deluge sustav. Na taj bi se način cijena klasičnog deluge sustava mogla značajno smanjiti, jer cijena cijevi normalno predstavlja relativno mali trošak u odnosu na ugradnju čitave instalacije. Osim toga, u slučaju da procjena rizika pokaže potrebu za sustavom pjene, taj bi se sustav mogao realizirati na 2 načina:

- Tako da centralno mješalište pjene napaja čitav kombinirani hidrantsko-deluge sustav. U tom bi slučaju iz svih hidrantskih priključaka uvijek istjecala samo otopina pjene (ako se mješalište uključi u rad). Ako bi se koristilo film-forming pjenilo, iz svake ručne sprej mlaznice priključene na hidrantsku mrežu mogla bi se dobiti pjena, što bi samo poboljšalo učinak gašenja. Ako pjenilo nije film forming tipa, efekt bi bio mokra (prodorna) voda, što bi također poboljšalo učinak gašenja na požarima klase A.
- Ako bi se miješanje pjenila s vodom izvelo po grupama deluge zona, bilo bi moguće iz stacionarnog deluge sustava dobiti pjenu, a iz hidrantskih priključaka samo vodu (bez pjenila).

U sustavima vodene magle takvo kombiniranje ne bi bilo moguće zbog mnogo viših radnih tlakova, zbog zahtjeva za mnogo čišćom vodom i s time povezanim izborom materijala, kao i zbog malih raspoloživih protoka vode. Konačna odluka o izboru trebala bi se temeljiti na procjeni rizika i nižoj ukupnoj cijeni instalacije kroz procjenu dugotrajnog korištenja stacionarnog sustava (npr. 30 ili više godina). Autor disertacije nema namjeru zagovarati klasični deluge sustav u odnosu na sustav vodene magle niti obratno, mada smatra da je klasični deluge sustav znatno jednostavniji za primjenu, da na njega manje utječu brzina strujanja zraka i eventualne neočekivane akcidentne situacije, te da ima manje zahtjeve glede održavanja. Osim toga, klasični deluge sustav dozvoljava lakše dodavanje pjenila u vodu i neusporedivo je više iskušan u praksi. Za svrhu konačnog izbora sustava bilo bi potrebno dizajnirati i provesti seriju testiranja u pravom mjerilu, s time da se unaprijed odredi koji se učinci žele postići u pojedinim scenarijima.

Mogućnost ušteda na drugim sustavima zaštite

Nekoliko katastrofalnih požara u europskim transalpskim tunelima pokazalo je da postoje granice učinkovitosti požarnih tehnologija koje se najčešće promoviraju i koriste u Europi i u Sjevernoj Americi, koje se sastoje od visoke razine strukturne vatrootpornosti tunela (pasivna zaštita), ventilacijskih sustava, zaštićenih izlaza za slučaj nužde, detekcije požara i planskog odgovora vatrogasnih i spasilačkih ekipa. Oslanjanje na vatrootpornost konstrukcije i na ventilaciju pokazalo se kao nedostatno. Međunarodni konsenzus o prednostima aktivne zaštite od požara u tunelima posljednjih se nekoliko godina započeo mijenjati od protivljenja toj ideji prema opreznoj podršci. Nova izdanja najutjecajnijih svjetskih standarda, PIARC i NFPA, sada sadrže pozitivne napomene o FFFS, ali još uvijek ne donose preporuke za njihovu ugradnju. Priznaje se da FFFS mogu ograničiti veličinu požara, tako da sustavi ventilacije mogu odgovoriti na postavljene zahtjeve, te omogućiti korisnicima sigurno napuštanje tunela, a vatrogascima pružiti mogućnost da se približe žarištu i ugase ga. FFFS mogu ograničiti oštećenja na tunelu, tako da se čak i nakon požara nekoliko HGV tunel neće zatvoriti dulje od nekoliko dana. Dok je dosad gotovo univerzalno bio prihvaćen stav da poprečna i polupoprečna ventilacija mogu pružiti veću razinu sigurnosti u slučaju požara, pojavljuju se i mišljenja da bi uzdužna ventilacija u kombinaciji s FFFS mogla uz manji ukupni trošak pružiti jednaku ili višu sigurnost. Iako je konsenzus o korisnosti FFFS načelno postignut, još se diskutira o tome kada i koji FFFS je prikladan, do kojeg će stupnja on umanjiti razvoj požara i vršnu *HRR*, te do koje će razine ograničiti maksimalne temperature površine i armature betona i time umanjiti zahtjeve u odnosu na pasivnu zaštitu konstrukcije tunela. Iako je u svijetu već više od 100 tunela opremljeno FFFS, iznenađuje da se i dalje raspravlja o

troškovima njihove ugradnje i tekućim operativnim troškovima. Unatoč svemu tome, u većini europskih zemalja već se normalno razmatra pitanje ugradnje FFFS u nove tunele, te mogućnosti za podizanje razine sigurnosti u postojećim tunelima ugradnjom FFFS.

Ipak, jedna od kočnica za širu primjenu FFFS u tunelima Europe mogla bi biti relativna krutost Europske direktive [75], koja donosi niz preskriptivnih zahtjeva i ne pruža mnogo mogućnosti za dokazivanje performansi o jednakoj razini sigurnosti postignutoj na način koji je različit od onoga traženog direktivom. Ipak, u točki 1.2.1 Aneksa I navodi se da se … „ograničena odstupanja od tih zahtjeva mogu dozvoliti pod uvjetom da se uspješno dovrši postupak kojim zemlje članice ili Upravni organ Komisiji šalju informacije o:

- predviđenim ograničenim odstupanjima,
- neophodnim razlozima koji potkrjepljuju predviđena ograničena odstupanja,
- alternativnim mjerama za ograničenje rizika koje će se koristiti ili ojačati sa ciljem da se osigura najmanje ekvivalentna razina sigurnosti, uključujući i dokaz u obliku analize relevantnih rizika.

Nakon toga, Komisija zahtjeve dostavlja zemljama članicama, pa ako niti one ni Komisija nemaju primjedbi, ograničeno odstupanje će biti dozvoljeno“ …

Ugradnja FFFS mogla bi predstavljati jeftinije, a moguće i bolje rješenje u nekim graničnim slučajevima spomenutim u Europskoj direktivi [75], kao što su npr.:

- U točki 2.5.2 Aneksa I traži se da se u postojećim dvosmjernim tunelima duljine > 1500 m s prometnim opterećenjem > 2000 vozila po traku, ali bez zaustavnog traka, ocijeni izvedivost i učinkovitost primjene ugibališta.
- U točki 2.9.3 Aneksa I traži se da se u tunelima s dvosmjernim ili zagušenim jednosmjernim prometom može dozvoliti uzdužna ventilacija samo ako analiza rizika prema čl. 13 pokaže da je ona prihvatljiva i/ili ako su poduzete specifične mjere, kao što je prikladno upravljanje prometom, kraći razmaci između izlaza za slučaj nužde, odsisavanje dima po sekcijama[273].

Opravdano se dalje mogu postaviti pitanja za koja se prema zahtjevima i duhu Europske direktive [75] teško može očekivati da će biti odobrena kao ograničena odstupanja u slučaju da se u tunel ugradi FFFS:

- Ima li razloga insistirati na polupoprečnoj ili poprečnoj ventilaciji?
- Da li kanali za zrak, njihovi nosači i ventilatori moraju biti vatrootporni i koliko?
- Na koju *HRR* i koju količinu dima treba projektirati sustave ventilacije?
- Po kojoj će se krivulji određivati potrebna vatrootpornost za tunelsku konstrukciju i u kojem trajanju?
- Je li je uopće potrebno koristiti beton s visokom vatrootpornošću ili dodavati vatrootporne obloge na zidove tunela?

[273] Zahtjevi za poprečnom ili polupoprečnom ventilacijom u dugim tunelima bez FFFS mogu značajno povećati troškove gradnje zbog povećanja poprečnog presjeka tunela, Jönsson i Johnson [27]. Kada bi Europska direktiva to dozvolila, analiza rizika u postojećim tunelima s dvosmjernim prometom mogla bi pokazati da je umjesto gradnje dodatne cijevi zadovoljavajuću razinu sigurnost moguće postići ugradnjom FFFS, što bi bitno reduciralo troškove. Najbliži primjer takvog tunela je Učka, gdje se gradnja druge tunelske cijevi planira uglavnom zbog smanjenja rizika i usklađivanja sa zahtjevima Direktive [75].

8.3 Konceptualni prijedlog FFFS

U prethodnom tekstu prezentirani su i diskutirani mnogobrojni rezultati dosadašnjih istraživanja tunelskih požara; modelskih, u kontroliranim uvjetima i onih drugih, baziranih na stvarnim akcidentima. Na temelju njih, kao i na temelju vlastitog kritičkog promišljanja problema sprječavanja katastrofalnog požara u tunelu, autor smatra da je potrebno prezentirati vlastiti prijedlog optimalnog FFFS. Konceptualni prijedlog FFFS bazira se na sljedećim tezama, Regent [212, 213]:

1. Katastrofalni požar u tunelu pretežno je požar klase B (zapaljive tekućine)

Svaki požar koji zahvati cestovno motorno vozilo (ako se ne ugasi unutar prvih nekoliko minuta), čak i ako je izazvan kvarom na električnoj instalaciji ili nekim drugim uzrokom, nužno se mora razviti u požar klase B, jer će u njemu izgarati tekuće pogonsko gorivo, maziva i hidrauličke tekućine. Pri visokoj temperaturi koja u zatvorenom prostoru tunela nastaje nakon svega nekoliko minuta, gori i boja na karoseriji, tale se i teku termoplastični umjetni materijali, a zatim i asfalt na kolniku, što sve upućuje prema klasi B. Katastrofalni požar u tunelu može biti požar cisterne s gorivom ili većeg broja putničkih i teretnih vozila s različitim tovarom. U tunelu Mt. Blanc gorio je margarin u HGV (rastaljeni margarin je zapaljiva tekućina), a u Tauern-tunelu HGV s bojama i lakovima. Katastrofalni požari u tunelima uključuju i goriva klase A, ali bez goriva klase B oni bi vrlo rijetko prerasli u katastrofalni požar.

2. S postojećom strukturom protupožarne zaštite u cestovnim tunelima („ventilacijski" pristup) nemoguće je spriječiti razvoj požara u katastrofalni ako su uvjeti za takav razvoj povoljni.

Postojeći sustav i struktura (organizacijska i tehnička, vatrogasne snage i sustavi, aktivna i pasivna zaštita) ne poštuju princip da požar treba ugasiti, ili barem staviti pod kontrolu, dok je mali. Ako izbije požar u tunelu, na raspolaganju prvim prisutnim osobama (vozači i putnici) stoje samo vatrogasni aparati. Tipična veličina im je 6 kg, prah je ABC, i može se očekivati da će se na svakih 150 m udaljenosti (novi tuneli), odnosno 250 m (stari tuneli), naći po 2 aparata. Osoba koja želi pokušati gašenje u prosjeku mora prijeći 75-125 m do aparata, naći aparat, izvaditi ga iz ležišta, vratiti se natrag i aktivirati ga. Uz brzinu gibanja od 1,5 m/s, za to je potrebno najmanje 2-3 minute (100-167 s samo za put), a požar je dotle možda već eskalirao izvan mogućnosti gašenja aparatom, posebno ako je zahvatio zapaljive tekućine. Ako gašenje aparatom nije uspješno, sljedeća aktivnost gašenja započinje tek dolaskom vatrogasaca, jer statistički gledano, kao što je već obrazloženo, nije realno očekivati da bi netko od prisutnih znao i mogao započeti gasiti požar korištenjem hidrantske mreže. Vrijeme do dolaska vatrogasaca i početka gašenja (osim ako su stacionirani neposredno uz portale tunela) tipično je najmanje 15 min i to pod uvjetom da su im okolnosti na putu sklone. Čak ako su u pitanju vatrogasci stacionirani uz portale tunela, teško je zamisliti da bi požar mogli započeti gasiti unutar manje od 5 ili 6 minuta od oglašavanja alarma. Problemi pristupa vatrogasaca do žarišta i razvoja snaga već su prethodno opisani. U međuvremenu se požar razvija tipičnom brzinom od 10-20 MW/min.

3. Kada u katastrofalnom požaru tunela ne bi sudjelovali ljudi, štete u tunelima i u prometu koji je s njima povezan, te vrijeme popravka nisu više prihvatljivi.

Ako se zamisli hipotetska situacija da u tunelu pri nastupu katastrofalnog požara uopće nema ljudi (ili da su se trenutno evakuirali), tj. da u vozilima neposredno nakon izbijanja požara

više nema vozača i putnika, zaključak je da tada nema niti ljudskih žrtava. Posljedice koje ostaju su sljedeće:

- materijalna šteta na tunelu i na vozilima bila bi jednaka,
- vrijeme sanacije (prekida prometa) i trošak bili bi jednaki.

Sada se mogu postaviti hipotetska pitanja: da li bi takav scenarij, kada i ne bi bilo ljudskih žrtava, danas bio prihvatljiv? Da li je uz današnji (a posebno budući) intenzitet prometa i zagušenost prometnih pravaca moguće prihvatiti sanaciju tunela u trajanju od nekoliko mjeseci ili više? Nije li jeftinije preventivno poduzeti učinkovite mjere uz razuman trošak pa da se takvi slučajevi u budućnosti izbjegnu?

Ako se isključi ugradnja FFFS, zahvati koji se tradicionalno predlažu i planiraju uglavnom su:

- Korištenje specijalnih toplinski otpornih betona ili dodavanje vatrootpornih obloga u tunelima, što povećava njihovu požarnu otpornost i smanjuje štete na konstrukciji. Iako su ovo vrlo skupi zahvati, oni praktički ne utječu na događaje pri katastrofalnom požaru u tunelu, ali se smanjuju štete na konstrukciji tunela i omogućava brži povrat u prometnu funkciju.
- Pojačavanje/preuređenje ventilacije ili zamjena uzdužne ventilacije poprečnom ili polupoprečnom uz povećanje vatrootpornosti kanala za zrak, ventilatora i prateće opreme. Ovime se donekle povećava sigurnost unesrećenih ljudi i intervencijskog osoblja, no pojačana ventilacija u pravilu doprinosi povećanju vršnog intenziteta i brzine porasta požara (u ovisnosti o odabranom sustavu). I ovi zahvati su vrlo skupi.
- Izgradnja druge tunelske cijevi (za izbjegavanje dvosmjernog prometa i posljedično smanjenje vjerojatnosti akcidenta) ili servisne tunelske cijevi (za spašavanje ljudi i olakšavanje/ubrzavanje intervencije), izgradnja sigurnosnih skloništa (niša) u tunelu i/ili njihovo povezivanje sa sigurnom zonom ili izlazom iz tunela u vanjski prostor, izgradnja poprečnih spojeva između tunelskih cijevi i sl. Ovi zahvati mogu poboljšati sigurnost ljudi i smanjiti vjerojatnost nastanka katastrofalnog požara (samo druga cijev), ali (osim druge cijevi) nemaju signifikantan utjecaj na materijalnu štetu niti nefunkcionalnost tunela ako požar ipak nastane.

4. S novom "poboljšanom zaštitom" tradicionalnog „ventilacijskog" pristupa neće se spriječiti katastrofalni požar tunela, a potrošiti će se ogromna količina novca i vremena.

Osim gore opisanih zahvata, daljnje mogućnosti u okviru tradicionalnog pristupa su izgradnja i/ili rekonstrukcija sustava za detekciju požara po cijeloj duljini tunela, sustava video nadzora u vidljivom i/ili IC dijelu optičkog spektra itd., što sve može biti korisno. Ipak, niti jedan od tih zahvata neće pridonijeti tome da se požar započne gasiti signifikantno ranije nego do tada, što znači da se i dalje očekuje da ga pogase vatrogasci nakon nekoliko sati ili nekoliko dana teškog i opasnog rada.

5. Prijedlog rješenja – FFFS - Deluge sustav sa sprinklerima/mlaznicama pjena/voda.

Po uvjerenju autora, deluge sustav, klasični (s velikim kapljicama) ili mist sustav (s vodenom maglom), predstavlja jedinu mogućnost za dovoljno brzi odgovor na požar u tunelu koji ima predispozicije da bi se mogao razviti u katastrofalni. Opcije medija za gašenje su voda i pjena, s time da je vodu moguće primijeniti u oba spomenuta sustava, dok je primjena pjene

vjerojatno moguća samo s klasičnim deluge sustavom[274]. Imajući u vidu da se požar lako zapaljivih tekućina (klasa B) na otvorenom prostoru vrlo teško može ugasiti samo primjenom vode (teško je postići inertiziranje atmosfere), da dodavanje pjenila pospješuje prodornost vode u tvari klase A i znatno poboljšava vatrogasne sposobnosti vode, da se sustavi s pjenom uspješno koriste na mnogim mjestima koja su vrlo slična cestovnim tunelima, autor disertacije se opredijelio za prikaz konceptualnog FFFS kao klasičnog deluge sustava s pjenom, smatrajući ga vjerojatno optimalnim sustavom za gašenje/supresiju. Ipak, to ni na koji način ne isključuje mogućnost dokazavanja performansi sustava vodene magle na ispitnom poligonu i njegovih možebitnih prednosti u odnosu na predloženi sustav.

Konceptualni prijedlog optimalne zaštite tunela od katastrofalnog požara bazira se na već obrazloženom „vatrogasnom" pristupu i sljedećim postavkama:

- Deluge sustav s pjenom, primijenjenom putem otvorenih sprinklera ili putem aspiracijskih fiksnih mlaznica danas je jedini dostupan i dovoljno iskušani sustav[275] vatrogasnih uređaja (FFFS) koji može spriječiti i vjerojatno ugasiti potencijalno katastrofalni požar u cestovnom tunelu uz prihvatljivi trošak.
- Koristiti treba AR film-forming pjene, tj. AR-AFFF ili AR-FFFP. Razlozi za ovaj izbor izneseni su u prethodnim razmatranjima.
- Mlaznice/sprinkleri prisutni su po čitavoj površini (duljini i širini) tunela, a s gašenjem mogu i trebaju započeti praktički odmah (unutar cca 1 minute po detekciji). Jedna mlaznica/sprinkler može površinu od približno 12 m^2 (cca 3,5x3,5 m) ravnomjerno pokriti jednolikim slojem pjene.
- Deluge sustav gašenja sastoji se od deluge sekcija duljine cca 20-30 m[276]. Svaka sekcija se aktivira zasebno. Normalno se aktiviraju 2 sekcije istodobno, tj. sekcija u kojoj je detektiran požar i prva uzvjetrena sekcija uz nju[277].
- Za slučaj požar ne bude ugašen, ovakav sustav može ga supresirati i držati pod kontrolom dulje vrijeme (nekoliko desetaka minuta). U međuvremenu će doći vatrogasci i ugasiti mali požar.
- Požar koji ostaje mali i koji ne prerasta u katastrofalni nije problem. U takvom slučaju nije potrebna posebna vatrozaštita betonske cijevi tunela, količina dima je neusporedivo manja (ne treba pojačavati/rekonstruirati sustav ventilacije), a spašavanje unesrećenih ne predstavlja više nerješivi problem, čak i uz rjeđi raspored sigurnosnih izlaza. Vatrogasci do žarišta mogu doći za onoliko vremena koliko je potrebno za vožnju i ne moraju putem rješavati mnogobrojne prije opisane probleme.
- Tipični razvijeni požar cisterne s gorivom ili velikog HGV razvija približno 200 MW topline i 300 m^3/s dima. Za slučaj da ga mlaznice/sprinkleri s pjenom ne ugase nego samo supresiraju, realno se može očekivati požar snage unutar 5–10 MW i 15–30 m^3/s dima, tj. veličina požara u kojem sudjeluju 1-2 osobna vozila.
- Shema sustava prikazana na slici 8.5. Uporabom minimalnih projektnih parametara sustava prema NFPA 16 [249] (gustoća primjene 6,5 L/m^2min, vrijeme primjene ≥ 10 minuta) dolazi se do prihvatljivog protoka otopine od cca 1000 L/min po zoni, a

[274] Za sustave „magle pjene" ne postoje standardi niti norme. Prema najboljem znanju autora, sustavi magle nisu do sada uspješno ispitani s dodatkom pjenila u vodu, vjerojatno stoga što su kapljice u sustavu magle presitne da bi stvorile učinkovite „pahulje" pjene.

[275] NFPA 16 [249] već se godinama primijenjuje za projektiranje i izvođenje fiksnih instalacija za zaštitu od požara u objektima kao što su pretakališta nafte i derivata, procesne površine petrokemijskih pogona, garaže, avionski hangari i sl.

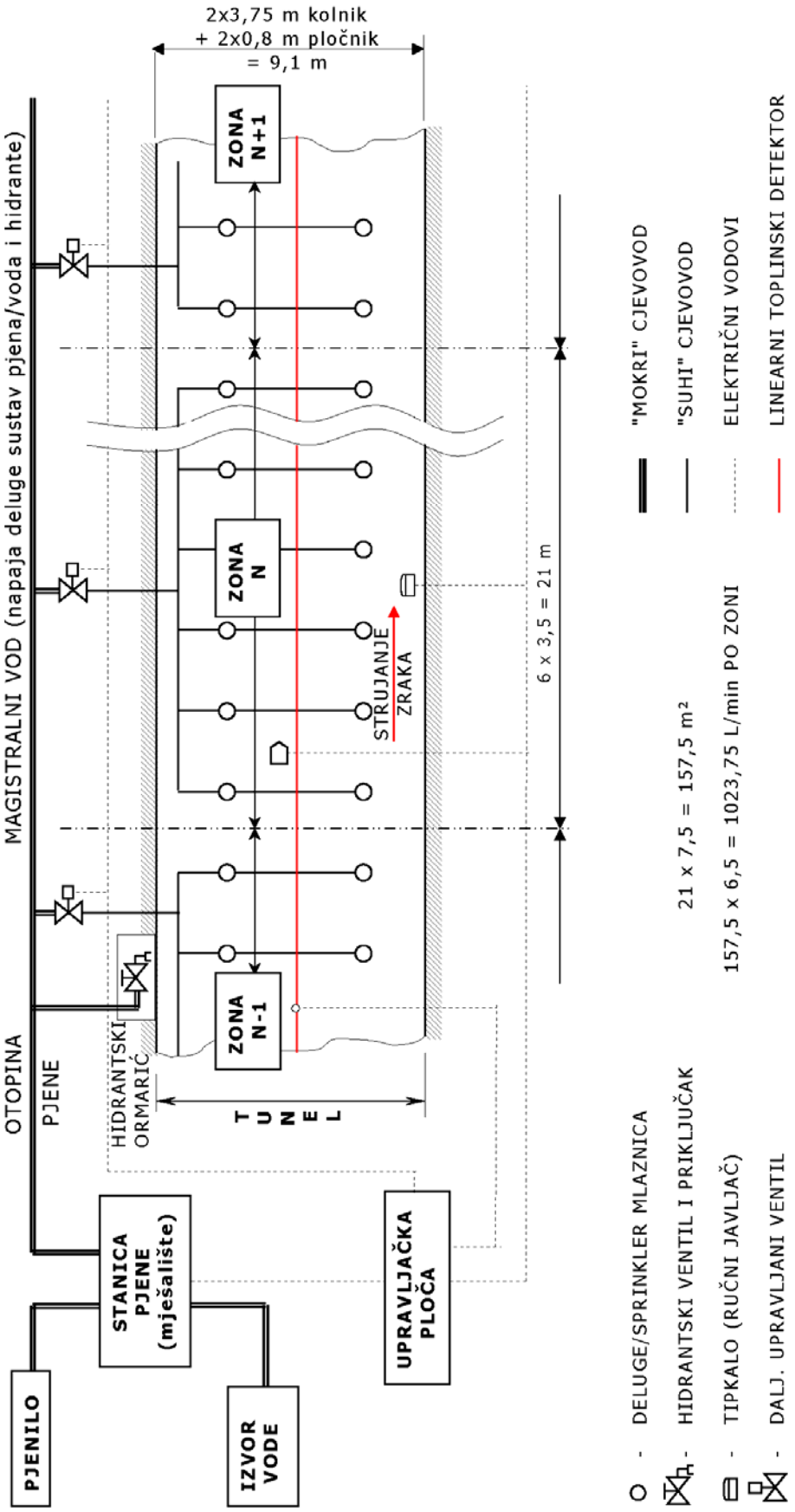
[276] IMO MSC/Circ. 914 [282] za zaštitu na ro-ro brodovima koji prevoze HGV određuje duljinu sekcija od 20-24 m.

[277] Budući da se dimni plinovi šire u smjeru strujanja zraka, razumno je očekivati da je žarište koje je izazvalo aktiviranje toplinskog detektora nešto uzvjetreno od pozicije/stacionaža na kojoj je detektor aktiviran.

trajanje ispuštanja treba biti jednako vremenu dolaska vatrogasaca uvećanom za najmanje 10 minuta.
- Deluge sustav s pjenom moguće je objediniti s (obveznim) hidrantskim sustavom u jednu instalaciju, što može pridonijeti troškovnoj efikasnosti cjelokupnog sustava.
- Upravljanje radom deluge sustava s pjenom može biti ručno, na bazi preciznih podataka koje kontrolni centar tunela dobiva o točnom mjestu žarišta putem sustava detekcije i vatrodojave, ili pak automatsko (vjerojatno sa zadrškom koja omogućava da se procijeni situacija i donese odluka o prekidu ili dozvoli za automatsko aktiviranje).

Standard NFPA 16 [249] nije pisan specifično za primjenu na tunele i ne daje detaljne upute za ovaj slučaj primjene. Stoga ostaje niz pitanja na koja je odgovore moguće dobiti jedino putem daljnjih istraživanja, kako bi rezultat bila što viša razina zaštite uz što manji trošak. Najvažnija takva pitanja su:
- Gustoća primjene pjene (L/m^2min), razmak i raspored spinklera/mlaznica. Načelno gledano, gustoća bi mogla biti viša ili niža od one preporučene u [249], sve u ovisnosti o ciljevima koje FFFS treba postići (gašenje, supresija ili kontrola požara) i u kojem vremenu.
- Vrijeme djelovanja pjene. U slučaju duljih tunela, napose tamo gdje vatrogasci nisu locirani neposredno uz portale, ovo vrijeme može biti potrebno produžiti na 30 ili više minuta. Vrijeme djelovanja utječe na veličinu zalihe pjenila i potrebnu količinu vode.
- Veličina "deluge zone" i broj zona koje se istodobno aktiviraju.
- Vrsta pjenila/pjene. Zbog ekoloških zahtjeva optimalno pjenilo vjerojatno će biti s proteinskom bazom, pa bi pjenilo tipa AR-FFFP za 3-3% doziranje možda bilo današnji optimum[278]. Pjenilo mora biti u stanju dati vrhunsku kvalitetu pjene uz prisutnost dima i povišene temperature zraka.
- Korištenje premiks otopine ili doziranje pjenila u vodu tek nakon aktiviranja sustava; za čitav tunel putem jednog ili nekoliko mješališta?
- Smještaj i dimenzioniranje cjevovoda kao i raspored ventila s gledišta sigurnosti i cijene izvedbe i održavanja.
- Način spajanja s hidrantskom mrežom.
- Sustav odvodnje otopine pjene i prolivenog goriva u odnosu na moguće scenarije akcidenta, količinu prolivenog goriva, količinu otopine pjene itd., te prilagodba kanalizacijskog sustava.

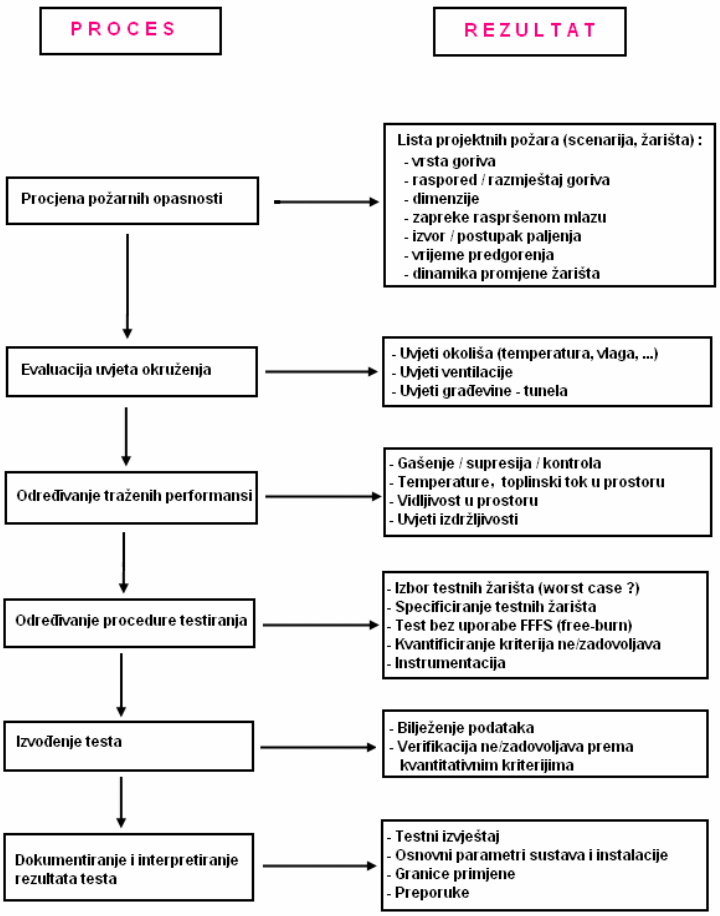
[278] Već nekoliko godina na tržištu postoje i tzv. „fluorine free" pjenila, čije vatrogasne performanse su još uvijek niže od onih klasičnih pjenila. Eventualna ekološka prednost novih „fluorine free" pjenila u odnosu na klasična pjenila sa sadržajem telomera trebala bi proizaći iz LCA procjene (Life Cycle Assessment).



Slika 8.5 Konceptualna shema deluge sustava pjene

8.4 Konceptualni prijedlog požarnog testa FFFS sustava u tunelu

Konceptualni prijedlog daje osnovne značajke i smjernice za izradu detaljne specifikacije takvog testa, uz pomoć kojeg bi bilo moguće međusobno usporediti vatrogasne i općenito zaštitne performanse različitih izvedbi FFFS u tunelu u smislu brzine djelovanja, prvenstveno redukcije snage požara i temperature, te ukupne efikasnosti sustava. Iako bi specifičnosti nekih tunela i/ili prometnih pravaca mogle zahtijevati razvoj nekoliko varijanti testa, autor zbog jednostavnosti, ograničenja troška i mogućnosti međusobne komparacije sustava predlaže uspostavljanje samo jednog jedinstvenog testa. Na taj bi se način omogućilo izvođenje objektivne komparacije svih sustava koji se predlažu za zaštitu tunela od požara: klasičnog deluge sustava (s vodom ili s pjenom), visokotlačnog i niskotlačnog sustava vodene magle (s ili bez dodatka aditiva), hibridnog sustava vodene magle itd. Standardna procedura za testiranje učinkovitosti pojedinih FFFS za gašenje/supresiju/kontrolu požara postaje time alat uz čiju je pomoć moguće eksperimentalno utvrditi i međusobno usporediti vatrogasne i općenito zaštitne performanse sustava raspršene vode, vodene magle i pjene, odnosno bilo kojeg drugog sustava na reprezentativnom požarnom scenariju. Detaljna razrada modelskog žarišta i čitave procedure testiranja, mjerenja, prikupljanja podataka, instrumentacije itd. zahtijevala bi poseban elaborat i nije predmet ovoga rada, no ovakav prijedlog može poslužiti kao polazna osnova za izradu odgovarajuće norme ili preporuke (ISO, EN ili PIARC) u kojoj bi se definirali potrebni detalji. Za razvoj detaljnije ispitne procedure može poslužiti uputa iz FprCEN/TS 14972 [247], koja je prikazana na slici 8.6 (s modifikacijama). Detekcija požara nije uključena u proceduru.

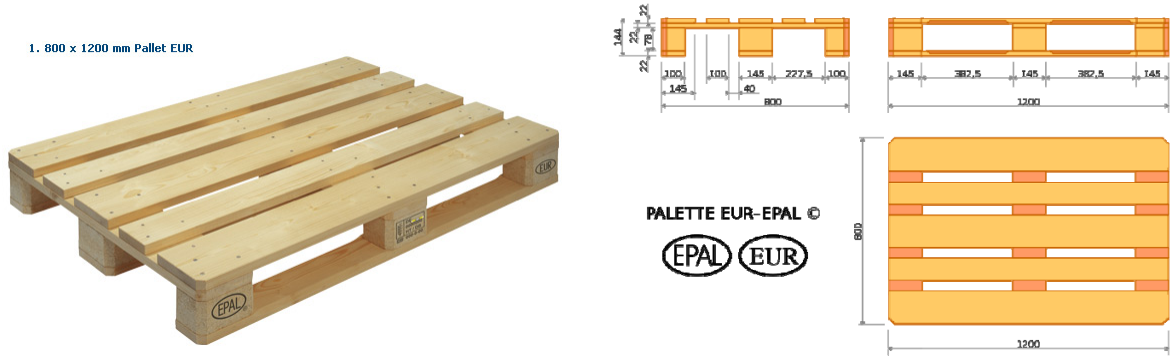


Slika 8.6 Proces razvoja procedure testiranja, prema [236], s modifikacijama

Za izradu konceptualnog prijedloga testnog žarišta i procedure testiranja korištena su iskustva prethodno izvedenih testova i postojeće upute za testiranje FFFS, napose sljedeći dokumenti:

- Izvještaj o požarnim testovima: Sheppard [284], glede izvođenja požarnog testa sprinkler sustava na gomilama drvenih paleta.
- Standard ANSI/FM [285], glede požarnih performansi plastičnih paleta u odnosu na drvene palete, procedure izvođenja testa gašenja sprinklerima u pravoj veličini i ukupnog trajanja testa.
- 2nd Benelux tunel 2001.: Project 2002 [60], Lemaire i sur. [61] te Lemaire i Kenyon [62], glede sastava tekućeg goriva 60% n-heptana i 40% toluena kao i pozicioniranja inicijalnog paljenja na nizvjetrenu stranu ložišta.
- Runehamar tunel 2003.: Lönnermark i Ingason [63], Ingason i Lönnermark [64], glede testnog goriva A-klase (standardne Euro-palete, u kombinacija od cca 85% drvenih i cca 15% plastičnih), načina slaganja paleta te pri procjeni snage i toplinskog kapaciteta žarišta.
- Izvještaj o testovima gašenja za potrebe ro-ro brodova: Arvidson [106, 236] glede dimenzija i načina slaganja testnog „paketa“ goriva u jednu cjelinu, postavljanja FFFS i izvođenja testa.
- Uputa IMO MSC/Circ. 914 [282] i IMO MSC/Circ. 1272 [283] za ro-ro brodove: glede načina kombiniranja A i B klase goriva u jednom testu, odnosno krutog i tekućeg goriva u jednu cjelinu, vremena predgorenja (2,5 minute), dimenzija tave za tekuće gorivo i inicijalno paljenje, dimenzija „požarne zone“ i žarišta, karakteristika cerade itd.

Predloženo požarno žarište najvećim je dijelom sastavljeno od krutih goriva klase A (drvene palete, cca 84%), klase B (polietilen, termoplast, talište na 120-130 ^{0}C, cca 16%) i relativno male količine tekućeg goriva (60% n-heptan, 40% toluen, komercijalne kvalitete). Kruto gorivo u obliku standardnih Euro paleta simulira tipični teret HGV, a tekuće gorivo simulira gorivo i/ili mazivo HGV proliveno po kolniku i ujedno služi za potpalu glavnog tereta. Glavni teret sastavljen je od standardnih Euro paleta, prikazanih na slici 8.6.



Slika 8.7 Standardna Euro-paleta 1200 x 800 mm [281]

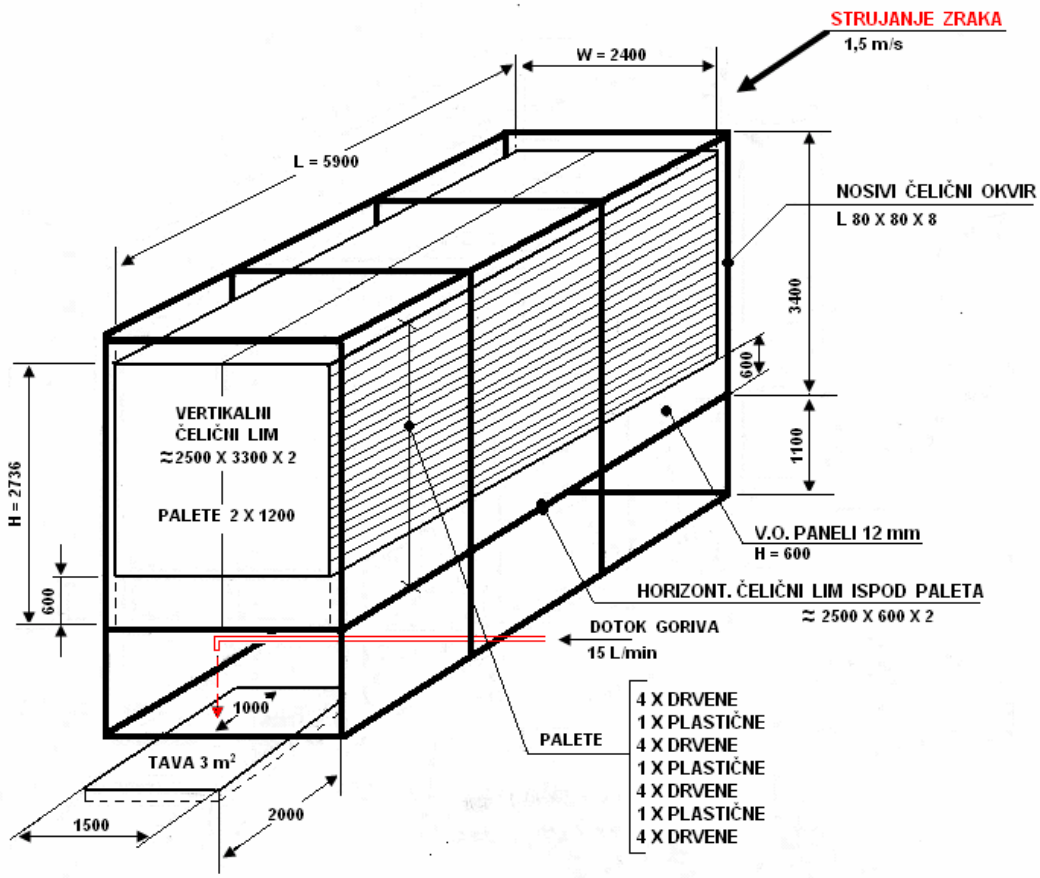
Osnovne karakteristike predloženog požarnog žarišta su sljedeće:

- Dimenzije tereta: L = 7 paleta x 800 mm + 6 međurazmaka x 50 mm = 5900 mm
  W = 2 palete x 1200 mm = 2400 mm
  H = 19 paleta x 144 mm = 2736 mm

- Broj paleta: drvenih 16 slojeva x 2 x 7 = 224 (84,2%)
  plastičnih 3 sloja x 2 x 7 = 42 (15,8%)
  ukupno 19 slojeva x 2 x 7 = 266 (100%)

- Slaganje paleta: odozdo prema gore postavljena su 4 x 4 sloja drvenih paleta, a između njih je 3 x 1 sloj PE paleta, tj. nakon svaka 4 sloja drvenih paleta dolazi po jedan sloj plastičnih.

- Masa paleta: 24 kg x 266 = 6384 kg
- Vlažnost drva: 14% ± 2%



Slika 8.8 Konceptualni prijedlog požarnog tunelskog testa FFFS za sprječavanje katastrofalnog požara

- Nosiva čelična konstrukcija izrađena je od čeličnih kutnika cca 80 x 80 x 8 mm ili od kvadratnih čeličnih cijevi sličnih dimenzija. Na prednjoj strani simuliranog tereta je vertikalni čelični lim dimenzija 2500 x 3300 mm debljine 2 mm, koji simulira stražnju stijenku kabine HGV. Ispod simuliranog tereta (paleta) je horizontalni čelični lim dimenzija cca 2500 x 6000 mm debljine 2 mm, koji simulira dno sanduka HGV.

- „Sanduk“ HGV simuliraju vatrootporne panel ploče visine 600 mm i debljine 12 mm, koje zatvaraju teret sa svih strana neposredno iznad dna sanduka.

- Teret (palete) su sa svih strana zatvorene plastificiranom poliesterskom ceradom (gorivom) mase 600 ± 50 g/m^2, tj. cerada je napeta preko čeličnog kostura i učvršćena za „sanduk“.

- Tava je površine 3 m^2, dimenzija 1500 x 2000 x 100 mm, izrađena od čeličnog lima debljine 2 mm. Tava se puni sa 60 L mješavine n-heptan/toluen, što daje dubinu goriva od 20 mm na vodenoj bazi za izravnanje od 10 mm. Dotok goriva od 15 L/min (5 mm/min) s visine od 1 m simulira njegovo curenje iz HGV na tlo, a količinom približno nadoknađuje izgorjelo gorivo[279]. Za onemogućavanje prelijevanja goriva treba poduzeti potrebne mjere[280].

- Vrijeme aktiviranja FFFS: 2,5 minute[281] nakon paljenja.

- Očekivane snage požara su: tava 6-7 MW, glavni teret HGV cca 120 MW (bez gašenja) uz sadržaj topline tereta od cca 140 GJ.

- Brzina strujanja zraka: 1,5-2 m/s[282].

Test gašenja/supresije/kontrole požara u tunelu trebalo bi izvesti u tunelu tipične konfiguracije i dimenzija[283], a smještaj mlaznica i cjelokupnog sustava FFFS prema uputama proizvođača/ isporučitelja sustava.

Opis testa:
Nakon paljenja goriva u tavi (bakljom), izgaranje se nastavlja prirodno i postepeno zahvaća palete. Nakon 2,5 minuta započinje istjecanje medija za gašenje iz mlaznica FFFS i nastavlja se do gašenja žarišta, a najdulje 30 minuta. Voda nakupljena ispod tekućeg goriva odvodi se po potrebi. Dokumentacija se sastoji od kontinuiranog video snimanja i fotografiranja te opažanja testnog događanja i štete uzrokovane požarom. Podaci koji se mjerenje i bilježe putem kompjuteriziranog sustava prikupljanja podataka su: tlak i protok vode na mlaznicama, vrijeme rada FFFS, detalji odvođenja vode iz tave, temperature zraka/plina uz strop i na različitim visinama i udaljenostima od žarišta, toplinsko zračenje, brzine zraka, koncentracije O_2, CO_2, CO, vlažnost zraka, vidljivost, meteo-podaci (po potrebi) i mjerenje vlažnosti drva paleta (prethodno).

U svrhu ocjenjivanja rezultata testa, moguće su načelno 2 varijante: uspostavljanje kriterija ne/prolaznosti i rangiranje rezultata pojedinih sustava bez definiranih kriterija prihvatljivosti.

[279] Iskustvena brzina regresije tekućih ugljikovodika pri požaru je cca 5 mm/min.
[280] U tavi visine 100 mm inicijalno ostaje 70 mm slobodne visine iznad površine goriva. Uz pretpostavljenu gustoću primjene vode od 10 L/m^2min, razina goriva u tavi doseći će rub tave nakon 14 minuta primjene vode (polovica tave je pokrivena teretom, a visina goriva od 20 mm je približno konstantna). Za slučaj primjene pjene, realistički je očekivati gašenje goriva u roku od nekoliko minuta od početka primjene. U protivnom će se dio pjene početi prelijevati preko ruba tave. Odvođenje vode/otopine sakupljene ispod goriva trebalo bi započeti najkasnije u trenutku kada gornji rub goriva dosegne rub tave ako se želi spriječiti razlijevanje goriva po tlu. U realnoj situaciji u tunelu, proliveno tekuće gorivo se razlijeva i širi nekontrolirano po tlu, tj. površina lokve koja gori može rasti, a njen oblik je nepredvidljiv. Nastavak gorenja tekućine u kanalizacijskom sustavu može pridonijeti širenju požara na okolna zaustavljena vozila, pa je bitno onemogućiti ga, što je u stvarnosti moguće postići jedino primjenom film forming pjene.
[281] Predložene 2,5 minute odgode aktiviranja FFFS sastoje se od sljedećih perioda: 1 minuta za detekciju požara, 30 s za odlučivanja operatora o ne/prekidanju automatskog aktiviranja FFFS i 1 minuta do početka istjecanja medija za gašenja.
[282] Pretpostavlja se da će operatori tunela prihvatiti i primijeniti rezultate novih istraživanja koja su dokazala da je za stvaranje optimalnih uvjeta u slučaju požara u tunelu brzinu strujanja zraka potrebno dovesti u ove granice.
[283] Za Hrvatsku bi tipični mogli biti tuneli potkovastog presjeka, površine poprečnog presjeka 55-60 m^2 (tunel Učka površina 54 m^2, visina 6,85 m, širina kolnika 9,1 m; tunel Tuhobić površina 56,5 m^2, visina 6,86-7,1 m, širina kolnika 9,27-9,9 m).

8.4.1 Daljnji razvoj

Kao što je već prethodno spomenuto, daljnji razvoj koji bi uključivao izradu prikladnog računalnog modela za analizu interakcije između reprezentativnog tunelskog potencijalno katastrofalnog požara i FFFS za gašenje/supresiju/kontrolu, a posebno izvođenje odgovarajućih eksperimenata, zahtijevalo bi iznimno velike troškove, koji su vjerojatno izvan mogućnosti istraživača pojedine zemlje. Ipak, mogućnost za realizaciju takvog projekta na europskoj razini otvara se kroz projekt COST IFER[284] [286]. U COST 284/09 [287] se u okviru aktivne zaštite od požara posebno navodi razvijanje troškovno učinkovitih, održivih i inovativnih metoda za podizanje požarne sigurnosti u postojećim tunelima[285]. Razumno je pretpostaviti da bi se razvoj požarnog tunelskog testa FFFS za sprječavanje katastrofalnog požara mogao vrlo dobro uklopiti u program ovog projekta i ispuniti jednu od njegovih bitnih zadaća.

[284] Projekt COST (European Cooperation in Science and Technology) IFER (Integrated Fire Engineering and Response) u svojem programu djelovanja navodi: The main objective of this Action is to break down the barrier preventing the exchange of information and experience between researchers from different disciplines on the one hand and between academia and practitioners (including fire-fighters) on the other hand. Thanks to the exchange of international experience, ideas and state-of-the-art on fire risk concepts and assessment methods, the Action aims at providing concrete applications of the performance-based fire safety design methods to practitioners and at introducing the latest research into standards for fire design.

[285] **Active fire protection**: Projects cover subjects such as:
- fire suppression;
- intelligent modular multi-sensor networked false-alarm-free fire detection systems;
- cost-effective, sustainable and innovative upgrading methods for fire safety in existing tunnels;
- development of fire-safety-related simulation programs;
- fire risk evaluation of European cultural heritage;
- fire protection of steel structures using water sprinklers,

Structural fire engineering: In the very important area of transportation, special attention is being given to:
- fire safety of tunnels;
- concrete rail track panels for tunnel safety;
- safety in common transportation infrastructure.

9. Zaključak

Tuneli predstavljaju bitan element cestovne infrastrukture, posebice mreže autocesta, pa dulji prekidi prometa u njima nisu prihvatljivi suvremenoj privredi niti društvu u cjelini. Isto tako nisu prihvatljive ljudske žrtve, koje je moguće izbjeći primjenom suvremenih tehničkih dostignuća uz razumne troškove. Tijekom posljednjih 50-ak godina u tunelima su se dogodili mnogobrojni akcidenti koji su uključivali požar. Lista takvih akcidenata s najtežim posljedicama prikazana je u opsežnoj tablici, u kojoj su dati i bitni podaci o tim akcidentima. Niz katastrofalnih požara u Europi koji su se dogodili u nedavnoj prošlosti bio je poticaj za niz istraživačkih projekata izvedenih od strane većeg broja europskih istraživačkih i ekspertnih organizacija. Kao osnova za ovu disertaciju iskorišteni su podaci prikupljeni pri tim eksperimentima, podaci iz drugih eksperimenata izvedenih u svijetu kao i podaci o stvarnim požarnim akcidentima. Znanstveni doprinos ove disertacije ogleda se u tome da je autor na jednome mjestu sakupio mnoštvo javno dostupnih podataka o akcidentima u cestovnim tunelima iz čitavog svijeta, posebno požarima, i obradio ih kroz multidisciplinarni pristup tehničkoj sigurnosti. Pri analizi podataka i generiranju zaključaka na originalan su način korišteni ne samo principi tehničke termodinamike, nego isto tako i znanstveni principi i metodologija različitih disciplina struke sigurnosti i zaštite. Kao posebno važan princip ističe se redoslijed prioriteta pri zaštiti općenito, koji traži da se opasnosti primarno uklone ili barem umanje na izvoru, a da se zatim kao sredstvo nižeg prioriteta koristi ograničavanje širenja opasnosti od izvora i na koncu prekinu odnosno „oslabe“ putovi širenja opasnosti u okoliš. U stvarnosti se naravno često koristi kombinacija spomenutih načina uklanjanja/smanjivanja opasnosti i rizika.

Uspoređivanjem podataka iz različitih testova i požarnih akcidenata, autor je došao do zaključaka (iznesenih i ocijenjenih prema najboljem znanju) koje vidi kao svoj konkretan znanstveni doprinos:

- Tradicionalni „ventilacijski“ pristup zaštiti od požara ne omogućava pravovremeni početak gašenja u svrhu onemogućavanja razvoja požara prema katastrofalnom ishodu, budući da vatrogasna intervencija mora započeti unutar nekoliko prvih minuta.
- Bez stacionarnog sustava za gašenje/supresiju/kontrolu požara teško je spriječiti razvoj požara prema katastrofi ako su uvjeti za takav razvoj pogodni. Iako se danas dobar dio svjetske „tunelske zajednice“ postepeno i načelno priklanja ovome stavu, autor je radove u kojima je to argumentirano branio objavio još 2000. i 2001. godine, kada su svi relevantni svjetski propisi, norme i preporuke bili izrazito protiv FFFS. Ipak, još i danas većina njih ograničava se na korištenje vode, ne uviđajući da u svakom velikom tunelskom požaru izgara znatna količina zapaljivih tekućina i da je daleko najopasniji požar tekućine kojeg, ako se radi o lako zapaljivoj tekućini (npr. benzin), nije moguće ugasiti bez primjene pjene u poluotvorenom prostoru tunela. Originalani su prijedlozi i obrazloženja razloga zbog kojih pjena mora biti AR i film forming tipa te da je za napajanje klasičnog deluge sustava pjene i hidrantske mreže moguće koristiti samo jedan cijevni sustav. Prezentirani prijedlog FFFS s pjenom bazira se na sličnim sustavima koji se koriste za zaštitu od požara pretakališta tekućih goriva i procesnih površina, ali ne i za zaštitu tunela.
- Eksperimentima u RH dokazano je da je smanjenjem brzine zraka ispod 1,5 m/s moguće uspostaviti restratifikaciju dima, dok je u drugim radovima potvrđeno da se zbog ohlađivanja dima uzrokovanog djelovanjem FFFS smanjuje uzgonska sila dima,

a time i potrebna kritična brzina za onemogućavanje backlayeringa. To implicira da je prije puštanja FFFS u rad moguće smanjiti brzinu strujanja zraka i uspostaviti stratifikaciju istodobno s radom FFFS. Time se otklanja bojazan „tunelske zajednice" da bi voda ili pjena ispuštena iz mlaznica postavljenim pod svodom tunela mogla uništiti stratifikaciju dima i tako stvoriti letalne uvjete u tunelu, a podupire ugradnja FFFS koju zagovara autor.

- Vatrogasna služba u većini tunela na raspolaganju nema dovoljan protok i zalihu vode za gašenje ako se hidrantska mreža dimenzionira prema uobičajenim kriterijima, preporukama i standardima. Iako su ovaj nedostatak neki autori već prije uočili i ta činjenica nije posve nepoznata vatrogascima, do sada nema publiciranih radova u kojima se dokazuje da ništa manji problem nije bitno nedovoljna količina pjenila u tunelskim vatrogasnim vozilima, da pjenilo u hidrantskim ormarićima nema stvarnu primjenu i da korisnici tunela najvjerojatnije neće biti sposobni koristiti hidrantske izlaze za gašenje. Uz to, početak vatrogasne akcije, posebno ako vatrogasne snage nisu stacionirane neposredno uz portale tunela, u pravilu će biti prespor za gašenje požara prije nego što taj uđe u fazu razvijenog požara.
- Neki od možda najutjecajnijih svjetskih požarnih testova (npr. Ofenegg i Runehamar) nisu bili izvedeni potpuno objektivno i uz dovoljnu dozu kritičnosti. Dok su neki nedostaci zaključaka autora testova u Offenegu već prije uočeni, do danas niti u jednom objavljenom radu nije istaknuto da su izrazito velike vršne snage požara i vrlo brzi porast toplinske snage dobiveni u iznimno utjecajnom eksperimentu (Runehamar, 2003. godine) s A klasom požara zabilježeni uz uvjete koji su favorizirali brzi razvoj požara. Iako je slična pojava uočena pri eksperimentima u 2nd Benelux tunelu godine 2001., ona nikada nije bila povezana s rezultatima eksperimenata u Runehamaru. Uvjeti postavljeni pri testu u Runehamaru mogu se načelno usporediti s uvjetima u tzv. „eruptivnom požaru" pri požaru raslinja na otvorenom prostoru, jer je gorenje bilo inicirano na najnižoj točki uzvjetrene strane simuliranog tereta HGV, na mjestu na kojem to nije vjerojatno očekivati. Primjenom tako dobivenih pokazatelja na projektne uvjete tunela neopravdano se statistički gledano povećavaju procijenjeni rizici i posljedično trošak mjera za njihovo ublažavanje.
- Rezultate mjerenja učinkovitosti pojedinih FFFS koji potječu od velike većine testova gašenja/supresije/ kontrole požara nije moguće međusobno usporediti, jer su izvedeni u različitim uvjetima, s različitim žarištima i procedurama. Kao rješenje, autor je dao originalni prijedlog za unificiranje požarnih žarišta i procedure testiranja u jedan jedinstveni test, što može poslužiti kao osnova za izradu odgovarajuće norme. Na taj bi način bilo moguće na reprezentativnom požarnom scenariju HGV u tunelu jasno izmjeriti i ocijeniti performanse bilo kojeg FFFS i iskoristiti ih prema kriteriju ne/prihvatljivosti ili kriteriju rangiranja.
- Kruti zahtjevi nove Europske direktive o sigurnosti tunela vjerojatno će zbog favoriziranja preskriptivnih rješenja umjesto rješenja baziranih na performansama i neopravdanog zapostavljanja FFFS dovesti do ogromnih troškova koji će dati suboptimalne rezultata u sigurnosti. Ovaj zaključak nije posve nov, ali u svjetlu iznesene analize dobiva dodatnu potvrdu.

Imajući u vidu sve iznesene činjenice, očigledno je da se nameće potreba za daljnjim istraživanjima pitanja zaštite od požara u tunelima, kako bi se kroz rezultate bazirane na dokazanim znanstvenim spoznajama projektantima, izvođačima i operatorima tunela predložila jeftinija ali dovoljno pouzdana sigurnosna rješenja, a korisnicima tunela pružio viši stupanj sigurnosti u prometu bez neopravdano visokih troškova za društvo u kojem žive. Autor je predložio da se ova istraživanja uključe u europski projekt COST IFER.

An Analysis of the Measures for Prevention of Catastrophic Fire in Road Tunnels

Extended Abstract

This thesis has been divided into nine chapters: *Introduction; Review of the Past Research of Tunnel Fires and the Subject of Research; European Projects, European Directive and Comparison with the Other Relevant Standards and Recommendations; Dangerous Events in Tunnels; Event Scenarios; Impact of Technical Measures to Risk Scenarios; Fire Service Scenarios in Case of Tunnel Accident; Discussion and Comments; Conclusion.*

In the *Introduction* chapter, it has been explained why road tunnels present an essential part of the traffic infrastructure. Major accidents in tunnels can cause the interruption of traffic on important national and international routes lasting for months and even years causing the damages to the economy which can reach many millions and even billions of Euros. In modern society, in spite of the political orientation to the environmentally more acceptable alternative methods of transport, like railway and water transport, the actual data show that road transport has become absolutely dominant. However, the importance of road tunnels is not restricted to the economic reasons only. The reasons for building a tunnel may and do include environmental considerations in polluted areas and requirement to increase the transport capacity of road infrastructure in busy city centres. A table with the main details of 33 most important fire accidents in road tunnels has been presented to illustrate the importance of finding a solution for better management of tunnel fires in future. A fact well known to the "tunnel community" has been pointed out: there has been practically no major tunnel fire without the involvement of one or more HGV and without spillage of a considerable amount of liquid hydrocarbons.

In the 2nd chapter, *Review of the Past Research of Tunnel Fires and Subject of Research*, the most important experiments for better understanding of the phenomenon of tunnel fires and their results have been presented: starting from Ofenegg (1965), through Zwenberg, PWRI Japan, EUREKA Firetun, MTFVTP USA, 2nd Benelux tunnel and Runehamar (2003). Some of the results have been critically scrutinized, with the conclusion that the interpretation of the results of the experiment by the authors has not always been scientifically impeccable. Fire extinguishing/suppression experiments in Japan between 1963-1985 have shortly been presented, as these have been the basis for the introduction of stationary firefighting systems in long road tunnels in Japan from 1963 on, resulting in more than 80 such systems by the year 2000. Although scale modelling can be successfully used for resolving many technical problems, modelling the extinguishing of fire in a tunnel appears not to give reliable results applicable to practical problems. In this chapter, the main goals of this research work have been presented. Perhaps the most interesting contribution of this thesis was to disclose the difference between the traditional "ventilation approach" and the new "firefighting approach" to the problem of better management of tunnel fires.

The 3rd chapter, *European Projects, European Directive and Comparison with the Other Relevant Standards and Recommendations*, starts with the fact that trans-European road network is extremely important for the European society, but that the most devastating tunnel fires in the recent past happened just in Europe. This was the reason for carrying out 8

European research projects devoted to fire safety of road tunnels in the preceding decade. One of the results was the introduction of a new Directive of the European Parliament and of the Council on minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network. Although the costs of the implementation of the EU Directive have been estimated to between 2,6-6,3 billion Euros, some of the requirements of the Directive appear to be too prescriptive, which might result in sub-optimal expenditure of the funds available. In an extensive table, the main safety requirements of the EU Directive, NFPA Standard 502, PIARC recommendations and the Croatian Ordinance on the minimum safety requirements in road tunnels have been compared. Particular attention has been given to the requirements on hydrant mains and the requirements of 8 individual countries have been presented, compared and critically commented. Similarly, the requirements of 3 (only) existing national documents for the stationary firefighting system have been presented and compared, with the particular attention to the experience in Japan. The conclusion that the world "tunnel community" has for many years been oriented to the "ventilation approach" has been supported by the fact that 6 presented national requirements for fire resistance of tunnel ventilation fans are very demanding, reflecting the strategy of slow reaction to fire.

In the 4th chapter, *Dangerous Events in Tunnels*, dangerous events (fire, toxic substance release, explosion) have been conceptually presented. In modern risk analysis using ALARP principle, all the risks are divided into the zones of negligible, tolerable and intolerable risk. While negligible risks can normally be neglected, intolerable risks are not acceptable at all, but tolerable risks must be decreased to as low as reasonably acceptable level. As major risks in tunnels are connected to the transport of dangerous goods through the tunnels, most frequent risk scenarios have been "standardized" on international level, by selecting and defining 13 most probable risks. Based on this classification, tunnels have been divided into 5 risk categories allowing various risk transport vehicles to use individual tunnels.

In the 5th chapter, *Event Scenarios*, dangerous events (fire, toxic substance release, explosion) have been analysed into greater detail. Main attention has been devoted to fire events. In ventilation conditions and combustion in tunnels the achievable fire power (HRR) with various ventilation air velocities and various fuels (solid, liquid) have been presented. Fire development with subsequent fire stages has been analysed including linear, quadratic and exponential growth modelling. The details of all applicable standard fire temperature design curves have been presented, as the design of many fire safety features is normally based on one of them. Perhaps the most influential parameter of fire, heat radiation, is one of the governing factors in tenability conditions for tunnel users and emergency forces. This has been presented form various viewing angles. Heat release rate is mainly dependant on the type and number of vehicles burning, while with HGV fire, the goods transported become the decisive factor in fire development and peak HRR. The event tree is one of the most useful tools in risk assessment. An example of the event tree with petrol spill scenario and propane spill scenario has been included. Arguably the most dangerous fire/explosion scenarios in a tunnel are BLEVE and VCE. Such a scenario has been analysed based on generally accepted empirical relations and their comparison with an actual BLEVE event has shown a possibility of devastating result in any road tunnel. The impact of the release of toxic substances has been presented on the generally accepted toxic data bases. It has been shown that the risk level from the viewpoint of tunnel users is extremely high.

The 6th chapter, *Impact of Technical Measures to Risk Scenarios*, has been concentrated on the relationship between various technical features in a tunnel, fire power and the rate of fire growth. Although classic approach in managing tunnel fires has been the increase of

ventilation air velocity in order to remove toxic smoke from the tunnel and enhance the chances of survival of tunnel users, more recent research results have proven that increased air velocity entails negative implications through much faster development of fire. One of the most influential factors, which has not received due attention so far, is the relative position of the ignition point to the main body of burning fuel and the air stream direction. Through the analysis of the 3 most devastating recent tunnel fires in Europe it has been found out that even the best tunnel ventilation system can easily be overcome by a major fire. Other influential factors in fire spread, particularly with liquid fuel, can be the spread of fire through the sewer system and the inclination of road surface. Risk scenarios and firefighting strategy with solid fuel (class A) and liquid fuel (class B) can be very different. While A class fuel can be extinguished/suppressed/controlled by the application of plain water, it is nearly impossible to extinguish a liquid fuel fire without the application of foam. Various parameters of foam use have been discussed, and the application of AR film forming foam proposed as the most flexible and efficient agent for both polar and regular flammable liquids. Stationary firefighting/suppression/control systems have increased their popularity in Europe and in the USA during the last couple of years. While Japan and Australia have experienced favourable results with classic sprinkler/deluge systems, European tunnels have mainly been provided by water mist systems. The reasons for this appear to include a degree of commercial interests of the major mist system and technology providers. While each of these systems (water spray, water mist) has certain dis/advantages, several recent test experiments have shown the advantages of the classic and simpler water spray. Although the application of foam has not received particular popularity so far, several test results indicate exceptional efficiency of foam spray systems. Perhaps the best proof of the efficiency of stationary firefighting systems has been a fire accident in Burnley Tunnel in Melbourne in 2007. This big multi-vehicle accident in an extremely busy city tunnel during the rush hour has not developed into a disaster, but has remained within the limits of the initial event without any further victims. If no stationary system has been installed, mobile systems, used by firefighters remain as the first and last means of tackling a fire. Comparison of the minimum requirements of water supply for various vehicle fires with the flow of hydrant water prescribed in the regulations has revealed the fact that in case of multi HGV fire accident firefighters will not have access to the sufficient quantity of water. The situation with foam concentrate supply is very similar. Both facts are further complicated with probably slow response of fire service because of the long approach to the fire.

In the 7th chapter, *Fire Service Scenarios in Case of Tunnel Accident*, conceptual scenarios of the operation of fire service with various fuels have been analysed. Tunnel fires in comparison to the standard structural fires require considerably increased efforts from the fire service, with higher degree of uncertainty of success. In Croatia, the problem of timely arrival of firefighters to the tunnel accidents has partially been resolved by the employment of nearly 200 professional firefighters by the tunnel operators, positioned at the tunnel portals. While this solution has greatly improved the chances of success in case of a fire, substantial increase of the operating costs could not be avoided. However, the size of fire (*HRR*) that an average fire service can successfully put down has not been changed, and has remained in the region of between 20 and 30 MW.

The 8th chapter *Discussion and Conclusion* deals with the interaction of various safety and in particular fire safety measures, both preventive and repressive, pointing out that an instantaneous attention and tackling of a potentially major fire is crucial if a catastrophic course of events is to be avoided. The instantaneous reaction to a fire event can be realized only through a FFFS, with the second best option of having a proprietary fire service station

positioned in the immediate vicinity of the tunnel portals. In the second part if this chapter, titled *Dilemmas and critical consideration*, several issues have been discussed: the influence of Ofenegg experiments and Runehamar 2003 experiments to the resulting apprehension of fire events in the "tunnel community", B-class fire and extinguishing media, questionable quantity of foam concentrate in fire appliances and tunnel emergency stations, water deluge vs. water mist system and cost saving possibilities in tunnel safety systems. It has been pointed out that relative rigidity and prescriptive nature of the European tunnel Directive might result in the excessive costs of implementation but with the sub-optimal safety improvements. In the following sub-chapter titled *Conceptual proposal of FFFS*, the main characteristics of a stationary foam system, which the author holds to be the optimum if the probability of a catastrophic tunnel fire is to be decreased to a minimum have been shown. The last sub-chapter, *Conceptual proposal of FFFS system fire test in tunnel*, includes the arrangement diagram of a new cargo fuel set-up and the outlines of the testing procedure, which could be used to compare the efficiencies of various FFFS in tunnels. Further development of the test has been proposed within the European project COST IFER.

The *Conclusions* briefly summarize the scientific contribution of this thesis pointing out that more experimental research in the fire extinguishing/suppression/control of FFFS is needed, particularly such that will lead towards practical results for increasing the level of fire safety in road tunnels but without potentially disproportionate costs for the society. Realistic possibilities for further research can be opened through the European project named COST IFER.

Preface

The subject of tunnel fires entered into the scope of my interests just after the catastrophic fires which happened in the Mt Blanc and Tauern tunnel in 1999. Being a fire safety professional I found the fact that tens of people had lost their lives, that material damage had amounted to tens or even hundreds of millions of Euros, that extremely valuable infrastructural objects like big tunnels remained out of service for months, and that at the same time no-one was found responsible or guilty and everything was deemed to be normal, totally unacceptable. After studying the reports and articles published following these accidents, it was my conclusion that without the installation of a stationary firefighting/ suppression system it is practically impossible to prevent the development of fire towards a catastrophe, if the circumstances on the fire site are favourable to such a course of events. Without being aware of the experiences in Japan with sprinkler systems, I published 2 articles in professional literature, in Croatia in 2000 and in Slovenia in 2001, in which I challenged and denied all the "reservations" and negative attitude of the "tunnel community" towards the installation of stationary firefighting systems, which at that time were promoted by the globally most important organisations for tunnel fire safety: the American NFPA National Fire Protection Association and the international PIARC, Permanent International Association of Road Congresses. Being convinced that a catastrophic fire in a tunnel will nearly without exception involve burning of flammable/combustible liquids, I have suggested the installation of a foam deluge system as the optimal solution capable of fulfilling the great majority of safety requirements.

In the year 2007, when I decided to undertake another step in my scientific development, after attending a PIARC congress in Zagreb it was my impression that the issue of fire protection in road tunnels could be a suitable research topic, the result being the submission of an application for a PhD thesis titled *An Analysis of the Measures for Prevention of Catastrophic Fire in Road Tunnels.* At this congress the thesis that stationary firefighting systems in road tunnels are inappropriate and counterproductive was still widely accepted, which made me take the subject of the thesis as a personal challenge. Over the last few years the situation has changed considerably, as the professional "tunnel community" mainly accepted the idea of the benefits of stationary systems, although the European trend has mostly been directed to a relatively new idea of using water mist, rather than to a (probably) simpler and more efficient system of water spray or foam. After comparing the data from various test experiments and real fire accidents I came to the conclusion that some of globally perhaps most influential tests were not performed entirely impartially, that some research work has been done without a real necessity, as an experienced fire protection expert could have known from the beginning that no practical results could be achieved, that many measurement results from the tests are mutually incomparable and that rigid requirements of the new European directive for tunnel safety will probably cause extreme costs with sub-optimal results in the actual safety level if nothing is changed.

Although in the proposal of the thesis subject as well as in the report of the Scientific committee it has been suggested that a mathematical model and an experimental analysis of a catastrophic fire in a road tunnel would be made, this in reality was not possible. The reasons are particularly stochastic nature of fire event in a semi-enclosed volume of a tunnel and the fact that an appropriate numerical model for the interaction of such a fire and firefighting system could not be found as well as huge costs of experiments which should have been done

in a real scale, considering that downscaled tunnel experiments with firefighting scenario cannot provide the results relevant for practice. The resulting method of research applied was therefore an analysis of all publicly available test experiments undertaken so far, and their comparison with the real fire accidents which have happened in the past. Based on these results, the main characteristics of a fixed foam firefighting system have been presented, deemed by the author to be the optimal response to the high safety requirements. A proposal of a generic fire test for stationary tunnel systems which could be used for the development of a standard procedure for comparing their efficiencies has also been proposed.

I wish to thank my mentor, Prof. Bernard Franković, particularly for constant encouraging of my work and numerous useful comments by which he helped me during the past years, as well as to my comentor, Prof. Vladimir Medica for a particularly detailed review of my work and useful comments directed to the improvement of the quality. I also wish to express my gratitude to the members of the Committee for PhD thesis evaluation, Prof. Zmagoslav Prelec, Prof. Dubravka Bjegović (University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering) and Associate Prof. Ivan Polajnar (University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering) for their time and efforts dedicated to reading and evaluation of this thesis, as well as for comments and suggestions leading to the increase of quality in the final stage.

Above all, I wish to thank my dear wife, Ančica, who edited the text, pictures, diagrams and literature list with the endless patience, and who made proof reading and corrections of my manuscript with utmost devotion.

Literatura:

1. Lotsberg (2010): *Fire Accidents in the World's Road Tunnels*, http://www.lotsberg.net, pristupljeno 27.7.2010.

2. Hart, R.A. (2005): *Numerical modelling of tunnel fires and water mist suppression*, PhD thesis, School of Chemical, Environmental and Mining Engineering, University of Nottingham (UK), December 2005.

3. http://en.wikipedia.org/wiki/Big_Dig, pristupljeno 27.7.2010.

4. Greenwood, R. i sur. (2008): *Promotion, dissemination, education/training, and socioeconomic impact*, D71, A framework for evaluating the social and economic impact of tunnel fires safety improvements, UPTUN WP7, Task 7.1, Doc. No. 149 (2008).

5. Bjegović D. i sur. (2006): *Temeljni aspekti sigurnosti od požara u gradskim tunelima*, Zbornik radova "Prometna problematika grada Zagreba", Znanstveno vijeće za promet HAZU, Zagreb 12-13.06.2006.

6. Haack, A. (2002): *Current safety issues in traffic tunnels,* Tunn. Undergr. Sp. Tech., **17**, 117-127.

7. HSE (2007): *Proposals for revised policies for HSE advice on development control around large-scale petrol storage sites,* CD211, HSE Books 2007.

8. Carvel, R. O., Marlair, G. (2005): *A history of fire incidents in tunnels*, in *The Handbook of Tunnel Fire Safety* (A. N. Beard, R. O. Carvel, Eds.), ISBN 0 7277 3168 8, 3-41, London.

9. PIARC (1999): *Fire and Smoke Control in Road Tunnels*, The World Road Association (PIARC/AIPCR), Committee on Road Tunnels (C5, now C3.3), 990, report 05-05-B.

10. Bergmeister, K, Francesconi, S. (2008): *Prevention, detection and monitoring*, D12a, Causes and frequencies of incidents in tunnels, UPTUN WP1, Task 1.2 (2008).

11. Duckworth, I.J. (2008): *Fires in vehicular tunnels*, 12th U.S./North American Mine Ventilation Symposium – Wallace (Ed), p393-400, ISBN 978-0-615-20009-5.

12. Canale, S., Distefano, N., Leonardi, S. (2008): *Attuazione della Direttiva 2004/54/CE in materia di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea*, Strade & Autostrade 5-2008, Decreti, p.2-7.

13. Carvel, R.O., Beard, A.N., Jowitt, P.W. (2005): *Fire Spread Between Vehicles in Tunnels: Effects of Tunnel Size, Longitudinal Ventilation and Vehicle Spacing*, Fire Technology, 41, 271-304, 2005.

14. Dix, A. (2010): *The Impact of Fixed Fire Fighting Systems on Tunnel Safety – The Burnley Incident in a Current Theoretical Perspective*, Proc. of the 5th Int. Conference on Tunnel Safety and Ventilation, 3-4.5.2010., Graz, pp. 248-255.

15. UNECE (2001): *Reccommendations of the Group of Experts on Safety in Road Tunnels*, Final Report, TRANS/AC.7/9.

16. Brousse, B. i sur. (2005): *Fire Safe Design*, Technical Report Part 2, Fire in Tunnels, FIT (2005).

17. OECD (2006): *Tunnel Safety, Norway*, OECD Studies In Risk Management, OECD Organisation For Economic Cooperation And Development.

18. Pravilnik (2009): *Pravilnik o minimalnim sigurnosnim zahtjevima za tunele*, NN 119/09.

19. Thamm, B. (2004): *The new EU directive on road tunnel safety*, Proc. of the Int. symposium on catastrophic tunnel fires (CTF), SP Swedish National Testing and Research Institute, SP Report 2004:05. p. 19–30.

20. Fabiano B., Currò F., Reverberi A.P., Pastorino R. (2005): *Dangerous good transportation by road: from risk analysis to emergency planning,* J. Loss Prevent. Proc., 18, 403-413.

21. Wu, Y. (2008): *Initial Assessment of the Impact of Jet Flame Hazard From Hydrogen Cars In Road Tunnels*, 3rd International Symposium on Tunnel Safety and Security, 12 – 14, March, 2008.

22. Lönnermark, A. (2005): *On the Characteristics of Fires in Tunnels*, PhD Thesis, Lund University.

23. Lacroix, D. (2004): *Guidelines for fire safe design: synthesis and current harmonization processes*, First International Symposium, Safe & Reliable Tunnels - Innovative European Achievements, p107-115, Prague.

24. Brekelmans, J. (2003): *Tunnel safety-related research projects and networks funded by the European Commission*, XXIInd PIARC World Congress.

25. Khoury, G., (2008): *Evaluation of safety levels and upgrading of existing tunnels*, D50, Holistic tunnel safety evaluation and upgrading procedure: overview, UPTUN WP5 (2008).

26. Promat (2008): *Tunnel Fire Protection for Tunnel Structures and Services*, Promat International N.V., 07/2008.

27. Jönsson, J., Johnson, P. (2010): *Suppression systems – Trade-offs & Benefits*, Proc. from the 4th Int. Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt a/M, March 17-19, 2010, pp 271-282.

28. Kratzmeir, S. (2008): *Road tunnel protection by Water Mist Systems – Implementation of full scale fire test results into a real project*, World Tunnel Congress 2008 - Underground Facilities for Better Environment and Safety – India, 1942-1949.

29. Cox G. (1995): *Basic considerations*. In Combustion Fundamentals of Fire, (G. Cox Ed.), Academic Press, London (UK), Chapter 1.

30. Hall, J. (2008): *The Total Cost of Fire in the United States*, Quincy, MA, SAD, February 2008.

31. MoI (2000): Min. of Establishment, Transport and Housing: *Inter-Ministry Circular No. 2000-63, 25 August 2000, concerning safety in the tunnels of the National highway network*, section 5.3.1.

32. Li, Y.Z., Ingason, H. (2010): *Maximum Ceiling Temperature in a Tunnel Fire*, SP Report 2010:51, Borås, Švedska.

33. EN 3-7:2004+A1:2007: *Portable fire extinguishers - Part 7: Characteristics, performance requirements and test methods (EN 3-7:2004+A1:2007).*

34. *Schlussbericht der Versuche im Ofenegg tunnel von 17.5 - 31.5.1965.,* Kommission für Sicherheitsmassnahmen in Strassentunneln, 1965.

35. Haerter, A. (1994): *Fire tests in the Ofenegg Tunnel in 1965*, Proc. of the Int. Conference on Fires in Tunnels, Borås, Švedska, 10/11.10.1994., pp. 195-214, SP Report 1994:54.

36. Carvel, R.O. (2004): *Fire Size in Tunnels*, Ph.D., Heriot-Watt University, School of the Built Environment, Division of Civil Engineering, Riccarton, Edinburgh, EH14 4AS.

37. Drysdale, D. (1999): *An Introduction to Fire Dynamics*, 2nd Ed., ISBN 0 471 97290 8, Chichester.

38. Babrauskas, V. (1990): *Burning rates*. In The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 1st Ed., 2nd imp., p2.1-2.15, NFPA&SFPE, ISBN 0-87765-353-4.

39. Heselden, A.J.M. (1978): *Studies of fire and smoke behaviour relevant to tunnels*, Fire Research Station, Research Note CP66/78.

40. Heselden, A.J.M., Hinkley, P.L. (1970): *Smoke travel in shopping malls: Experiments in co-operation with Glasgow Fire Brigade, Part 1*, Joint Fire Research Organization, Fire Research Note No. 832.

41. Pucher, K. (1994): *Fire Tests in the Zwenberg Tunnel (Austria),* Proc. Int. Conference on Fires in Tunnels, Borås, Švedska, 10/11.10.1994, pp. 187-194.

42. Mizutani, T., Horiuchi, K., Akiyama, K. (1982): *Experimental study of tunnel fires*, Journal of the Japan Road Association, 1982, pp.24-28.

43. PWRI (1993): *State of the road tunnel equipment in Japan - ventilation, lighting, safety Equipment*, Public Works Research Institute, Technical note, Vol. 61, Japan 1993.

44. Lyon, R.E., Walters, R.N. (2006): *Flammability of Automotive Plastics*, SAE International Technical Paper, doi: 10.4271/2006-01-1010, SAE World Congress, April 3-6, 2006, Detroit.

45. Keski-Rahkonen, O., Holmjund, C., Loikkanen, P., Ludvigsen, H., Mikkola, E. (1986): *Two full scale pilot fire experiments in a tunnel*, Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus (VTT) Technical Research Centre of Finland, Research report 453.

46. Keski-Rahkonen, O. (1994): *Tunnel fire tests in Finland*, Proc. Int. Conference Fires in Tunnels, Borås, Švedska, 10/11.10.1994., pp. 222-237.

47. EUREKA EU499 (1995): *Fires in Transport Tunnels: Report on full-scale tests*, EUREKA-Project EU499: FIRETUN Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V., Düsseldorf, Njemačka.

48. Ingason, H. (1994): *Heat release rate measurements in tunnel fire,* Proc. Int. Conference on Fires in Tunnels, 10-11.10.1994., pp. 86-103, Borås, Švedska.

49. Steinert, C. (1994): S*moke and Heat Production in Tunnel Fires*, Proc. Int. Conference on Fires in Tunnels, 10-11.10.1994., pp. 123-137, Borås, Švedska.

50. Burklin, R.W., Purington, R.G. (1980.): *Fire Terms – A Guide to their Meaning and Use*, NFPA, Boston, MA, SAD.

51. Karlsson, B., Quintiere, J.G. (2000): *Enclosure Fire Dynamics*, ISBN 0-8493-1300-7, CRC Press Ltd.

52. Richter, E. (1995): *Smoke and Temperature Development in Tunnels – Experimental Results of Full Scale Fire Tests*, 2nd Int. Conference on Safety in Road and Rail Tunnels, Granada, Španjolska, pp. 295-302.

53. Haack, A. (1995): *Introduction to the EUREKA project/BMBF research project "Fire protection in underground transportation facilities"*, Int. Conference on Fire Protection in Traffic Tunnels, Dresden, Njemačka, 12-13.9.1995, pp. 6-18.

54. NFPA 72 (1993): *NFPA 72:1993 - National Fire Alarm Code,* Quincy, MA, SAD.

55. Ingason, H. (1995): *Findings concerning the rate of heat release*, Int. Conference on Fire Protection in Traffic Tunnels, Dresden, Njemačka, 12-13.9.1995, pp. 94-103.

56. Blume, G. (1995): *Temperature distribution and spread of toxic gases: Effects on escape and rescue procedures*, Int. Conference on Fire Protection in Traffic Tunnels, Dresden, Njemačka, 12-13.9.1995, pp. 56-65.

57. Bahadir, M., Wichmann, H., Zelinski, V., Lorenz, W. (1995): *Organic pollutants during fire accidents in traffic tunnels*, Int. Conference on Fire Protection in Traffic Tunnels, Dresden, Njemačka, 12-13.9.1995, pp. 46-54.

58. Malhotra, H.L. (1995): *Goods Vehicle Fire Test in a Tunnel*, 2nd Int. Conference on Safety in Road and Rail Tunnels, Granada, Španjolska, pp. 237-244.

59. MTFVTP (1995): *Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program- Test report*, Massachusetts Highway Department and Federal Highway Administration.

60. Project (2002): *Project „Safety Test" – Report on Fire Tests*, Directorate-General for Public Works and Water Management (Rijkwaterstaat), Civil Eng. Division, Utrecht, the Netherlands, August 2002 (www.minvenw.nl).

61. Lemaire, T., van de Leur, P. H. E., Kenyon, Y. M. (2002): *Safety Proef: TNO Metingen Beneluxtunnel – Meetrapport*, TNO, TNO-Rapport 2002-CVB-R05572, 2002.

62. Lemaire, T., Kenyon, Y. (2006): *Large scale fire tests in the Second Benelux tunnel*, Fire Technology, 2006 (42): 329-350.

63. Lönnermark, A., Ingason, H. (2004): *Large scale fire tests in the Runehamar Tunnel: gas temperature and radiation*, Proc. of the Int. Conference on Catastrophic Tunnel Fires, Borås, Švedska, 20-21.11.2003., SP Report 2004:05. p. 93–104.

64. Ingason, H., Lönnermark, A. (2004): *Large scale fire tests in the Runehamar Tunnel: heat release rate*, Proc. of the Int. Conference on Catastrophic Tunnel Fires, Borås, Švedska, 20/21.11.2003., SP Report 2004:05. p. 81–92.

65. NFPA 502 (2004): *NFPA 502:2004, Standard for Road Tunnels, Bridges and Other Limited Access Highway*, Annex D, Sprinklers in road tunnels, Quincy, MA, SAD.

66. JRA (2001): *Guideline and Explanation for the Installation of Safety Facilities in Road Tunnels*, Japan Road Assn., Ministry of Land Infrastructure and Transport (MOLIT).

67. Quintiere, J.G. (1989): *Scaling applications in fire research*, Fire Safety Journal, 1989, 15, 3-29.

68. Bettis, R.J., Wu, Y., Hambleton, R.T. (1993): *Interim Validation of Tunnel Fire Consequence Models: Data from phase 2, Test 5*, Health and Safety Executive, Buxton, 1993. Section paper IR/L/93/09 (part 5).

69. Bergmeister, K, Francesconi, S. (2006): *Fire effects and tunnel performance: system response*, D61, State of the Art Report on Full Scale Testing of Tunnels under Fire, UPTUN WP6, Task 6-1 (2006).

70. Vistnes, J. (2004): *Validation of Phoenics 3.5 for Modelling Tunnel Ventilation Systems Under Fire Conditions.*

71. Yoon, J.K., Hadjisophocleous, G. (2010): *An experimental study of the impact of tunnel suppression on tunnel ventilation*, Proc. from the 4th Int. Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt a/M, March 17-19, 2010, pp 341-349.

72. Stringa, I. i sur. (2008): *Manual of good practice*, D73b, Promotion, dissemination, education/training and socioeconomic impact, UPTUN WP7 (2008), ISBN: 9077374108.

73. Drakulić, M. (2006): *Djelovanje sustava uzdužne ventilacije cestovnog tunela u uvjetima požara*, doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, UDK 624.191.94, Zagreb 2006.

74. Bjegović, D. i sur.(2002): *Utjecaj velikih požara u cestovnim tunelima Europe na izbor mjera zaštite od požara*, Zbornik radova znanstveno-stručnog skupa "Sigurnost u okolišu i graditeljstvu", Šibenik, 2002. pp. 295-306.

75. EU Directive (2004): *Directive 2004/54/EC of the European parliament and of the Council of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network,* Official Journal of the European Union L 167 of 30 April 2004.

76. Horn, B. i sur. (2007): *Integrated approach to road tunnel safety*, PIARC 2007, R07, ISBN: 2-84060-195-8.

77. Miclea, P.C., Chow, W.K., Shen-Wen, C., Junmei, L., Kashef, A., Kang, K. (2007): *International tunnel fire-safety design practices*, ASHRAE Journal, V.49, No. 8, August 2007, pp.50-60 (NRCC-49696).

78. Nelisse, M. Haack, A. (2008): *Promotion, dissemination, education/training, and socioeconomic impact*, D72a, Report on Relevant Objects – Interrelation with other (inter)national projects, UPTUN WP7 Task 7.2a (2008).

79. Khoury, G., Horn, v.d.B., Molag, M., Kalstrom, H, Trijssenaar, I. (2008): *Global approach to tunnel safety*, Evaluation of safety levels and upgrading of existing tunnels, D 56, UPTUN WP5 (2008).

80. Bergmeister, K, Francesconi, S. (2008): *Evaluation of safety levels and upgrading of existing tunnels*, D51, Comprehensive inventory of Tunnel safety features, UPTUN WP5, (2008).

81. NFPA 502 (2008): *NFPA 502:2008, Standard for Road Tunnels, Bridges and Other Limited Access Highway*, NFPA, Quincy, MA, SAD.

82. Connell, B. (2007): *Regulations, Standards and Guidelines*, NCHRP 20-7 Task 230, Workshop on Safety and Security in Roadway Tunnels, Nov. 28-29, 2007, Irvine, Kalifornija.

83. BD 78/99 (1999): *Design manual for roads and bridges, Volume 2, Highway structures design, Section 2, Part 9, BD 78/99: Design of Road Tunnels*, The Highway Agency.

84. Pravilnik (2006): *Pravilnik o hidrantskoj mreži za gašenje požara*, NN 8/06.

85. EN 671-1 (2001): *EN 671-1: 2001 Fixed firefighting systems – Hose systems – Part 1: Hose reels with semi-rigid hose.*

86. RVS (2006): *Tunnel, Tunnelausrüstung, Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen, Ortsfeste Löschsysteme*, RVS 09.02.51.

87. RABT (2006): *Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT),* Ausgabe 2006, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.

88. AFAC (2001): *Fire safety guidelines for road tunnels*, Australasian Fire Authorities Council.

89. JPHC (2001): *National Safety Standard of Emergency Facilities on Road Tunnel, Design Principles, Vol. 3 (Tunnel), Part 4 (Tunnel safety facilities),* Japan Highway Public Corporation.

90. Mashimo, H. (2002): *State of the Road Tunnel Safety Technology in Japan*, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 17, Issue 2, (2002) pp145-152.

91. Mashimo, H, Mizutani, T (2003): *Tunnel/Fire/Ventilation/Automation/Stratification Current state of road tunnel safety in Japan*, Proc. 22nd PIARC World Road Congress, 19-25.10.2003., Durban, J. Afrika.

92. Iwata, H., Ota, Y. (2001): *Tokyo-wan Aqualine – Experience of Traffic and Safety,* Proc. 1st Int. Conference On Traffic and Safety In Road and Tunnels, 28-29. May 2001, Hamburg.

93. Bendelius, A.G. (2008): *Road Tunnels and Bridges*, section 21-11 in NFPA Fire Protection Handbook, 20th Ed., ISBN-13: 978-0-87765-758-3, 2008.

94. OECD (2001): *Safety in Tunnels - Transport of Dangerous Goods through Road Tunnels*, Organisation for Economic Cooperation and Development, OECD Publications, ISBN 92-64-19651-X – No. 52169, Paris, 2001.

95. HSE (2001): *Reducing risks, protecting people*, HSE's decision-making process, Health and Safety Executive, ISBN 0 7176 2151 0, HMSO London 2001.

96. HSE (1992): *The Tolerability of Risk from Nuclear Power Stations*, Health and Safety Executive, HMSO London 1992.

97. HSE (2005): *Technical Assessment Guide – Demonstration of ALARP*, Nuclear Safety Directorate – Business Management System, T/AST/005 Issue Date: 24/07/02. Review Date: 23/07/05.

98. HSE (2009): *Societal Risk: Initial briefing to Societal Risk Technical Advisory Group*, Research Report RR703, HSE.

99. PIARC (2008): *Risk analysis for road tunnels*, 2008R02, ISBN: 2-84060-202-4.

100. Knoflacher H., Pfaffenbichler, P. C., Nussbaumer, H. (2002): *Qantitative Risk Assessment of Heavy Goods Vehicle Transport through Tunnels - the Tauerntunnel Case Study*, Proc. of the 1st International Conference "Tunnel Safety and Ventilation" 8-12.4.2002., Graz.

101. ADR (2011): *ADR European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road*, Vol. I&II, ECE/TRANS/215, ISBN 978-92-1-139140-4, New York& Geneva, 2010.

102. Janssens, M., Parker, B. (1992): *Oxygen consumption calorimetry*, Heat Release in Fires (Babrauskas, V., Grayson, S.J. eds.), Elsevier Applied Science, Amsterdam, pp. 31-59.

103. Hugget, C. (1980): *Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements*, Fire and Materials, 4, 61-65.

104. Bošnjaković, F. (1970): *Nauka o toplini, Prvi dio*, IV. Prerađeno izdanje, Tehnička knjiga, Zagreb 1970.

105. Ingason, H., Bergqvist, A., Frantzich, H., Hasselrot, K., Lundström, S. (2001): *Planning Manual Fire Fighting and Rescue in Tunnels*, Proceedings of 4th Int. Conference on Safety in Road and Rail Tunnels, Madrid, 2-6 April 2001, p. 595-604.

106. Arvidson, M. (2010): *Large-scale Water Spray and Water Mist Fire Suppression Systems Tests*, Proc. from the 4th Int. Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt a/M, March 17-19, 2010, pp 283-296.

107. PIARC (2007): *Systems and equipment for fire and smoke control in road tunnels*, PIARC_3_05.16.B-2006, ISBN 2-84060-189-3.

108. Davis, S. K. (2000): *Fire Fighting Water: A Review of Fire Fighting Requirements. A New Zeeland Perspective*, Fire Engineering Research Report 2000/3, University of Canterbury, Christchurch.

109. Tewarson, A., Pion, R.F. (1976): *Flammability of Plastics. I. Burning Intensity*, Combustion and Flame, 26, 85-103.

110. Tewarson, A. (1980): *Heat release in fires*, Fire and Materials, 4, 185-191.

111. Madorsky, S.L. (1964): *Thermal Degradation of Organic Polymers*, Interscience, John Wiley, New York.

112. Butler, C.P. (1971): *Notes on charring rates in wood*, Fire Research Note No. 896.

113. Tewarson, A. (1995): in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 2nd ed., National Fire Protection Association, Quincy, MA.

114. Kim M.E.(2006): *A Study on Pulsation in Runehamar Tunnel Fire Tests with forced longitudinal Ventilation*, Worcester Polytechnic Institute in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Master of Science in Fire Protection Engineering, June 2006.

115. ISO/FDIS 13943:2008: *ISO/FDIS 13943:2008 Fire safety – Vocabulary.*

116. NFPA 555 (2009): *NFPA 555:2009, Guide on Methods for Evaluating Potential for Room Flashover*, NFPA, Quincy, MA, SAD.

117. Haack, A. i sur. (2005): *Design Fire Scenarios*, Technical report-Part 1, Thematic Network FIT, European Community 'Competitive and Sustainable Growth' Contract n° G1RT-CT-2001-05017, 2001.

118. NFPA 204 (2007): NFPA 204:2007, *Standard for Smoke and Heat Venting*, NFPA, Quincy, MA, SAD.

119. Heskestad, G. (1972): *Similarity Relations for the Initial Convective Flow Generated by Fire*, FM Report 72-WA/HT-17, FM Research Corp., Norwood, MA.

120. Ingason H. (2006): *Design Fires in Tunnels*, Safe & Reliable Tunnels. Innovative European Achievements, 2nd Int. Symposium, Lausanne 2006, SP Swedish National Testing and Research Institute.

121. Lacroix, D. (1997): *New French Recommendations for Fire Ventilation in Road Tunnels*, 9th Int. Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Aosta Valley, Italy, 6-8 October, 1997.

122. Ingason, H. (2005): *Fire Development in Large Tunnel Fires*, 8th Int. Symposium on Fire Safety Science, Beijing, China, 18-23 September, 2005.

123. Ingason, H. (2006): *Modelling of Real World Fire Data*, 2nd Int. Symposium on Tunnel Safety & Security (ISTSS), 7-13, March 15-17, 2006 Madrid, Spain, 2006.

124. Numajiri, F., Furukawa, K. (1998): *Short Communication: Mathematical Expression of Heat Release Rate Curve and Proposal of „Burning Index"*, *Fire and Materials,* 22**,** 39-42, 1998.

125. Marlair, G., Lemaire, T., Öhlin, M. (2008): *Fire Scenarios and accidents in the past* - Draft final report (1) task 2.1, part 1, UPTUN WP2 Report.

126. ISO 834 (1999): *ISO 834-1:1999, Fire-resistance tests – Elements of Building Construction – Part 1: General requirements.*

127. Rhodes, N. i sur. (2005): *Fire Safe Design*, FIT, Technical Report Part 3, Fire Response Management.

128. Krause, T. (2006): Fire *Protection Engineering for New and Existing Tunnels – Design Options and Possibilities*, Proc. ITA Conference Towards an Improved Use of Underground Spaces, 6th October 2006, pp.291-317, London.

129. Lönnermark, A.; Ingason, H. (2006): *Fire Spread and Flame Length in Large-Scale Tunnel Fires,* SP Swedish National Testing and Research Institute, Fire Technology, Box 857, SE-501 15, Borås, Sweden, Fire Technology, 42, 283–302.

130. Liew, S.K., Deaves, D.M., Blyth, A.G. (1998): *Eurotunnel HGV Tunnel Fire on 18th November 1996 - Fire Development and Effects*, Proc. 3rd Int. Conference On Safety in Road and Rail Tunnels, Nice, France, March 9-11, 1998, pp. 29-40.

131. Rew, C., Deaves, D. (1999): *Fire Spread and Flame Length in Ventilated Tunnels, a Model Used in Channel Tunnel Assessments*, 1st Int. Conference On Tunnel Fires and Escape From Tunnels, Lyon, France, May 5-7, 1999, pp. 397-406.

132. Van Vliet, J.F.M. i sur. (2010): *An Effective Pool Fire Mitigation Concept*, Proc. from the 4th Int. Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt a/M, March 17-19, 2010, pp 249-257.

133. Modic, J. (1997): *Polje hitrosti in koncentracija škodljivih snovi v predorih*, doktorsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana 1997.

134. Drakulić, M., Brodar, M. (2011): *Analiza energijskih potreba ventilacije cestovnih tunela*, Građevinar 63 (2011) 1, 55-62.

135. Modic, J. (2007): *Ventilation by violent wind*, PIARC Int. Workshop "State of the Art of Fire Safety in Road Tunnels", Zagreb, 8-9. February 2007.

136. Waninger, K.J., Harth, C. (2004): *Current fire protection plans for enclosed spaces with increased fire hazards in the example of tunnel building*, Mainz University of Applied Sciences, Institute of Construction Management, Mainz, July 2004.

137. Modic, J. (2010): *Gibanje dima v predoru v primeru požara*, Zbornik radova 10. slovenski kongres o cestah in prometu, Portorož, 20 – 22. oktobra 2010.

138. Tien, C.L., Lee, K.Y., Stretton, A.J. (1990): *Radiation heat transfer*, in The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 1st Ed., 2nd imp., p1.92-1.106, NFPA&SFPE, ISBN 0-87765-353-4.

139. Hamilton, D.C., Morgan, W.R. (1952): *NACA Technical Note TN-2836*.

140. Pless, G., Seliger, U. (2009): *Investigation of conditions for the Fire service in the fighting fires in traffic tunnels undertaking into account risk analysis of OECD-PIARC underlying fire scenarios for various accidents - part 1*, Standing Conference of Interior Ministers and Senators, Working Group V, Committee on Firefighting issues, catastrophe protection and civil defence, Research Report No. 158.

141. VDI 1977: *VDI-Wärmeatlas*, Berechnungsblätter für den Wärmübergang, Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Verlag GmbH, 1977, ISBN 3-18-400373-6.

142. EN 469 (2005): *EN 469:2005+A1/2006, Protective clothing for firefighters – Performance requirements for protective clothing for firefighting.*

143. Kim, H.K., Lönnermark, A., Ingason H. (2010): *Effective Firefighting Operations in Road Tunnels*, SP Report 2010:10, ISBN 978-91-86319-46-5.

144. Purser, D.A. (1990): *Toxicity assessment of combustion products*, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 1st Ed., p1.200-1.245, NFPA&SFPE, ISBN 0-87765-353-4.

145. Koinig, H. (1999): *Referenzszenarien zur Richtlinie 96/82/EG*, erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Jugend und Familie, Wien 1999, Allg. beeid. und

gerichtl. zert. Sachverständiger, Technisches Büro für Technische Physik, Donaustr. 101/1, 2344 Maria Enzersdorf.

146. EN 1486 (2007): *EN 1486:2007, Protective clothing for firefighters – Test methods and requirements for reflective clothing for specialized fire fighting.*

147. CETU (2003): *Guide to Road Tunnel Safety Documentation*, Booklet 4, Specific Hazard Investigations, ISRN EQ-CETU-03-4-FR.

148. Vergnault, J.M. i sur. (2008): *Management of the operator – Emergency teams interface in road tunnels*, PIARC 2008R03, ISBN 22-84060-203-2.

149. Lawson, J.R. (1996): *Firefighters Protective Clothing and Thermal Environments of Structural Fire Fighting*, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 5804, Gaithersburg, 1996.

150. Ingason H., Lönnermark, A. (2004): *Recent Achievements Regarding Measuring of Time-heat and Time-Temperature Development in Tunnels*, SP Swedish National Testing and Research Institute, Sweden, Safe & Reliable Tunnels. Innovative European Achievements, First International Symposium, Prague 2004.

151. Ingason, H. (2003): *Fire Development in Catastrophic Tunnel Fires (CTF)*, Int. Symposium on Catastrophic Tunnel Fires (CTF), 31-47, Borås, Sweden, 20-21 November 2003.

152. Bettelini, M. Neuenschwander, H., Henke, A., Gagliardi, M. Steiner, W. (2003): *The Fire in the St Gotthard tunnel of October 24, 2001*, Int. Symposium on Catastrophic Tunnel Fires (CTF), 49-68, Borås, Sweden, 20-21 November 2003.

153. Beltzer, W., Riepe, W., Locher, P., Merz, E. H. (2001): *Risikoanalyse zum Transport gefährlicher Güter durch die Tunnelkette der BAB A71 im Thüringer Wald*, Teilgutachten IV: Vergleich zwischen der Tunnelkette der BAB A71 und möglichen Umfahrungsstrecken, Schlussbericht vom 1. Okt. 2001, Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Infrastruktur.

154. Trottet, Y., Vernez, D., Jufer M. (2001): *Analyse de risques lors d'accidents en tunnels*, www.nfp41.ch/download/modulf/kf-f2.pdf, pristupljeno 14.8.2010.

155. Zakon (1995): *Zakon o zapaljivim tekućinama* (NN 108/95 i 56/10).

156. Pravilnik (1999): *Pravilnik o zapaljivim tekućinama* (NN 54/99).

157. TRbF 60 (2002): *Technische Regeln für brennbare Flüssigheiten, TRbF 60 – Ortebewegliche Behälter* (BArbBl. 6/2002 S. 80).

158. Persson, M. (2002): *Quantitative Risk Analysis Procedure for the Fire Evacuation of a Road Tunnel - An Illustrative Example*, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Sweden, Report 5096, Lund 2002.

159. EN 13565-2:2009: *Fixed firefighting systems – Foam systems – Part 2: Design, construction and maintenance.*

160. API 2021: *Guide for Fighting Fires In and Around Petroleum Storage Tanks*, API Publ. 2021, 2nd ed., 1980.

161. Knežević, Vjekoslav (1990): *Priručnik za kondenzat*, UDK 621.319(03), ISB 86901 155-1-X, Rijeka.

162. Nelson, R.W. (1987): *Know Insurers' Expectations*, in Fire Protection Manual for Hydrocarbon Processing Plants-Volume 2 (C.H. Vervalin Ed.), ISBN 0-87201-288-3, 73-78, Houston 1987.

163. Hasegawa, K., Sato, K. (1977): *Study on the Fireball Following Steam Explosion of n-Pentane*, Proc. of the 2nd Int. Symposium On Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, pp. 297-304, SFPE Handbook, pp. 2-103.

164. Kletz, T. (1987): *Protect Pressure Vessels from Fire*, in Fire Protection Manual for Hydrocarbon Processing Plants-Volume 2 (C.H. Vervalin Ed.), ISBN 0-87201-288-3, 291-297, Houston 1987.

165. Martinsen, W.E. i sur. (1985): *Spill Protection for Liquefied Gas*, in Fire Protection Manual for Hydrocarbon Processing Plants-Volume 1, 3rd Ed. (C.H. Vervalin Ed.), ISBN 0-87201-333-2, 161-169, Houston 1985.

166. Kanury, A.M. (1990): *Ignition of liquid fuels*, in The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 1st Ed., p1.315-1.325, NFPA&SFPE, ISBN 0-87765-353-4.

167. Zalosh, R.G. (1990): *Explosion protection*, in The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 1st Ed., p2.88-2.105, NFPA&SFPE, ISBN 0-87765-353-4.

168. Lee, J.H. i sur. (1977): *Blast Effects from Vapor Cloud Explosions*, AIChE Loss Prevention Symposium, 11, pp. 59-70.

169. Hasegawa, K., Sato, K. (1978): *Experimental Investigation of the Unconfined Vapor-Cloud Explosions of Hydrocarbons*, Technical Memorandum No.12, Japanese Fire Research Institute, SFPE Handbook, pp. 2-103.

170. Sharry, J.A., Walls, L.W. (1985): *LP-Gas Distribution Plant Fire*, in Fire Protection Manual for Hydrocarbon Processing Plants-Volume 1, 3rd Ed. (C.H. Vervalin Ed.), ISBN 0-87201-333-2, 77-83, Houston 1985.

171. Kaiser, W. i sur. (2000): *Determination and calculation of hazardous incident scenarios in accordance with the 3rd hazardous incident administrative instruction*, Vol. 2, TÜV Anlagentechnik GmbH Berlin-Brandenburg, Technische Universität Berlin 2000.

172. NFPA 2113 (2007): *NFPA 2113:2007, Standard on Selection, Care, Use and Maintenance of Flame-Resistant Garments for Protection of Industrial Personnel Against Flash Fire*, NFPA, Quincy, MA, SAD.

173. DOE (2010): *Protective Action Criteria (PAC) with AEGLs, ERPGs & TEELs*: Rev. 26 for Chemicals of Concern (09/2010), www.atlintl.com/DOE/teels/teel.html, pristupljeno 28.12.2010.

174. DOE (2011): DOE O 155.1 C, *Comprehensive Emergency Management System*, US Dept. of Energy, www.directives.doe.gov/directives/current-directives/151.1-BOrder-c/view, pristupljeno 5.5.2011.

175. Pravilnik (2009): *Pravilnik o graničnim vrijednostima izloženosti opasnim tvarima pri radu i biološkim graničnim vrijednostima*, NN 13/2009.

176. VFDB (2010): *Bewertung von Schadstoffkonzentrazionen im Feuerwehreinsatz, Richtlinie 10/01*, www.vfdb-10.de/etws.0.html, pristupljeno 5.5.2011.

177. EN 943-2 (2002): *EN 943-2:2002, Protective clothing for use against liquid and gaseous chemicals, including liquid aerosols and solid particles -- Part 2: Performance requirements for "gas tight" (Type 1) chemical protective suits for emergency teams (ET).*

178. Carvel, R. O., Beard, A. (2005): *The influence of tunnel ventilation on fire behaviour*, in *The handbook of Tunnel Fire Safety* (A. N. Beard and R. O. Carvel, Eds.), ISBN 0 7277 3168 8, 184-198, London.

179. Petelin, S. i sur. (2005): *Uspešnost intervencije v predorih*, raziskovalna razvojna naloga, zaključno poročilo, ver. 7L, Univerza v Ljubljani, pogodba 404-10-13/2003-1.

180. Blinov, V.I., Khudiakov, G.N (1957): *The Burning of liquid pools*, Doklady Academi Nauk SSSR, 113, 1094.

181. Cowley, L.T., Johnson, A.D. (1992): *Oil and gas fires: characteristics and impact*, HMSO, HSE Books, ISBN 0118820346, 978-0118820349, London 1992.

182. Babrauskas, V. (1983): *Estimating Large Pool Fire Burning Rates*, Fire Tech., 19, 251.

183. Steinhaus, T. i sur. (2007): *Large-scale pool fires*, Thermal Science Journal, Vol. 11, issue 3, (special on fire), 2007.

184. Ingason, H, Lönnermark, A. (2010): *Effects of longitudinal ventilation on fire growth and maximum heat release rate*, Proc. from the 4th Int. Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt a/M, March 17-19, 2010, pp 395-406.

185. Ingason, H. (2005): *Model Scale Tunnel Fire Tests – Longitudinal Ventilation*, SP Fire Technology SP Report 2005:49, SP Swedish National Testing and Research Institute, Borås, Sweden.

186. Pravilnik (2006): *Pravilnik o uporabi osobnih zaštitnih sredstava*, NN 39/2006.

187. Pravilnik (2010): *Pravilnik o stavljanju na tržište osobne zaštitne opreme*, NN 89/2010.

188. Direktiva (1989): *Council Directive 89/656/EEC of 30 November 1989 on the minimum health and safety requirements for the use by workers of personal protective equipment at the workplace.*

189. Direktiva (1989): *Council Directive of 21 December 1989 on the approximation of the laws of the Member States relating to personal protective equipment* (89/686/EEC, 93/68/EEC, 93/95/EEC i 96/58/EC).

190. Popis (2009): *Popis hrvatskih normi za osobnu zaštitnu opremu*, NN 110/2009.

191. EN 443:2008: *EN 443:2008, Helmets for fire fighting in buildings and other structures.*

192. EN 659:2003: *EN 659:2003+A1:2008, Protective gloves for firefighters.*

193. EN 13911: *EN 13911:2004, Protective clothing for firefighters -- Requirements and test methods for fire hoods for firefighters.*

194. EN 15090:2006: *EN 15090:2006, Footwear for firefighters.*

195. Kohl, K.J., Pless, G. (2007): *Development of the basis for engineering methods for calculating the required extinguishing intensities for extinguishing fires with water*. Part I - Literature review, Research Report No. 147, Institute of Firefighting Saxony-Anhalt, Heyrothsberge, December 2007.

196. Kohl K.J., Kutz, M., Wienecke F.(2005): *The effect of mobile isolation and ventilation measures in rescue and fire fighting in tunnel fires* - Part 2, Institute of Firefighting Saxony-Anhalt, Heyrothsberge, January 2005, FA-Nr. 42 (1 / 2003) H, ISSN 0170-0060.

197. Pless, G. Seliger, U. (2000): *Experimental and theoretical studies on optimization of methods of detection and protection plans for accidental releases in chemical storage* (IV), Final Report commissioned by the Federal Ministry of Education, Science, Research and Technology, number 01 RG 9510/4, Institute of Firefighting Saxony-Anhalt, Report No. 386, Heyrothsberge, 2000.

198. API 2021 (2001): *Management of Atmospheric Storage Tank Fires*, API recommended practice 2021, 4th Ed., 2001.

199. DIN 14272-1(E) (1990): *DIN 14272-1(E) -1990 Schaummittel; Proteinschaummittel und Fluor-Proteinschaummittel zur Erzeugung von Schwerschaum für Löschzwecke.*

200. NFPA 11 (2010): *NFPA 11:2010 - Standard for Low-, Medium-, and High-Expansion Foam*, NFPA, Quincy, MA, SAD, ISBN 978-087765966-2 (PDF).

201. EN 13565-2:2009: *Fixed firefighting systems – Foam systems – Part 2: Design, construction and maintenance.*

202. Williams (2009): *Williams Fire and Hazard Control Equipment Catalogue 2/2009*, www.williamsfire.com, pristupljeno 16.4.2011.

203. EN 1568-3:2008: *Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 3: Specification for low expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible liquids.*

204. EN 1568-4:2008: *Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 4: Specification for low expansion foam concentrates for surface application to water-miscible liquids.*

205. UL 162: *Standard for Foam Equipment and Liquid Concentrates, 7th Ed., Underwriters Laboratories Inc., Northbrook, Il, 1994, ISBN 1-55989-561-6.*

206. ISO 7203-1:2011: *Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 3: Specification for low-expansion foam concentrates for top application to water-immiscible liquids.*

207. ISO 7203-3:1999: *Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 3: Specification for low expansion foam concentrates for top application to water-miscible liquids.*

208. MOD Defence Standard 42-40 Issue 2, *Foam Liquids, Fire Extinguishing (Concentrates, Foam, Fire Extinguishing)*, 2002.

209. MOD Defence Standard 42-41 Issue 2, *Foam Liquids, Fire Extinguishing (Concentrates, Alcohol Resistant, Foam, Fire Extinguishing)*, 2002.

210. MIL (1998): *Military Specification MIL-F-24385F - Fire Extinguishing Agent, Aqueous Film Forming Form (AFFF) Liquid Concentrate, for Fresh and Seawater.*

211. Ingason, H. (2006): *Model Scale Tunnel Fire Tests*, Sprinkler, Brandforskprojekt 406-021, SP Fire Technology SP Report 2006:56, SP Swedish National Testing and Research Institute, Borås, Sweden.

212. Regent, A. (2000): *Ili sprinkler s pjenom ili ništa (prilog sprječavanju katastrofalnog požara u cestovnom tunelu)*, Vatrogasni vjesnik, 10/2000, p. 27-30.

213. Regent, A. (2001): *Ali poplavni sprinklerski sistem s peno ali nič*, Požar, 2/2001, p.24-30.

214. Yoon, J.K., Hadjisophocleous, G. (2010): *An experimental study of the impact of tunnel suppression on tunnel ventilation*, Proc. from the 4th Int. Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt a/M, March 17-19, 2010, pp 341-349.

215. PIARC (2008): *Road tunnels: An assessment of fixed firefighting systems*, PIARC 2008R07, ISBN: 2-84060-208-3.

216. Häggkvist, A. (2011): *Fixed Fire Fighting Systems in Road Tunnels*, SFPE Journal, 1st quarter 2011.

217. Brinson, A. (2010): *Active Fire Protection in Tunnels*, Proc. from the 4th Int. Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt a/M, March 17-19, 2010, pp 48-59.

218. Stroeks, R. (2001): *Sprinklers in Japanese Road Tunnels*, Chiyoda Engineering Consultants Co. Ltd., Report BFA-10012, za Bouwdienst Rijkwaterstaat, Nizozemska, prosinac 2001, http://www.minvenw.nl/rws/bwd/home/pdf/tunnel/japantun.pdf.

219. Liu, Z.G., Kashef, A., Lougheed, G., Kim, A.K. (2007): *Challenges for use of fixed fire suppression systems in road tunnel fire protection*, Suppression & Detection Research Applications – A Technical Working Conference (SUPDET 2007), Orlando, Florida, March 5-8, 2007, pp. 1-10, NRCC-49232.

220. VdS 3502 (2005): *Fire Protection in Road Tunnels*, VdS 3502en: 2005-08 (01) VdS Schadenverhütung GmbH, Amsterdamer Str. 174, 50735 Köln.

221. Opstad, K., Stensaas, J.P. (2006): *Fire Mitigation Measures*, Safe & Reliable Tunnels. Innovative European Achievements, Second Int. Symposium, Lausanne 2006.

222. Back, G.G. i sur. (1996)**:** *Full-Scale Tests of Water Mist Fire Suppression Systems for Navy Shipboard Machinery Spaces*, Phase II B Obstructed Spaces, NRL Report 6180-97-7831, 1996.

223. Guigas, X., Weatherill, A., Bouteloup, C., Wetzig, V. (2005): *Dynamic fire and water mist tests for the A86 East Tunnel*, Tunnel Management International, Vol. 8, issue 3, pp. 16-21, ISSN 1463-242X.

224. Vuorisalo, M. (2008): *Implementation of Water Mist System in Road Tunnels – Project Case Studies*, dobiven od Marioff Corp. Oy, Vantaa, Finska.

225. Yuan, L., Lazzara, C.P. (2004): *The Effects of Ventilation and Preburn Time on Water Mist Extinguishing of Diesel Pool Fires*, Journal of Fire Science, 2004 Sept, vol. 22(5), 379-404.

226. Vaari, J. (1999): *Guidelines to large-scale Fire Testing of Water Mist Systems*, TR 433 Approved 1999-10, Nordtest project 1430-99, Finland, ISSN 0283-7234.

227. NFPA 750. (2006): *NFPA 750:2006 - Standard on Water Mist Fire Protection Systems,* NFPA, Quincy, MA, SAD

228. Mawhinney, J.R. (1994): *Water mist suppression systems may solve an array of fire protection problems*, NFPA Journal Vol. 88, No. 3, pp. 46-57.

229. Bobert, M. (2001): *High expansion foam systems for inside air – Literature review and fire tests*, Brandforsk project 609-971, SP Report 2001:01, ISBN 91-7848-842-7.

230. Rudzok, M., Doran, G. (2005): *Brandversuche im Runehamar-Tunnel November/ Dezember 2005*, Schmitz Gimaex, Wilnsdorf, Essener Straße 8, 57234 Wilnsdorf.

231. Meeussen, V.J.A., Reichsthaler, G., Kern, H., Oude Essink, M.P., and Derikx, B. (2008): *The Effect of a Water Mist system on larges-scale Tunnel Fires*, Proc. of the ITA COSUF Workshop on Safety and Security of Railway and Metro Tunnels, Graz, Austria, 23rd April 2008.

232. Lemaire, A.D., Meeussen, V.J.A. (2008): *Effects of water mist on real large tunnel fires: Experimental determination of BLEVE-risk and tenability during growth and suppression*, Efectis Nederland report 2008-Efectis-R0425, No. 2007461.

233. Kenneth, H. (2007): *Effectiveness of Fire Detection and Fixed Fire Fighting Systems in Road Tunnels*, PIARC Int. Workshop "State of the Art of Fire Safety in Road Tunnels", Zagreb, 8-9. February 2007.

234. HI-FOG (2009): *Water mist fire protection for road tunnels*, Protecting underground traffic from fire, Tehnički prospect 2204A-EN © 2009, Marioff Corp. Oy.

235. Mawhinney, J.R. (2007): *Evaluating the performance of water mist systems in road tunnels*, IV Congreso bienal apici ingeniería de PCI, Madrid, 21-23 febrero 2007.

236. Arvidson, M. (2009): *Large scale ro-ro deck fire suppression tests*, SP Report 2009:29, SP Technical Research Institute of Sweden.

237. FP51/3/2/Rev.1 (2006): *Assessment of the fire behaviour of cargo loaded on ro-ro vehicle decks in relation to the design standards for fire extinguishing systems*, Submitted by the U.K. to IMO Sub-Committee meeting FP51 on Fire Protection, 27 November 2006.

238. Starke, H. (2010): *Fire Suppression in Road Tunnel Fires by Water Mist System – Results of the SOLIT Project*, Proc. from the 4th Int. Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt a/M, March 17-19, 2010, pp 311-321.

239. Häggkvist, A. (2009): *Fixed Fire Fighting Systems in road tunnels – An overview of current research, standards and attitudes*, MSc, Luleå University of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering, 2009:113 - ISSN: 1402-1552 - ISRN: LTU-DUPP-09/113-SE.

240. Leuckner, R., Kratzmeir, S. (2011): *Fire Tests for Water Mist Fire Suppression Systems*, 42-55, Tunnel 8/2011.

241. Williams, P., Johnson, P., Treldal, J., Randrup-Thomsen, S. (2010): *Development of Conceptual Risk and Safety Strategies for the Fehmarnbelt Fixed Link Tunnel*, Proc. of the 5th Int. Conference on Tunnel Safety and Ventilation, 3-4.5.2010., Graz, pp. 52-59.

242. Dix, A. (2010): *Tunnel Fire Safety in Australasia*, Proc. from the 4th Int. Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt a/M, March 17-19, 2010, pp 70-79.

243. Rogner, A. (2010): *Safety and Reliability of Fire Detection Systems in Road Tunnels*, Proc. from the 4th Int. Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt a/M, March 17-19, 2010, pp 561-564.

244. CEN/TS 14816:2008: *Fixed firefighting systems – Water spray systems – Design, installation and maintenance.*

245. EN 12845:2004+A2:2009: *Fixed firefighting systems – Automatic sprinkler systems – Design, installation and maintenance.*

246 Lozica, M., Drakulić, M. (2002): *Suvremeni sustavi vatrodojave u cestovnim tunelima*, Zbornik radova znanstveno-stručnog savjetovanja "Sigurnost u okolišu i graditeljstvu", SUN ARH, d.o.o., Zagreb, 2002. 288.-294.

247. FprCEN/TS 14972:2010: *Fixed firefighting systems – Watermist systems – Design and installation.*

248. NFPA 15 (2007): *NFPA 15:2007 - Standard for Water Spray Fixed Systems for Fire Protection,* NFPA, Quincy, MA, SAD

249. NFPA 16 (2007): *NFPA 16:2007 - Standard for the Installation of Foam-Water Sprinkler and Foam-Water Spray Systems,* NFPA, Quincy, MA, SAD.

250. VdS CEA 4001en:2008-11 (03): *VdE CEA Guidelines for Sprinkler Systems - Planning and Installation.*

251. Kumm, M., Bergquist, A. (2010): *Fire and Rescue Operations during Construction of Tunnels*, Proc. from the 4th Int. Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt a/M, March 17-19, 2010, pp 383-395.

252. Kohl K. J. , Kutz, M., Wienecke F. (2005): *Die Wirkung von mobilen Abschottungs- und Belüftungsmaßnahmen bei der Rettung und Brandbekämpfung bei Tunnelbränden – Teil 2*, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, FA-Nr. 42 (1/2003) H, ISSN 0170-0060.

253. Pleß, G., Kohl, K. J. (1985): *„Löschintensität, ihre Bedeutung und Berechnung“ und „Neue Berechnungsgrundlagen für das Wasserlöschverfahren“*, Unser Brandschutz (1985) 11, S. 3-8, Berlin.

254. Grimwood, P. (2005): *Fire-fighting Flow-rate*, Barnett (NZ) – Grimwood (UK) Formulae London Fire Brigade (retired), Published January 2005, www.firetactics.com, pristupljeno 15.4.2011.

255. Barnett, C.R. (2004): *Calculation Methods for Water Flows Used for Fire Fighting Purposes*, SFPE (NZ) Technical pub TP 2004/1 www.sfpe.org.nz/index.php/technical/technical_papers/, pristupljeno 15.4.2011.

256. Scheffey, J.L. (2008): *Foam Extinguishing Agents and Systems*, section 17-4 in NFPA Fire Protection Handbook, 20th Ed., ISBN-13: 978-0-87765-758-3, 2008.

257. English, G. (2010): *Incident Management and Tunnel Systems*, Proc. from the 4th Int. Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt a/M, March 17-19, 2010, pp 364-375.

258. Chien, S.W. i sur. (2010): *A Study of Fire Safety Assessment for Road Tunnel in Taiwan*, Proc. from the 4th Int. Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt a/M, March 17-19, 2010, pp 135-142.

259. Kaiser, C. (2010): *From the Classical Fire-fighting Water Supply to Structure and Smoke-Gas Cooling, Taking the „Gleinalm Tunnel“ as an Example*, Proc. of the 5th Int. Conference on Tunnel Safety and Ventilation, 3-4.5.2010., Graz, pp. 123-130.

260. Regent, A. (2007): *JOIFF-ov standardni priručnik o osobnoj zaštitnoj opremi (OZO) za zaštitu od topline i plamena*, HVZ i Veleučilište u Rijeci, Zagreb 2007. *(Prijevod i obrada)*

261. Kroemer, K.H.E., Grandjean, E. (1999): *Prilagođavanje rada čovjeku: ergonomski priručnik*, ISBN 953-191-096-0, Split, 1999.

262. Parsons, K.C. (2003): *Human Thermal Environments*, ISBN 0-415-23793-9, London & New York, 2003.

263. Donovan, K.J. (2004): *prEN 469:2002 Protective Clothing for Firefighters – Performance requirements for protective clothing for firefighting – A critical review*, report No. 2-2004 (Abridged), Human Vertex Ltd., U.K.

264. Digges, K.H. i sur. (2007): *Improving Survivability in Motor Vehicle Fires*, International Interflam Conference, 11th Proceedings. Volume 1. Sept. 3-5, 2007, London, pp 135-143.

265. Šmejkal, Z. (1991): *Uređaji, oprema i sredstva za gašenje i zaštitu od požara*, ISBN 86-80907-11-1, SKTH, Zagreb 1991.

266. Wetzig, V., Iglesias, E., Wietek, M. (2010): *Fire fighter Training in enclosed spaces – Experiences of Hagerbach Test Gallery, Switzerland*, Proc. from the 4th Int. Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt a/M, March 17-19, 2010, pp569 -572.

267. DZS (2011): *Popis stanovništva, kućanstava i stanova 2011., Prvi rezultati po naseljima*, Statistička izvješća 1441/2011, Državni zavod za statistiku RH, ISSN 1332-0297, Zagreb 2011.

268. Merzagora, E.A. (2009): *Road tunnels in Slovenia*, 13th version-September 2009, www.lotsberg.net, pristupljeno 16.5.2011.

269. Bergqvist, A. (2003): *What can the fire brigade do about catastrophic tunnel fires?* Int. Symposium on Catastrophic Tunnel Fires (CTF), 161-175, Borås, Sweden, 2003.

270. NFPA 1710 (2010): *NFPA 1710:2010 - Standard for the Organization and Deployment of Fire Suppression Operations, Emergency Medical Operations, and Special Operations to the Public by Career Fire Departments,* NFPA, Quincy, MA, SAD.

271. Klein, R.A. (2011): *Save or perish*, Fire & Rescue, 2nd quarter 2011, issue 82, pp. 16-18.

272. IAFC (2011): *Rules of Engagement for Firefighter Survival*, www.iafc.org/MemberCenter, pristupljeno 22.7.2011.

273. Fleming, J. (2004): *What Can the Service Do About Catastrophic Tunnel Fires* – Boston Fire Dept. Response to Central Artery Tunnel Incidents (A „performance-based" approach), Int. Symposium on Tunnel Safety and Security, 16-17.11.04 Greenbelt, MD, SAD.

274. Burklin, R.W., Purinton, R.G. (1980): *Fire Terms – A Guide to Their Meaning and Use*, NFPA No. SPP-60, ISBN: 0-87765-185-x.

275. Bryant, K. (2002): *Who are you designing your tunnel for?*, Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 17, issue 2, April 2002, pp 133-137.

276. Ingason, H. (2005): *The fire and rescue services cannot extinguish an HGV fire in a tunnel*, BrandPosten No. 32, 2005.

277. Thompson, K. (2008): *Inferno on the Interstate: What Went Wrong*, Published in the April 2008 issue, Popular Mechanics, pristupljeno 14.6.2011., http://www.popularmechanics.com/science/worst_case_scenarios/4252975.html.

278. McGrattan K. B. (2008): *Numerical Simulation of the Caldecott Tunnel Fire*, April 1982, Fire Research Division, Building and Fire Research Laboratory, December 2005, U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology.

279. Brekelmans, J., v.d. Bosch, R. (2004): *Summary of Large Scale Fire Tests in the Runehamar Tunnel in Norway*, Tech. report by UPTUN, TNO, Promat, 2004.

280. Polajnar, I, Mišina, N. (2010): *Najnovija dostignuća kod osobne zaštitne opreme zavarivača*, Zbornik radova 3. Međunarodnog stručno-znanstvenog skupa "Zaštita na radu i zaštita zdravlja", Zadar 22-25.9.2010., pp 357-366, ISBN 978-953-7343-40-8.

281. ISO 6780:2003, *Flat pallets for intercontinental materials handling – Principal dimensions and tolerances*

282. IMO MSC/Circ. 914: *Guidelines for the Approval of Alternative Fixed Water-Based Fire-Fighting Systems for Special Category Spaces*, London 4 June 1999.

283. IMO MSC/Circ. 1272: *Guidelines for the Approval of Fixed Water-Based Fire-Fighting Systems for Ro-Ro Spaces and Special Category Spaces Equivalent to that Referred to in Resolution A.123(V)*, London 4 June 2008.

284. Sheppard, D.T.(1998): *Fire Tests on Wood Pallets*, Test Report NC1838-97NK31290, prepared by Underwriters Laboratories, Northbrook, IL, SAD.

285. ANSI/FM (2007): *American National Standard for Classification of Idle Plastic Pallets as Equivalent to Wood Pallets*, ANSI/FM Approvals 4996, Norwood MA 02062, SAD.

286. COST IFER (2012): *Integrated Fire Engineering and Response (IFER)*, http://www.cost.eu/domains_actions/tud/Actions/TU0904, pristupljeno 4.1.2012.

287. COST 284/09 (2009): *Memorandum of Understanding for the implementation of a European Concerted Research Action designated as COST Action TU0904: Integrated Fire Engineering and Response*, COST 284/09, Brussels 2009.

288. ISO 3941:2007*, Classification of fires.*

289. Arvidson, M. (2007): *Efficacy of water spray fire-fighting systems in ships can be measured*, BrandPosten No. 36, p12, 2007.

290. NFPA 30 (2008): *NFPA 30:2008 - Flammable and Combustible Liquids Code,* NFPA, Quincy, MA, SAD.

291. CCPS, 1993: *Guidelines for Safe Automation of Chemical Processes*, Wiley-AIChE, ISBN: 0-8169-0554-1.

292. Adams, J., Thompson, M. (2002): *Taking account of societal concerns about risk – Framing the problem*, Research Report 035, ISBN 0 7176 2153 7.

Napomena: Sve citirane europske norme (EN) prihvatio je Hrvatski zavod za normizaciju (HZN) u neizmijenjenom obliku kao hrvatske norme (HRN EN)

Popis oznaka

Latinične oznake

Oznaka	Značenje	Jedinica
A	površina	m^2
A_{tun}	površina poprečnog presjeka tunela	m^2
$AADT$	prosječan godišnji dnevni promet	vozila/dan
c_p	specifični toplinski kapacitet	kJ/kgK
D	promjer	m
E_{O2}	konstanta potroška kisika ($13{,}1 \cdot 10^3$)	kW/kg O_2
E_{tot}	ukupni sadržaj topline	GJ
F	frakcionalna doza	1/min
g	gravitacijska akceleracija (9,81)	m/s^2
H	visina	m
H_c	toplina izgaranja (donja ogrijevna moć) goriva	kJ/kg
h	entalpija	kJ/kg
h_o	entalpija otparka	kJ/kg
h_t	entalpija tekućine	kJ/kg
HRR	toplinska snaga (Heat Release Rate)	kW
K	faktor konfiguracije (oblika)	–
L	duljina	m
L_{tun}	duljina tunela	km
L_v	latentna toplina isparivanja (evaporacije)	kJ/kg
m_o	masa otparka	kg
m_{O_2}	maseni potrošak kisika	kg/s
m_t	masa tekućine	kg
$\dot{m}$	maseni protok	kg/s
$\dot{m}_{air}$	maseni protok zraka	kg/s
$\dot{m}_f$	maseni potrošak goriva	kg/s
p	tlak	Pa
Q	toplinska snaga (HRR)	kW
$\dot{q}''$	toplinski tok	kW/m^2
R	brzina regresije (brzina izgaranja) goriva	mm/min
r_o	toplina isparivanja	kJ/kg
t	vrijeme	s
T	termodinamička temperatura	K
T_a	temperatura okolnog zraka	K
u	brzina strujanja zraka	m/s
$\dot{V}$	volumni protok	m^3/s
Fr	Froudeova značajka	–
Gr	Grashofova značajka	–
Re	Reynoldsova značajka	–
Ri	Richardsonova značajka	–

Grčke oznake

Oznaka	Značenje	Jedinica
Δ	razlika	–
ε	emisijski koeficijent zračenja	–
η	stupanj efikasnosti izgaranja	–
λ	faktor pretička zraka	–
ϑ	temperatura	°C
ρ	specifična gustoća	kg/m^3
σ	konstanta zračenja apsolutno crnog tijela (Stefan-Boltzmannova konstanta x 10^{-8}), 5,67	W/m^2K^4

Indeksi (donji)

Oznaka	Značenje
air	zrak
burn	izgaranje
E	vanjski
F	gorivo
Ih	onesposobljenost toplinom
L	gubici
max	maksimalna vrijednost
O_2	kisik
R	radijacija
tot	ukupno
∞	granična vrijednost za neograničenu veličinu

Indeksi (gornji)

Oznaka	Značenje
$\cdot$	označava promjene, kao npr. $\dot{m}$ (kg/s)
"	dvije crtice, označava „po jedinici površine“

Popis slika

Slika 1.1. Tipične kombinacije HGV s i bez prikolica u Švedskoj i Finskoj 3
Slika 1.2. Tipični HGV kakav se koristi u cijeloj Europi. Gornja ploha i obje bočne strane tereta pokrivene su ceradom 3
Slika 1.3. Trendovi u teretnom prometu (tone-kilometri), Zap. Europa, 1970=100 8
Slika 2.1. Deset *HRR* krivulja dobivene ispitivanjima u Europi 14
Slika 2.2. Skica tunela Ofenegg 15
Slika 2.3. Skica tunela Repparfjord 20
Slika 3.1. Faktori sigurnosti u tunelu 37
Slika 3.2. Sustav sigurnosti prema EU Direktivi 38
Slika 3.3. Sigurnosna dokumentacija prema EU Direktivi 38
Slika 3.4. Sastavni dijelovi sustava sigurnosti tunela 39
Slika 3.5. Klasifikacija tunela u Japanu 47
Slika 3.6. Primjer japanskog tunela klase AA opremljenog sigurn. uređajima i instalacijama 47
Slika 4.1. Okvir za rizike i njihovu prihvatljivost 52
Slika 4.2. Primjer FN krivulje s ucrtanim kriterijem (točkom i linijom), prema HSE 55
Slika 4.3. Rezultati QRA različitih scenarija za Tauern tunel 59
Slika 5.1. Shematski prikaz faza razvoja požara 67
Slika 5.2. Oslobađanje toplinske energije kod različitih brzina rasta požara 68
Slika 5.3. Prikaz krivulja za aproksimaciju *HRR* s protekom vremena 71
Slika 5.4. Standardne projektne požarne krivulje za tunele 73
Slika 5.5. Razmještaj goriva i ciljnih objekata u testu prijenosa požara u tunelu Runehamar 74
Slika 5.6. Shematski prikaz širenje dima bez i s uzdužnom ventilacijom 78
Slika 5.7. Količina proizvedenog dima ovisno o *HRR* 79
Slika 5.8. Promjena volumnog protoka dimnih plinova s udaljenošću 80
Slika 5.9. Faktor oblika za izmjenu topline između 2 jednakih planparalelnih ploha 81
Slika 5.10. Toplinsko zračenje pri različitim temperaturama plamena i udaljenostima 81
Slika 5.11. Vrijeme tolerancije neodjevenog čovjeka koji miruje na konvekcijsku toplinu zraka male brzine (do 0,5 m/s) 83
Slika 5.12. Vrijeme do nastupa snažne boli u koži zbog toplinskog zračenja 83
Slika 5.13. Veza između vršne *HRR* i sadržaja topline za osobne automobile i HGV 87
Slika 5.14. Usporedba krivulje Runehamar sa standardnim krivuljama požara 88
Slika 5.15. Event tree za scenarije s benzinom 92
Slika 5.16. Postotak otparka (adijabatski) u odnosu na temperaturu tekućeg medija 94
Slika 5.17. Brzina isparivanja lokve propana na različitim podlogama 94
Slika 5.18. Idealni nadtlakovi udarnog vala prema skaliranoj udaljenosti od centra na otvorenom 96
Slika 5.19. Event tree za scenarije s ukapljenim propanom 99
Slika 6.1. Brzina porasta *HRR* kao funkcija uzdužne brzine strujanja zraka 107
Slika 6.2. Širenje požara u procjepu između vertikalno složenih kartonskih kutija – snimljeno u vremenskoj sekvenci od 50 s 111
Slika 6.3. Udio dotoka vode koji prodire u kanal 112
Slika 6.4. Ispitivanje površinskog močenja nagnute goruće površine zapaljivih tvari 113
Slika 6.5. Procjena učinkovitosti vatrogasnih pjena na polarnim otapalima 117
Slika 6.6. Krivulje temperature pri eksperimentu s CAFS u tunelu Runehamar 129

Slika 6.7. Potencijalna *HRR* testnog goriva za dvije veličine tereta i dva načina izlaganja 133
Slika 6.8. Žarište u trenutku aktiviranja FFFS (test bez pokrova na maketi žarišta) 133
Slika 6.9. Tok ukupne *HRR* pri požarnim testovima bez pokrova na maketi HGV 134
Slika 6.10. Tok ukupne *HRR* pri požarnim testovima s pokrovom na maketi HGV 134
Slika 6.11. Toplinska snaga *HRR* i ukupno oslobođena energija E_{tot} prema dvije metode izračuna 135
Slika 6.12. Usporedba *HRR* s uporabom sustava vodene magle i pri slobodnom gorenju 136
Slika 6.13. Temperature na 20 m niz vjetar od pokrivenog žarišta 136
Slika 6.14. Usporedba toplinskog toka na uzvjetrenoj i nizvjetrenoj strani žarišta s i bez sprinklera 137
Slika 6.15. Potrebni protoci vatrogasne vode u funkciji tlocrtne površine 144
Slika 6.16. Opći prikaz ovisnosti vremena gašenja o gustoći primjene pjene 146
Slika 6.17. Ukupna potrošnja vatrogasnog medija u ovisnosti o vremenu gašenja 146
Slika 8.1. Raspored tereta HGV u testu T1 Runehamar s 10911 kg paleta, 72% mase drvenih, 18% mase plastičnih 166
Slika 8.2. Pogled straga na testnu maketu u tunelu Runehamar 167
Slika 8.3. Maketa tereta HGV u testu T1 Runehamar, prije i nakon testa 167
Slika 8.4. Maketa tereta HGV u testu T1 Runehamar, 5 min (lijevo) i 30 min (desno) nakon početka gorenja 168
Slika 8.5. Konceptualna shema deluge sustava pjene 177
Slika 8.6 Proces razvoja procedure testiranja 178
Slika 8.7 Standardna Euro-paleta 1200 x 800 mm, ISO 6780 179
Slika 8.8 Konceptualni prijedlog požarnog tunelskog testa FFFS za sprječavanje katastrofalnog požara 180

Popis tablica

Tablica 1.1. Značajni požari u cestovnim tunelima 4
Tablica 1.2. Broj cestovnih tunela i gustoća prometa po zemljama 6
Tablica 1.3. Procjena direktnih troškova požara u SAD za godinu 2005. 9
Tablica 2.1. Znanstveno usmjerena požarna ispitivanja u velikom mjerilu od 1965. nadalje 13
Tablica 2.2. Relevantni podaci ispitivanja u tunelu Ofenegg 1965. 16
Tablica 2.3. Neki relevantni podaci iz ispitne serije 21
Tablica 2.4. Ispitni program u tunelu Memorial s različitim tipovima ventilacije 24
Tablica 2.5. Dio ispitivanja na 2nd Benelux tunelu 26
Tablica 2.6. Ispitivanja na Runehamar tunelu 28
Tablica 3.1. Europski istraživački projekti o sigurnosti tunela 36
Tablica 3.2. Usporedba zahtjeva EU Direktive, hrvatskog Pravilnika, NFPA standarda, uputa PIARC, na temelju Cornell s dopunama 42
Tablica 3.3. Usporedba nacionalnih zahtjeva za izvorima vode za gašenje požara i hidrantsku mrežu 45
Tablica 3.4. Usporedba nacionalnih zahtjeva za FFFS 45
Tablica 3.5. Sigurnosne instalacije u cestovnim tunelima u Japanu 46
Tablica 3.6. Usporedba nacionalnih zahtjeva i zahtjeva EU Direktive za toplinskom otpornošću ventilatora 48
Tablica 4.1. Opasni scenariji sa zapaljivim i eksplozivnim tvarima 50
Tablica 4.2. Opasni scenariji s ispuštanjem opasnih (toksičnih) tvari 50
Tablica 4.3. Scenariji opasnih događaja u tunelima 55
Tablica 4.4. Raspodjela opasnih scenarija u tunelima za QRA 57
Tablica 4.5. Kategorije ograničenja za promet opasnih tvari u tunelima 57
Tablica 4.6. Redefiniranje vjerojatnosti (EV) za Tauern tunnel 58
Tablica 4.7. Vjerojatnosti događaja 59
Tablica 5.1. Moguće toplinske snage požara 61
Tablica 5.2. Izgorjela količina goriva $\dot{m}_f$, kg/min, za neke *HRR* 62
Tablica 5.3. Površine izgaranja u tunelu i požarni potencijal reprezentativnih goriva 65
Tablica 5.4. Vrijednosti koeficijenta rasta požara ($\alpha_{g,q}$) 67
Tablica 5.5. Izrazi koji opisuju cijelu projektnu krivulju *HRR* za tunele 69
Tablica 5.6. Dodatni podaci na bazi francuskih propisa 70
Tablica 5.7. Predloženi parametri za odabir projektnog požara u tunelu 70
Tablica 5.8. Vršne *HRR* i brzina rasta požara u testovima Runehamar 71
Tablica 5.9. Primjeri požarnih scenarija i njihova veza s krivuljama rasta temperature 74
Tablica 5.10. Utjecaj dimnih plinova na prijenos požara na ciljni objekt u tunelu Runehamar 75
Tablica 5.11. Približna količina dimnih plinova u tunelskom požaru 79
Tablica 5.12. Utjecaj toplinskog zračenja na osoblje vatrogasne postrojbe 84
Tablica 5.13. Izlaganje ljudskog tkiva do opeklina 2. stupnja 84
Tablica 5.14. Toplinske snage požara: izmjerene vrijednosti i neke preporuke 85
Tablica 5.15. Bitni parametri požara u tunelima pri raznim testovima 86
Tablica 5.16. Sumarni prikaz bitnih podataka o požarima na različitim vozilima 87
Tablica 5.17. Procijenjeni sadržaj topline i snaga požara u stvarnim požarima s nekoliko HGV 88
Tablica 5.18. Parametri požara lokve u „event tree“ analizi 91
Tablica 5.19. Učinci udarnog tlaka na ljude 97
Tablica 6.1. Dominantni mehanizam prijelaza topline prema promjeru lokve 106

Tablica 6.2. Usporedba ventilacijskih sustava za 3 najpoznatija katastrofalna požara 107
Tablica 6.3. Utjecaj uzdužnog nagiba kolnika u tunelu s jednosmjernim prometom 109
Tablica 6.4. Tipične performanse za različite vrste pjenila 119
Tablica 6.5. Tuneli s ugrađenim stacionarnim sustavom za gašenje požara 123
Tablica 6.6. Testovi gašenja pjenom u Memorial tunelu 125
Tablica 6.7. Učinci supresije sustava vodene magle 126
Tablica 6.8. Apsolutno minimalne potrebe za vodom pri gašenju požara vozila 143
Tablica 6.9. Brzina kretanja i doseg intervencijske ekipe u tunelu 143
Tablica 6.10. Relacije između površine izgaranja i protoka vatrogasne vode 145
Tablica 6.11. Protoci vode za gašenje požara 145
Tablica 6.12. Gustoće primjene vatrogasne vode, L/m^{2}min 147
Tablica 6.13. Gustoće primjene vatrogasne pjene, L/m^{2}min otopine 147
Tablica 7.1. Scenariji djelovanja vatrogasne službe 152
Tablica 7.2. Vatrogasno osoblje zaposleno kod operatora tunela u RH i trošak 157

Prilozi

Rječnik manje poznatih termina u inženjerstvu sigurnosti i zaštite

Svrha definiranja izraza koji se koriste u disertaciji, uobičajenih u području sigurnosti, zaštite od požara, vatrogastvu i pri procjeni rizika, je da se izbjegnu mogući nesporazumi i nejasnoće prilikom čitanja rada. Neke od definicija preuzete su iz navedenih izvora direktno, a neke su modificirane. Također, neki termini definirani su posve općenito, a neki iz specifičnog aspekta sigurnosti tunela.

1. Sigurnost

Opasnost (Hazard) je mogućnost da nastane šteta kao posljedica neke osobine ili sklonosti nečega da prouzrokuje štetu [95].

Akcident (Accident):
Incident ili nezgoda za kojim slijedi razvoj nesigurnih situacija za ljude u tunelu i/ili za tunelsku građevinu i pripadne instalacije [95].

Rizik (Risk):
Kombinacija vjerojatnosti nastupa štetnog događaja i veličine nastale štete. Rizik je proporcionalan umnošku vjerojatnosti nastupa štetnog događaja u nekom vremenskom periodu i vrijednosti štete koja je posljedica tog događaja [76].

Analiza rizika (Risk Analysis):
Sustavna uporaba raspoloživih informacija za identifikaciju opasnosti i procjenu rizika [76].

Procjena rizika (Risk Assessment):
Cjelokupni proces koji obuhvaća analizu rizika i vrednovanje rizika [76].

Vrednovanje rizika (Risk Evaluation):
Procedura bazirana na analizi rizika da se odredi da li je postignuta prihvatljiva razina rizika [76].

Sigurnost (Safety):
Odsutnost neprihvatljivog rizika [76].

Analiza sigurnosti (Safety Analysis):
Sustavna uporaba raspoloživih informacija za identifikaciju opasnosti i procjenu razine sigurnosti [76].

Procjena sigurnosti (Safety Assessment):
Cjelokupni proces koji obuhvaća analizu sigurnosti i vrednovanje sigurnosti [76].

Vrednovanje sigurnosti (Safety Evaluation):
Procedura bazirana na analizi sigurnosti da se odredi da li je postignuta odsutnost neprihvatljive razine rizika [76].

Upravljanje sigurnošću (Safety Management):
Sustavan proces koji poduzima organizacija koja upravlja tunelom (operator) zbog postizanja i održavanja prihvatljive razine sigurnosti [76].

Analiza scenarija (Scenario Analysis):
Analiza posljedica širokog raspona akcidenata u tunelu [76].

Tunelski sustav (Tunnel System):
Obuhvaća tunelsku građevinu, tunelske instalacije, unutarnju i vanjsku infrastrukturu tunela, uporabu tunela i organizaciju koja upravlja tunelom (operatora tunela) [76].

2. Klasifikacija požara

Prema vrsti gorive tvari i karakteristikama izgaranja, požari su svrstani u pet klasa: A, B, C, D i F [288].

Klasa A:
Požari čvrstih tvari, najčešće organske prirode, normalno gore plamenom i ostavljaju žar, npr. drvo, tkanine i papir. Uobičajeno se gase vodom.

Klasa B:
Požari tekućina ili taljivih krutina (npr. nafta i derivati, boje, masti, termoplastične mase). Uobičajeno se gase pjenom, prahom, CO_2 i drugim inertnim plinovima, te „čistim agensima“ (zamjenama za halone).

Klasa C:
Požari plinova (npr. metan, propan, butan). Uobičajeno se gase prahom, CO_2 i drugim inertnim plinovima, te „čistim agensima“ (zamjenama za halone).

Klasa D:
Požari lakih metala (npr. aluminij, magnezij i legure). Uobičajeno se gase specijalnim prahovima ili suhim pijeskom.

Klasa F:
Požari biljnih i životinjskih ulja i masnoća (obično u kuhinjama). Uobičajeno se gase posebnim agensima.

3. Stacionarni sustavi[286] za gašenje požara vodom/pjenom (FFFS[287]) i ciljevi vatrogasnog djelovanja u tunelu

Stacionarni (fiksni) sustav (FFFS):
To je vatrogasni sustav u cestovnom tunelu trajno pričvršćen za tunelsku građevinu, koji se sastoji od cijevne mreže s fiksnim izvorom vode ili drugog vatrogasnog medija, i koji, kad se aktivira, djeluje s namjerom da smanji brzine odavanje topline i porasta požara time što izbacuje vodu/medij za gašenje direktno na žarište. Primjeri su sprinkler, deluge, vodena magla i sustav pjene [215].

[286] U hrvatskoj struci zaštite od požara i u vatrogastvu tradicionalno se koristi potpuno neadekvatan termin „stabilni sustavi“ za stacionarne (fiksne) sustave.
[287] FFFS – Fixed Fire Fighting System.

Sprinkler sustav:
To je cijevni sustav koji sadrži izvor(e) vode potrebnog tlaka i protoka, alarmni sprinkler ventil (1 ili više), cijevnu mrežu u štićenom objektu, sprinklere (mlaznice) i pomoćne uređaje, a namijenjen je za detekciju požara i gašenje požara u najranijoj fazi ili za ograničavanje snage požara tako da se konačno gašenje može izvesti drugim sredstvima [245]. Sprinkler u sprinkler sustavu zatvoren je malenim pladnjem koji zatvara otvor za istjecanje vode[288]. Otvor se otvara pucanjem staklene ampule ili popuštanjem rastalnog spoja na unaprijed zadanoj standardiziranoj temperaturi.

Naplavni (Deluge ili drencher) sustav:
To je cijevni sustav koji se sadrži izvor(e) vode potrebnog tlaka i protoka, sklop deluge ventila (1 ili više), cijevnu mrežu u štićenom objektu, otvorene sprej-mlaznice ili otvorene sprinklere i pomoćne uređaje, a namijenjen je za gašenje požara u najranijoj fazi, karakteriziran time da se sve mlaznice aktiviraju istodobno [244] Aktivira se automatski pomoću detekcijsko-alarmnog sustava ili ručno. Drugi naziv je sustav raspršene vode. Vrlo sličan je waterspray system, koji obično služi za hlađenje površina izloženih utjecaju plamena i/ili toplinskog zračenja.

Vodena magla (sustav) (Watermist ili mist):
To je cijevni sustav koji sadrži izvor(e) vode potrebnog tlaka i protoka, sklop upravljačkog ventila, cijevnu mrežu u štićenom objektu, otvorene ili zatvorene[289] mist-mlaznice i pomoćne uređaje, a namijenjen je za gašenje ili supresiju i držanje pod kontrolom požara u najranijoj fazi, karakteriziran time što je promjer kapljica vode $D_{v0,90}$ mjeren u ravnini na 1 m od mlaznice pri minimalnom radnom tlaku < 1 mm [247].

Sustav komprimirane zračne pjene (CAFS, Compressed Air Foam System):
To je sustav kod kojeg se u otopinu pjene upuhuje komprimirani zrak neposredno nizvodno od mjesta uvođenja pjenila u vodu. Time se dobiva pjena koja je stabilnija od klasične vatrogasne pjene nastale usisavanjem zraka u mlaznicu, koja ima sitnije i homogenije mjehuriće, koja u pravilu ima veću efikasnost nego klasične pjene, te pruža niz drugih prednosti pri gašenju požara.

Ciljevi vatrogasnog djelovanja [227] (Fire performance objectives): sustava vodene magle (ali i drugih sustava) mogu se opisati jednim od sljedeća tri termina:
- Kontrola,
- Supresija,
- Gašenje.

Kontrola požara (Fire control):
Opisuje se kao ograničavanje veličine požara takvom distribucijom vode, da se smanji toplinska snaga požara (*HRR*) i smoče okolne zapaljive tvari, pri čemu se temperatura plinova upravlja (kontrolira) zbog izbjegavanja oštećenja građevine[290]. Kontrola požara se mjeri kroz tri parametra:

[288] U SAD se sprinkler sustav sa zatvorenim sprinklerima naziva automatski sprinkler sustav (automatic sprinkler system)
[289] Mlaznice za vodenu maglu u pravilu su otvorene, pa principijelno djeluju na sličan način kao klasični deluge sustav, ali mogu biti opremljene rasprskavajućim ampulama, pa se onda aktiviraju na isti način kao klasični automatski sprinkler sustav.
[290] Prema [219]. Sličnu definiciju navodi *i* [236], uz napomenu da *HRR* ne raste. Svrha sustava za kontrolu/supresiju požara je da razvoj požara zadrže tako dugo dok se gašenje ne nastavi vatrogasnom „manuelnom“ intervencijom

- Smanjenje toplinske izloženosti građevine, pri čemu je primarni cilj održavanje strukturnog integriteta građevine (tj. onemogućavanje flashovera),
- Smanjenje opasnosti za prisutne osobe, pri čemu je primarni cilj minimiziranje gubitka ljudskih života,
- Smanjenje karakterističnih veličina požara, kao što su toplinska snaga, brzina porasta i širenje požara na okolne objekte.

Prema [289], kontrola požara označava pojavu da je požar ugušen tako da mu je *HRR* smanjena na ½ snage kojom je prethodno slobodno gorio.

Supresija požara (Fire suppression):
To je snažno smanjenje toplinske snage požara (*HRR*) i sprječavanje njegovog ponovnog razbuktavanja [227][291]. Prema [289], supresija požara označava pojavu da je *HRR* požara vrlo brzo smanjena na 1/5 snage kojom je požar slobodno gorio i da mu se ne dozvoljava da se ponovno razbukta.

Gašenje požara[292] (Fire extinguishment):
To je potpuna supresija gorenja nakon koje ne preostaju zapaljive tvari koje dalje gore.

4. Požar zapaljive tekućine i plina

Zapaljive tekućine[293] (Flammable liquids[294]):
To su tvari koje imaju penetraciju veću od 300 jedinica penetracije (1/10 mm) određenu prema normi za ispitivanje bitumena i čiji je tlak pare na 323,15 K (50 ^{o}C) manji od 300 kPa (3 bara), a dijele se prema temperaturi plamišta na upaljive (lako zapaljive) tekućine čija je temperatura plamišta jednaka ili manja 311,15 K (38^{o}C) i gorive tekućine čija je temperatura plamišta iznad 311,15 K (38^{o}C) sukladno hrvatskim normama. Upaljive (lako zapaljive) tekućine dodatno se dijele i prema temperaturi vrelišta sukladno hrvatskim normama.

Požar lokve (Spill fire):
Požar prolivene lako zapaljive tekućine je onaj pri kojem prosječna dubina lokve ne prelazi 25,4 mm (1 in.), a lokva je ograničena jedino konturama površine na kojoj se nalazi [200, 160]. Tekuće gorivo stvara lokvu, a upaljeno može gorjeti plamenom čija je visina 2-3 puta veća od promjera lokve [198, 291][295]. U stvarnim akcidentima lokva nema jednoliku dubinu, već ona ovisi o konfiguraciji terena.

[291] Sličnu definiciju daje i [247], uz napomenu da *HRR* opada
[292] Ovdje se ne misli na gašenje požara kao proces, nego na „ugašenje“ požara. Definicija iz [227]. Sličnu definiciju daje i [247], uz napomenu da potpuno nestaje plamen i tinjanje, a *HRR* se smanjuje na nulu
[293] Prema [155]
[294] Prema [290], definiraju se „flammable liquids“, čija je temperatura plamišta ispod 37,8 ^{0}C (100 ^{0}F) i „combustible liquids“, čija je temperatura plamišta na ili iznad 37,8 ^{0}C (100 ^{0}F), sve pod definiranim uvjetima ispitivanja
[295] Pri ispitivanjima i testovima lokva se redovito simulira čeličnom tavom u kojoj se nalazi tekuće gorivo jednolike dubine (često pluta na vodi), koja može biti veća ili manja od 25,4 mm. Uz to, tava ima rub, koji je nekoliko cm viši od razine goriva, što mijenja uvjete strujanja i izgaranja. Razlog za korištenje tava je želja da rezultati ispitivanja budu reproducibilni, no time se uvjeti ispitivanja donekle udaljavaju od stvarnih. U izvještajima o ispitivanjima u pravilu govori o pool fires, tj. o požarima bazena.

Požar mlaza, baklja (Jet ili spray fire):
To je turbulentan difuzijski plamen nastao kao rezultat izgaranja goriva koje kontinuirano istječe značajnom brzinom iz nekog otvora u određenom smjeru ili smjerovima. Nastaje ispuštanjem obične tekućine, isparivajuće tekućine (2 faze) ili plina [181].

BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion):
Eksplozija ekspandirajućih para kipuće tekućine tipično nastaje zagrijavanjem tlačne posude u kojoj se iznad tekuće nalazi plinovita faza zapaljivog plina (npr. UNP) pri temperaturi koja je znatno iznad njenog normalnog vrelišta pri atmosferskom tlaku [167]. Posljedica je naglo kidanje posude na 2 ili više dijelova [50] i snažna eksplozija zapaljivog plina, pri kojoj nastaje vatrena lopta (tzv. „hot BLEVE“). U literaturi se spominje i „cold BLEVE“, eksplozija spremnika nezapaljivog komprimiranog plina, pri kojoj ne nastaje vatrena lopta i posljedice su manje.

VCE (Vapour Cloud Explosion):
Eksplozija oblaka para, prijelazni požar koji nastaje kao rezultat zapaljenja oblaka plina ili para i nije izložen signifikantnoj akceleraciji zbog utjecaja prostornog ograničenja ili turbulencije [181].

5. Procjena rizika

FN krivulja (FN curve):
Graf koji za niz unaprijed specificiranih opasnosti pokazuje frekvenciju svih događaja koji izazivaju određeni stupanj štete za N ili više ljudi u ovisnosti o N.

Individualni rizik (Individual risk):
Vjerojatnost da bi određena osoba koja se nalazi u nekom fiksnom i određenom odnosu prema opasnosti (npr. na određenoj lokaciji, s određenom razinom osjetljivosti, zaštite i mogućnosti bijega) mogla pretrpjeti određenu razinu štete. Individualni rizik se često određuje kao vjerojatnost da će osoba izgubiti život u vremenskom periodu od godinu dana (tj. postati smrtna žrtva). Iako ljudi mogu biti spremni da se dobrovoljno uključe u aktivnosti koje su povezane s visokim rizikom (npr. slobodno penjanje, alpinizam, letenje padobranom ili zmajem), u pravilu su oni mnogo manje tolerantni za rizike koji su im nametnuti ili nad kojima nemaju kontrolu, osim ako te rizike smatraju zanemarivima. Međutim, unatoč činjenici da ljudi mogu prihvatiti da žive s rizikom koji ne smatraju zanemarivim ako to njima ili društvu pruža izvjesne benefite, oni će normalno željeti da ti rizici budu niski i da su pod kontrolom [95].

Societalni (društveni) rizik (Societal risk):
Odnos između frekvencije i broja ljudi u danoj populaciji koji su zbog realiziranja specificirane opasnosti pretrpjeli neku specificiranu razinu štete. Socetalni rizik često se određuje kao vjerojatnost da će N ili veći broj ljudi izgubiti život u nekom vremenskom periodu (tj. da će postati smrtne žrtve). Societalna zabrinutost ili rizik ili prijetnja nekom opasnošću koja se ispoljava prema društvu može, ako se realizira, imati negativne reperkusije na institucije odgovorne za provođenje mjera ili postupaka za zaštitu ljudi, npr. vladu, upravu ili neko predstavničko tijelo. Ova vrsta zabrinutosti se često povezuje s opasnostima koje su uzrok rizika i koje, kad se dogode, mogu uzrokovati socio-politički odgovor, tj. rizik od događaja koji uzrokuju široko rasprostranjeni strah od istovremenog nastupa većeg broja smrtnih slučajeva. Tipični primjeri su nuklearne elektrane, putovanje željeznicom ili avionom

i genetički modificirani organizmi. Societalna zabrinutost zbog mogućeg stradavanja većeg broja ljudi u jednom događaju naziva se societalni rizik. Stoga je zapravo societalni rizik podgrupa societalne zabrinutosti [95].

ALARP (As Low As Reasonably Practicable[296])

Princip smanjenja rizika ALARP (koliko god je razumno prihvatljivo) ne traži da se rizici smanje koliko je god to fizički moguće, što bi u konačnici asimptotski vodilo prema nultom riziku uz beskonačno velike troškove. Princip ALARP traži manje i bazira se na postavci da se mora provesti izračun u kojem će se na jednu stranu „vage" staviti veličina rizika (moguća šteta), a na drugu stranu žrtva (novčana, vremenska ili smetnja) koja je potrebna za izbjegavanje toga rizika (cost-benefit analiza, CBA) i tada, ako se pokaže velika disproporcija između njih, tj. ako je rizik beznačajan u odnosu na žrtvu, onaj koji je takvu mjeru trebao provesti oslobođen je od odgovornosti, pod uvjetom da je izračun (CBA) napravio prije nego što se akcident dogodio [292].

[296] Koncept ALARP je po prvi puta eksplicitno definiran u sudskom procesu (Edwards protiv The National Coal Board) u Velikoj Britaniji 1949. [92]. Sud je: *Established that a computation must be made in which the* ***quantum of risk*** *is placed in one scale and the* ***sacrifice, whether in money, time or trouble,*** *involved in the measures necessary to avert the risk is placed in the other; and that, if it be shown that there is a gross disproportion between them, the risk being insignificant in relation to the sacrifice, the person on whom the duty is laid discharges the burden of proving that compliance was not reasonably practicable.*

Popis kratica

AADT	Average Annual Daily Traffic
ADR	The European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road
AEGL	Acute Exposure Guideline Levels
AFFF	Aqueous Film-Forming Foam
ALARP	As Low As Reasonably Practicable
AR	Alcohol Resistant (foam)
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion
CAFS	Compressed Air Foam System
CBA	Cost Benefit Analysis
CNG	Compressed Natural Gas
DOE	Department of Energy (SAD)
EPS	Ekspandirani polistiren
ERPG	Emergency Response Planning Guidelines
ETBE	Etil tercijarni butil eter
ETW	Einsatztoleranzwert
EV	Expected Value
FFFP	Film-forming Fluoroprotein (foam)
FFFS	Fixed Fire Fighting System
FP	Fluroprotein (foam)
GVI	Granična vrijednost izloženosti
HGV	Heavy Goods Vehicle
HRR	Heat Release Rate
HSE	Health and Safety Executive
KGVI	Kratkotrajna granična vrijednost izloženosti
MTBE	Metil tercijarni butil eter
MTFVTP	Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program
NFPA	National Fire Protection Association (SAD)
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OZO	Osobna zaštitna oprema
P	Protein (foam)
PAH	Polycyclic Aromatic Hydrocarbons
PDGP	Prosječan dnevni godišnji promet
PE	Polietilen
PIARC	Permanent International Association of Road Congresses
PLDP	Prosječan sezonski dnevni promet (ljetni)
PP	Polipropilen
PS	Polistiren
PU	Poliuretan
PWRI	Public Works Research Institute, Japan
QRA	Quantitative Risk Assessment
SOP	Standardni operativni postupak
TEEL	Temporary Emergency Exposure Limits
TERN	Trans-European Road Network
THC	Total Hydrocarbon Content
TNT	Trinitrotoluol

UNP	Ukapljeni naftni plin
UVCE	Unconfined Vapour Cloud Explosion
VCE	Vapour Cloud Explosion
VdS	Vertrauen durch Sicherheit
VPF	Value for Preventing a Fatality
WBFFS	Water Based Fire Fighting System

Životopis

Aleksandar Regent rođen je u Rijeci 9.11.1949. Osnovnu školu i gimnaziju završio je u Rijeci. Na brodostrojarskom usmjerenju *Strojarsko-brodograđevnog fakultetu u Rijeci* diplomirao je srpnja 1973. godine kao prvi u klasi, a na *Tehnološkom fakultetu u Zagrebu* magistrirao je travnja 1979. na kemijskom inženjerstvu, smjer ekološko inženjerstvo. Na Tehničkom fakultetu u Rijeci izabran u zvanje znanstvenog asistenta travnja 1983. za kolegij *Mehanika fluida*. Na *Veleučilištu u Rijeci* izabran u zvanje *višeg predavača* siječnja 2006. u redovnom radnom odnosu za kolegije: *Osobna zaštitna sredstva i oprema, Upravljanje okolišem, Fizikalne štetnosti* i *Vatrogasna oprema*. Na Tehničkom fakultetu u Rijeci prihvaćena mu je prijava doktorske disertacije po nazivom *„Analiza mjera za prevenciju katastrofalnog požara u cestovnim tunelima"* s mentorom prof. dr. sc. Bernardom Franković i komentorom prof. dr. sc. Vladimirom Medica u prosincu 2007. godine. Oženjen je i otac dvoje odrasle djece.

Aleksandar Regent ima 37 godina radnog staža u industriji, od kojih je nakon nepune godine dana u *Brodogradilištu 3. Maj*, veliku većinu proveo kao odgovorni i vodeći projektant u *Teh-projekt p.o. Rijeka* (skoro 20 godina), a zatim kao direktor *Teh-projekt Inženjering d.o.o*. (do danas). Dugogodišnji je član *NFPA, National Fire Protection Assn., SAD; SZPV, Slovenskog združenja za požarno varnost; HUZOP, Hrvatske udruga za zaštitu od požara;* predsjednik *HZN/TO 21 - Protupožarna i vatrogasna oprema* i *HZN/TO 556 - Osobna zaštitna oprema*; član *HZN/TO 557 - Zaštitna odjeća* i *HZN/TO 207 – Upravljanje okolišem*; ekspert *HAA – Hrvatske akreditacijske agencije.*

Aleksandar Regent bio je član istraživačkog tima na 7 znanstvenih projekata Ministarstva znanosti obrazovanja i športa RH pod vodstvom svojeg sadašnjeg mentora. Objavio je više od 80 stručnih i znanstvenih radova u zemlji i u inozemstvu. Preveo je i obradio kao prvi u svijetu *JOIFF-ov standardni priručnik o osobnoj zaštitnoj opremi (OZO) za zaštitu od topline i plamena*. Koautor je knjige-udžbenika Horvat, J., Regent, A.: *Osobna zaštitna oprema*, izdanje Veleučilište u Rijeci, Rijeka 2009. Upisan u registar znanstvenika RH (111264).

PODACI O AUTORU I DOKTORSKOJ DISERTACIJI

1. AUTOR

Ime i prezime:	Aleksandar Regent
Datum i mjesto rođenje:	9. studeni 1949., Rijeka
Naziv fakulteta, studija i godina završetka dodiplomskog studija:	Strojarsko-brodograđevni fakultet u Rijeci Sveučilišta u Zagrebu, brodostrojarstvo, 1973.
Naziv fakulteta, smjera i godina završetka poslijediplomskog studija:	Tehnološki fakultet u Zagrebu Sveučilišta u Zagrebu, inženjerska kemija, ekološko inženjerstvo, 1979.
Sadašnje zaposlenje:	Veleučilište u Rijeci TPI Teh-projekt Inženjering d.o.o.

2. DOKTORSKA DISERTACIJA

Naslov:	Analiza mjera za prevenciju katastrofalnog požara u cestovnim tunelima
Broj stranica, slika, tablica i bibliografskih podataka:	228, 59, 56, 292
Znanstveno polje i grana:	Interdisciplinarne tehničke znanosti, inženjerstvo okoliša
Voditelj rada:	red. prof. dr. sc. Bernard Franković, dipl. ing. str.
Fakultet na kojem je rad obranjen:	Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet

3. OBRANA I OCJENA

Datum prijave teme:	10. srpnja 2007.
Datum predaje rada:	15. studenog 2011.
Datum prihvaćanja ocjene rada:	
Sastav Povjerenstva za ocjenu:	red. prof. dr. sc. Zmagoslav Prelec, dipl. ing. red. prof. dr. sc. Bernard Franković, dipl. ing. red. prof. dr. sc. Vladimir Medica, dipl. ing. red. prof. dr. sc. Dubravka Bjegović, dipl. ing. izv. prof. dr. sc. Ivan Polajnar, dipl. ing.
Datum obrane:	
Sastav povjerenstva za obranu:	red. prof. dr. sc. Zmagoslav Prelec, dipl. ing. red. prof. dr. sc. Bernard Franković, dipl. ing. red. prof. dr. sc. Vladimir Medica, dipl. ing. red. prof. dr. sc. Dubravka Bjegović, dipl. ing. izv. prof. dr. sc. Ivan Polajnar, dipl. ing.
Datum promocije:	

Oznaka: D.D. Tek. broj: UDK

ANALIZA MJERA ZA PREVENCIJU KATASTROFALNOG POŽARA U CESTOVNIM TUNELIMA

Aleksandar Regent

Sveučilište u Rijeci
Tehnički fakultet
Hrvatska

Ključne riječi: cestovni tunel, katastrofalni požar, prevencija, tehničke mjere, sustavi gašenja, supresija, kontrola, stacionarni sustav, požarni test FFFS

Sažetak:
U radu je napravljen pregled dosadašnjih istraživanja i testiranja tunelskih požara, većih akcidenata koji su se dogodili tijekom posljednjih 60 godina, europskih projekata usmjerenih prema povećanju razine sigurnosti od požara u tunelima, te uspoređeni zahtjevi međunarodno priznatih i nekih važnijih nacionalnih standarda i preporuka o sigurnosti tunela. Analizirani su mogući opasni događaji u cestovnim tunelima i različiti scenariji događanja, a posebna pažnja posvećena je interakciji između tih događaja i tradicionalnih metoda odgovora na njih, uz naglasak na istraživanje požarnih događaja. Dokazano je da je tradicionalnim pristupom, bez primjene stacionarnog sustava za gašenje/supresiju/kontrolu požara, u pravilu nemoguće spriječiti razvoj požara prema katastrofalnom scenariju ako postoje odgovarajući uvjeti za takav razvoj. Također je dokazano da vatrogasne postrojbe koje su nadležne za gašenje pojedinih tunela redovito na raspolaganju imaju nedovoljne količine vode i pjenila za uspješan odgovor na veći požar po dolasku na požarište. U osnovnim crtama prikazan je prijedlog stacionarnog sustava s pjenom za gašenje/supresiju/kontrolu požara u tunelu, te prijedlog novog požarnog testa za međusobnu usporedbu svih vrsta stacionarnih sustava. Ovaj prijedlog može poslužiti kao baza za izradu standardne procedure za testiranje primjenjivosti i učinkovitosti pojedinih stacionarnih sustava za gašenje/supresiju/kontrolu požara. Takva standardna procedura predstavljala bi alat uz čiju bi se pomoć mogle jasno eksperimentalno utvrditi i međusobno usporediti mogućnosti sustava raspršene vode, pjene i vodene magle pri reprezentativnim požarnim scenarijima. U tom smislu bilo bi potrebno na europskoj razini potaknuti daljnji razvoj istraživanja, posebno eksperimentalnih, koja bi dovela do razvoja sigurnosno optimalnih, a ekonomski prihvatljivih rješenja za sprječavanje i/ili ublažavanje najvećeg broja potencijalno opasnih akcidentnih situacija.

Rad nije objavljen.

Mentor: red. prof. dr. sc. Bernard Franković, dipl. ing.
Komentor: red. prof. dr. sc. Vladimir Medica, dipl. ing.

Povjerenstvo za ocjenu: red. prof. dr. sc. Zmagoslav Prelec, dipl. ing.
red. prof. dr. sc. Bernard Franković, dipl. ing.
red. prof. dr. sc. Vladimir Medica, dipl. ing.
red. prof. dr. sc. Dubravka Bjegović, dipl. ing.
izv. prof. dr. sc. Ivan Polajnar, dipl. ing.

Povjerenstva za obranu: red. prof. dr. sc. Zmagoslav Prelec, dipl. ing.
red. prof. dr. sc. Bernard Franković, dipl. ing.
red. prof. dr. sc. Vladimir Medica, dipl. ing.
red. prof. dr. sc. Dubravka Bjegović, dipl. ing.
izv. prof. dr. sc. Ivan Polajnar, dipl. ing.

Datum obrane: Datum promocije:

Rad je pohranjen na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci.
(228, 59, 56, 292, hrvatski jezik)

DD UDK xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

1. Analiza mjera za prevenciju katastrofalnog požara u cestovnim tunelima

I Regent A.

II Sveučilište u Rijeci
Tehnički fakultet
Hrvatska

Ključne riječi:

cestovni tunel, katastrofalni požar, prevencija, tehničke mjere, sustavi gašenja, supresija, kontrola, stacionarni sustav, požarni test FFFS

Code: D.D. No: UDC

AN ANALYSIS OF THE MEASURES FOR PREVENTION OF CATASTROPHIC FIRE IN ROAD TUNNELS

Aleksandar Regent

University of Rijeka
Faculty of Engineering
Croatia

Key words: road tunnel, catastrophic fire, prevention, technical measures, extinguishing systems, suppression, control

Abstract:
In this thesis a review of past research and test experiments with tunnel fires, of major accidents which have happened during the past 60 years, European projects directed towards improving the level of fire safety in road tunnels, comparison of internationally recognized and some major national standards and recommendations on tunnel fire safety have been presented. Dangerous accidents and various risk event scenarios in road tunnels have been analysed, with the particular attention being devoted to the interaction between these events and traditional response methods. Main subject of research have been fire accidents. It has been proven that with traditional approach only, without the application of a stationary system capable of fire extinguishment/suppression/control, it is generally hardly possible to prevent the development of fire towards a catastrophic scenario if favourable conditions leading to such a development prevail at the accident site. The other conclusion which is deemed to have be proven is the fact that fire services in charge of fire protection of the majority of tunnels mainly do not have adequate quantities of water and foam concentrate available at the accident site, which would enable them to successfully tackle a major fire upon their arrival. An outline of a fixed foam firefighting system in a tunnel as well as the outline of a new standard testing procedure for comparing the characteristics of various types of FFFS have been presented. This proposal could be used as a basis for the development of standard procedure for testing of the applicability and efficiency of various stationary systems for fire extinguishment/suppression/control. Such a standard procedure is expected to become a valuable tool capable of providing experimental evaluation and comparison of the capabilities of waterspray, foam and watermist systems at the representative fire scenarios. It has been proposed that further research work, mainly experimental, should be initiated and encouraged on the European level, which would open the way to development of the optimal safety and financially acceptable solutions for preventing and/or resolving the majority of potentially dangerous accident events.

This thesis has not been published.

Mentor: D.Sc. B.ME. Bernard Franković, Prof.
Comentor: D.Sc. B.ME. Vladimir Medica, Prof.

Advisors: D.Sc. B.ME. Zmagoslav Prelec, Prof.
D.Sc. B.ME. Bernard Franković, Prof.
D.Sc. B.ME. Vladimir Medica, Prof.
D.Sc. B.CE. Dubravka Bjegović, Prof.
D.Sc. B.ME. Ivan Polajnar, Associate Prof.

Reviewers: D.Sc. B.ME. Zmagoslav Prelec, Prof.
D.Sc. B.ME. Bernard Franković, Prof.
D.Sc. B.ME. Vladimir Medica, Prof.
D.Sc. B.CE. Dubravka Bjegović, Prof.
D.Sc. B.ME. Ivan Polajnar, Associate Prof.

Presentation: Degree conferred:

This thesis is disposed in the library of the University of Rijeka, Faculty of Engineering.
(228, 59, 56, 292, Croatian language)

DD UDC xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

1. An analysis of the measures for prevention of catastrophic fire in road tunnels

I Regent A.

II University of Rijeka
Faculty of Engineering
Croatia

Key words:

road tunnel, catastrophic fire, prevention, technical measures, extinguishing systems, suppression, control, fixed systems, fire test FFFS