

# Pasivna zaštita od požara u tunelima: zahtjevi za tunelska obloge

---

Runje, Toma

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:804012>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-18**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Toma Runje

**PASIVNA ZAŠTITA OD POŽARA U TUNELIMA:  
ZAHTJEVI ZA TUNELSKÉ OBLOGE**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Toma Runje

**PASIVNA ZAŠTITA OD POŽARA U TUNELIMA:  
ZAHTJEVI ZA TUNELSKÉ OBLOGE**

DIPLOMSKI RAD

Izv.prof.dr.sc. Marija Jelčić Rukavina

Izv.prof.dr.sc. Miodrag Drakulić

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Toma Runje

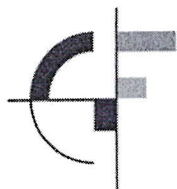
**THE PASSIVE FIRE PROTECTION IN  
TUNNELS: REQUIREMENTS FOR TUNNEL  
LININGS**

MASTER THESIS

Assoc.prof. Marija Jelčić Rukavina

Assoc.prof. Miodrag Drakulić

Zagreb, 2024.



OBRAZAC 2

TEMA DIPLOMSKOG RADA

Ime i prezime studenta: Toma Runje

JMBAG: 0082063573

Diplomski rad iz kolegija: Zaštita od požara

Naslov teme diplomskog rada (HR): Pasivna zaštita od požara u tunelima:  
zahtjevi za tunelske obloge

Naslov teme diplomskog rada (ENG): The passive fire protection in tunnels:  
requirements for tunnel linings

Opis teme diplomskog rada:

Zaštitu od požara neke konstrukcije čine aktivne i pasivne mjere zaštite. U ovom radu potrebno je, temeljem pregleda dostupne znanstvene i stručne literature:

1. opisati problematiku požara u tunelima
2. analizirati zahtjeve za tunelske obloge za pasivnu zaštitu od požara obzirom na:
  - 2.1 materijal,
  - 2.2 način ugradnje i
  - 2.3 dokazivanja očuvanja cjelovitosti na visokim temperaturama.

Datum: 5. travnja 2024.

Mentor: izv.prof.dr.sc. Marija Jelčić Rukavina

Potpis mentora:

Komentor: doc.dr.sc. Miodrag Drakulić



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja:

TOMA RUNDE, 0082063573

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio diplomskog rada pod naslovom:

PASIVNA ZAŠTITA OD POŽARA U TUNELIMA: ZAHTEVI ZA TUNELSKE OBLIGE

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mogega rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

17. 09. 2024.

Potpis:



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Ja:

TOMA RUNJE, 05066030592

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela diplomskog rada i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela diplomskog rada pod naslovom:

PASIVNA ZAŠTITA OD POŽARA U TUNELIMA: ZAHTJEVI ZA TUNELSKJE OPLOGE

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom diplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

MARIJA DELČIĆ RUKAVINA

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

26. 09. 2024.

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio diplomskog rada u cijelosti bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum: 17. 9. 2024.

Potpis:

## ZAHVALE

Dragoj mentorici, izv. prof. dr. sc. Mariji Jelčić Rukavini, veliko hvala na mentorstvu mog diplomskog rada te na prenesenom znanju tijekom studija, koje je uveliko oblikovalo moj daljnji profesionalni put.



## SAŽETAK

Tuneli predstavljaju jedan od ključnih dijelova prometne infrastrukture te se broj istih konstantno povećava. Požari u tunelima mogu uzrokovati značajne ljudske i materijalne gubitke. Kako bi se umanjile posljedice požara, u tunelima se primjenjuju različite aktivne i pasivne mjere zaštite. Naglasak ovog rada je na pasivnim mjerama zaštite koje se odnose na zaštitu sekundarne tunelske obloge. Najveću opasnost predstavlja fenomen eksplozivnog odlamanja betona uslijed djelovanja visokih temperatura. Izvođenjem pasivnih toplinskih barijera u obliku mortova ili obloga te dodavanjem vlakana u sastav betona, znatno se smanjuje rizik od eksplozivnog odlamanja. Prednost zaštitnih sustava u obliku mortova očituje se u jednostavnosti nanošenja i niskoj cijeni. Zaštitne obloge znatno su skuplje te postoji problem njihove degradacije nakon izlaganja djelovanju požara. Zabilježeno je kako se dodatkom  $2.0 \text{ kg/m}^3$  polipropilenskih vlakana u sastav betona znatno smanjuje rizik od eksplozivnog odlamanja pri čemu se kraća vlakna manjeg promjera smatraju najučinkovitijima. Iako su polipropilenska vrlo učinkovita i jeftina, u novije vrijeme istražuje se njihova zamjena polimernim vlaknima iz otpadnih guma. Također, iako postoji pitanje degradacije svojstava betona s dodatkom polipropilenskih vlakana, različitim istraživanjima potvrđeno je kako ne dolazi do smanjenja modula elastičnosti ili tlačne čvrstoće pri izlaganju betona visokim temperaturama.

**Ključne riječi:** tunel, požar, sekundarna tunelska obloga, odlamanje betona, pasivna toplinska barijera, polipropilenska vlakna

## SUMMARY

Tunnels are one of the key components of transportation infrastructure, and their number is constantly increasing. Fires in tunnels can cause significant human and material losses. To mitigate the effects of fires, various active and passive protection measures are applied in tunnels. The focus of this paper is on passive protection measures related to the protection of the secondary tunnel lining. The greatest danger is the phenomenon of explosive spalling of concrete due to the effects of high temperatures. By implementing passive thermal barriers in the form of mortars or protective boards, and by adding fibers to the concrete mix, the risk of explosive spalling is significantly reduced. The advantage of protective systems in the form of mortars lies in their ease of application and low cost. Protective boards are significantly more expensive, and their degradation after exposure to fire is a known issue. It has been recorded that adding  $2.0 \text{ kg/m}^3$  of polypropylene fibers to the concrete mix significantly reduces the risk of explosive spalling, with shorter fibers of smaller diameters being considered the most effective. Although polypropylene fibers are highly effective and affordable, recent research is exploring their replacement with polymer fibers from waste tires. Additionally, despite concerns about the degradation of concrete properties with polypropylene fiber additives, various studies have confirmed that there is no reduction in the modulus of elasticity or compressive strength when concrete is exposed to high temperatures.

**Key words:** tunnel, fire, secondary tunnel lining, concrete spalling, passive thermal barrier, polypropylene fibers

## SADRŽAJ

ZAHVALE .....	i
SAŽETAK .....	ii
SUMMARY .....	iii
<b>1. Uvod – problematika – cilj i struktura rada .....</b>	<b>1</b>
1.1. Požari u tunelima – statistički podatci .....	2
1.2. Presjek tunela.....	7
<b>2. Svojstva požara u tunelima.....</b>	<b>9</b>
2.1. Razvoj i širenje požara .....	12
2.2. Razvoj i širenje dima.....	17
<b>3. Zahtjevi za sigurnost u slučaju požara u tunelima.....</b>	<b>23</b>
3.1. Pasivne mjere zaštite od požara .....	28
3.2. Aktivne mjere zaštite od požara.....	29
<b>4. Tehnologija izvedbe tunela i tunelske obloge .....</b>	<b>31</b>
4.1. Tunelske obloge.....	33
4.1.1. In situ betonske obloge.....	34
4.1.2. Predgotovljene betonske tunelske obloge.....	37
4.1.3. Obloge od mlaznog betona.....	40
4.1.4. Rebrasti sustavi .....	42
4.2. Oštećenja na tunelskim oblogama uzrokovana požarom – odlamanje betona..	43
4.3. Dokazivanje otpornosti na požar tunelskih obloga.....	48
4.3.1. Ispitivanje tunelskih obloga izloženih požaru .....	48
4.4. Načini zaštite tunelskih obloga.....	61
4.4.1. Mortovi, žbuke i premazi – vanjski zaštitni sustavi .....	62
4.4.2. Obloge – vanjski zaštitni sustavi.....	77
4.4.3. Vlakna – unutarjni zaštitni sustav .....	84
<b>5. Zaključak .....</b>	<b>89</b>
<b>POPIS LITERATURE .....</b>	<b>93</b>
<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>102</b>
<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>104</b>

## 1. Uvod – problematika – cilj i struktura rada

Tuneli predstavljaju inženjerske građevine čija je funkcija omogućiti prolaze ispod zemlje, planina ili vode. U modernom prometnom sustavu uloga tunela gotovo je neprocjenjiva. Omogućavaju povezivanje udaljenih i nepristupačnih lokacija, smanjenje udaljenosti putovanja i prometnih zastoja te time i kraće vrijeme putovanja [1]. Tuneli se u cestovnom, željezničkom i vodnom prometu koriste, osim za prijevoz putnika, i za prijevoz različitog tereta i robe, što ih čini jednim od vitalnih dijelova infrastrukture. Gradnja tunela zahtijeva složene inženjerske pristupe i tehnologije kako bi se osigurala stabilnost i funkcionalnost te sigurnost. Osim sigurnosti u statičkom ili geotehničkom pogledu bitan aspekt sigurnosti predstavlja sigurnost u slučaju požara.

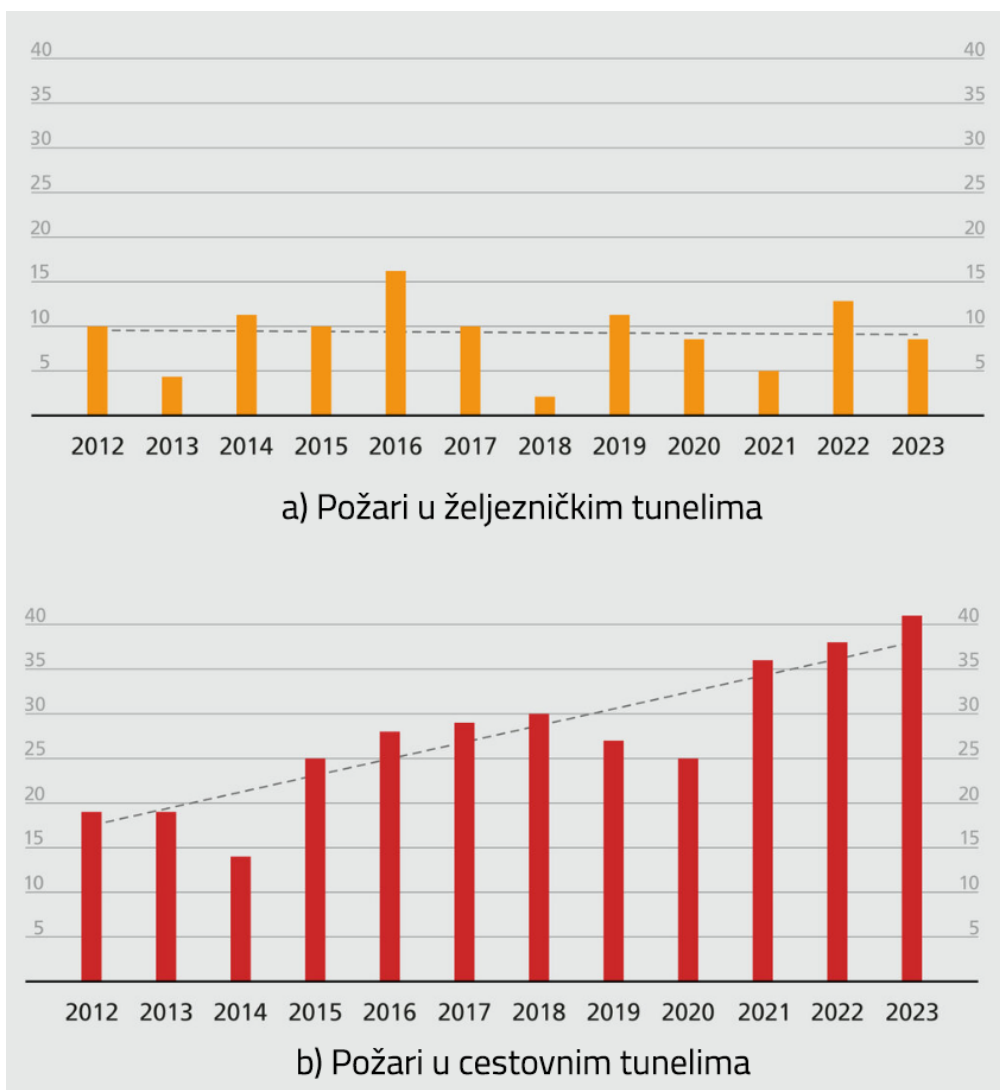
Požari u tunelima mogu uzrokovati značajne gubitke. Primarni je cilj izbjeći ljudske žrtve ali i materijalnu štetu na vozilima, teretu koji se prevozi i dijelovima tunela. Također, osim spomenutih gubitaka potrebno je uzeti u obzir i gubitke uslijed zatvaranja tunela u vremenskom razdoblju sanacije, tzv. indirektno gubitke, koji često mogu biti veći od samih troškova sanacije [2]. Napretkom tehnologije i masovnom proizvodnjom, broj vozila i gustoća prometa konstantno se povećava, a takav trend prati i razvoj cestovne i željezničke infrastrukture čiji dijelovi su i sami tuneli. Ti faktori utječu na konstantno povećanje godišnjeg broja požara u tunelima te je od izrazite važnosti osigurati kvalitetne i odgovarajuće mjere zaštite od požara kako bi se osigurala sigurnost ljudi i minimalizirala materijalna šteta. Sukladno tome, u praksi se koriste različite pasivne i aktivne mjere zaštite od požara s ciljem smanjenja vjerojatnosti nastanka i razvoja požara, sprječavanja širenja požara i dima te osiguravanja sigurne evakuacije svih ljudi u tunelima [3]. Osnovni cilj rada je, temeljem dostupne stručne i znanstvene literature, dati uvid u zahtjeve za projektiranje tunelskih obloga s aspekta zaštite od požara.

## 1.1. Požari u tunelima – statistički podatci

Trenutno se europskim zemljama ne vodi jedinstvena baza požarnih incidenata općenito, pa tako ni za požarne incidente u tunelima. Nadalje, svaka zemlja ima svoju metodologiju vođenja statističkih podataka tako da je međusobna usporedba teška. Istraživanje provedeno na temelju medijskih vijesti u Švicarskoj, Njemačkoj i Austriji zabilježilo je 439 požara u tunelima kroz period od 2012. do 2023. godine [4]. godine što su u prosjeku tri požara mjesečno kao što je prikazano na slici 1.

Cestovni tuneli	90	148	93	331
Željeznički tuneli	6	88	14	108
Ukupno	96	236	107	439
Broj požara mjesečno	0,7	1,6	0,7	3,0
	Švicarska	Njemačka	Austrija	Ukupno

Slika 1. Statistički podatci o broju požara u tunelima u Švicarskoj, Njemačkoj i Austriji [4] Općenito, zbog većeg broja vozila i gustoće prometa te većeg broja tunela dolazi do nastanka gotovo tri puta više požara u cestovnim tunelima u odnosu na željezničke. Razlog tome je što u željezničkim tunelima vožnju prijevoznim sredstvom obavljaju isključivo profesionalci, a trajektorije vožnje su zadane. Slika 2 prikazuje godišnji broj požara u željezničkim i cestovnim tunelima u periodu od 2012. do 2023. godine.



Slika 2. Broj požara u a) željezničkim tunelima i b) cestovnim tunelima po godinama [4]

U promatranom periodu od dvanaest godina došlo je do devet smrtnih slučajeva te do ozljeđivanja 183 osobe. Svih devet poginulih osoba sudjelovalo je u prometnim nesrećama prije nastanka požara, a preostali su ozljeđeni udisanjem dima prilikom evakuacije [4]. Dobar pokazatelj napretka u području zaštite od požara jest podatak da je u razdoblju od 1999. do 2006. godine, u samo četiri požara: Mont Blanc, Tauern, Gotthard i Via Mala, poginula 71 osoba, a u posljednjih dvanaest godina nije poginula niti jedna osoba koja nije sudjelovala u prometnoj nesreći prethodno nastanku požara [4]. Ipak, iako nisu zabilježene žrtve uslijed posljedica požara, materijalna šteta koja nastaje izgaranjem vozila i tereta te oštećenjem konstrukcije tunela i zatvaranja tunela zbog potreba sanacije, iznimno je velika. Npr. trošak sanacije tunela Mont Blanc, koja je trajala tri godine, iznosio je 203 milijuna eura,

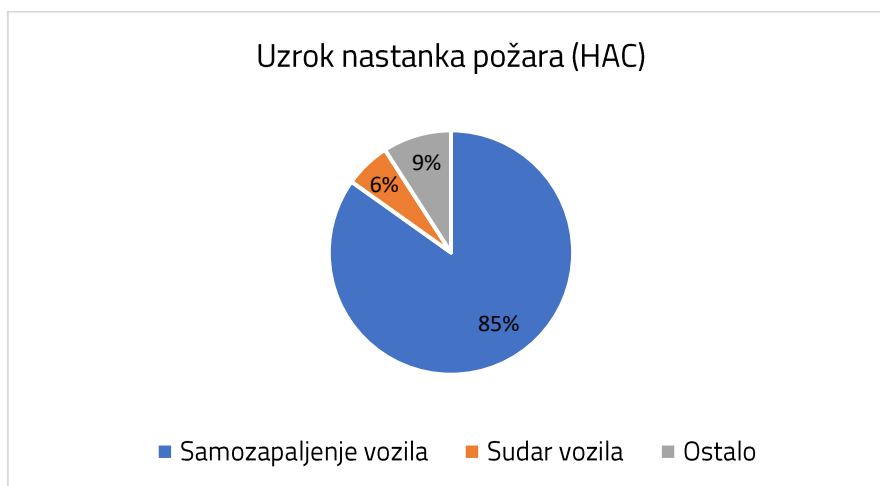
a troškovi uslijed zatvaranja tunela iznosili su 189 milijuna eura. Tablica 1. prikazuje neke od najvećih požarnih nesreća u tunelima diljem svijeta, broj poginulih u istima te nastalu materijalnu štetu; podaci koji nisu bili dostupni pretraživanjem literature označeni su u tablici [5].

Tablica 1. Statistički podaci najvećih požarnih katastrofa u tunelima [5]

Tunel	Duljina tunela [m]	Godina nastanka požara	Broj poginulih	Materijalna šteta [Mil. eur.]
Mont Blanc	11 611	1999.	39	392
Tauern	6546	1999.	12	23
Gotthard	16 942	2001.	11	105-137
Sierre	2460	2012.	28	-
Baku Metro	-	1995.	289	-

Statistički podatci pokazuju kako su u Hrvatskoj, 2022. godine postojala 53 auto cestovna tunela [6]. Duljina tunela Mala Kapela iznosi 5.8 kilometara što ga čini najduljim tunelom u Hrvatskoj, a osim njega postoji samo 11 tunela duljih od jednog kilometra. Nadalje, duljina svih hrvatskih auto cestovnih tunela, koja iznosi 93.05 km, čini 6.94% duljine cjelokupne mreže autocesta [6]. Broj vozila u područjima naplate 2022. godine iznosio je 80.17 milijuna čime je zabilježen porast od 15% u odnosu na 2021. godinu. Također, bitno je istaknuti kako je od danog broja vozila čak 12.26% teretnih vozila (engl. *HGV-heavy goods vehicle*) s visokim požarnim opterećenjem, što znači da svako osmo vozilo predstavlja visokorizičnu skupinu u slučaju sudara i nastanka požara [6]. U 2022. godini zabilježena su 3082 slučaja prometnih nesreća od kojih je 56 bilo u tunelima što je porast broja prometnih nesreća od 12.20% u odnosu na 2021. godinu [6]. Nadalje, Hrvatske autoceste (HAC) upravljaju mrežom autocesta u duljini od 1112 km, a na danim dionicama nalazi se 46 tunela ukupne duljine 47 km [7]. Službeni podaci HAC-a bilježe 33 požara u spomenutim tunelima u razdoblju između

01.01.2016. do 01.06.2024. godine [8]. U 85% slučajeva uzrok nastanka požara bilo je samozapaljenje vozila dok su sudari vozila uzrokovali samo 6% požara. Također, zabilježena su tri slučaja nastanka požara uslijed zapaljenja smeća, trafostanice te kvara turbine motora jednog vozila [8]. Isti predstavljaju 9% uzroka nastanka požara kako je prikazano slikom 3.



Slika 3. Uzroci nastanka požara u tunelima pod HAC-om

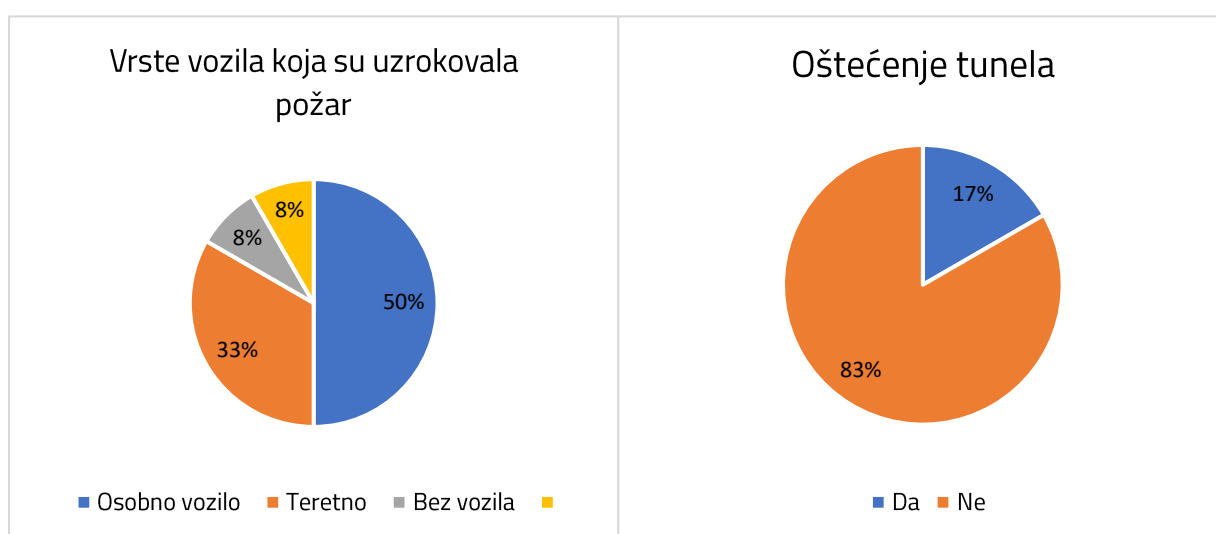
Od 33 požara koji su zabilježeni u tunelima pod upravom HAC-a u razdoblju od 2016. do 2024. godine, u 79% slučajeva uzrok požara bilo je samozapaljenje ili sudar osobnih vozila. U 15% preostalih požara uzrok istih bio je sudar ili samozapaljenje HGV vozila, dok 6% požara nije bilo uzrokovano vozilima. Naposljetku, spomenuti požari u 79% slučajeva nisu uzrokovali oštećenje konstrukcije tunela [8]. Dani statistički podaci prikazani su slikom 4.



Slika 4. Statistički podaci požara u tunelima na dionicama HAC-a



U razdoblju između 22.03.2006. do 15.01.2024. godine zabilježeno je 12 požara u jednom od najvećih hrvatskih tunela, tunelu Učka [9]. Samo jedan od istih nije uzrokovan samozapaljenjem vozila nego tehničkim kvarom opreme samog tunela. Od preostalih 11 požara, 50% je uzrokovano samozapaljenjem osobnih vozila, a 33% samozapaljenjem teretnih vozila. Također, jedan požar nastao je samozapaljenjem putničkog autobusa. Oštećenje tunela uzrokovala su samo dva požara, odnosno u samo 17% slučajeva došlo je do oštećenja tunelske opreme [9]. Dani statistički podaci prikazani su slikom 5.



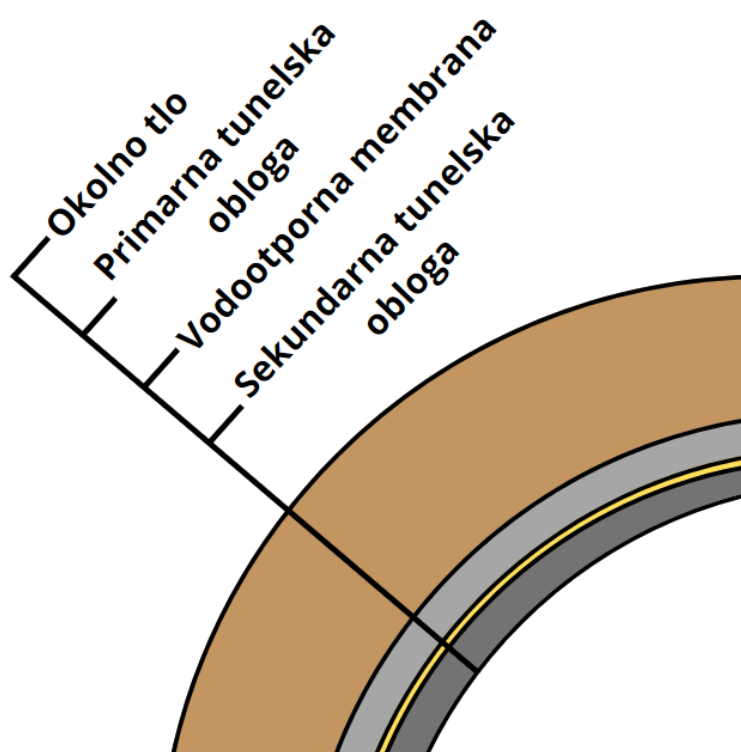
Slika 5. Statistički podaci požara u tunelu Učka

S druge strane, sukladno podacima iz 2019. godine, Hrvatske željeznice (HŽ) upravljaju mrežom pruga ukupne duljine 2617 km [10]. Također, broj tunela 2019. godine iznosio je 109, a ukupna duljina istih bila je 29.65 km. Nadalje, iste godine zabilježeno je 755 incidenata od čega je 71 okarakteriziran kao nesrećom, a dano je rezultiralo s 13 poginulih osoba [10]. Za usporedbu broja cestovnih tunela te učestalosti požara u istima odabrana je jedna od europskih država s najvećim brojem tunela. Naime, u Norveškoj postoji preko 1200 cestovnih tunela [11]. Podaci zabilježeni u razdoblju između 2008. i 2021. godine pokazuju kako u godišnjem prosjeku u Norveškoj nastane 27 požara u tunelima [11]. Nadalje, samo u 18% slučajeva požar je rezultirao ljudskim ozljedama i štetom na tunelu. Vrlo slično

Hrvatskoj, postotak HGV vozila u ukupnom prometu iznosi 14%, a ista su sudjelovala u preko 35% nastalih požara [11]. Također, bitno je izdvojiti kako i u vrlo razvijenim državama, poput Norveške, propusti prilikom izvještavanja o nesreći dovode do visokih 61% nepoznatih uzroka nastanka požara. U 32% slučajeva požari su nastajali uslijed tehničkih problema samog tunela, a u samo 7% uslijed grešaka na vozilima ili sudara [11].

## 1.2. Presjek tunela

Naglasak ovoga rada stavljen je na tunelske obloge, njihovo izvođenje te zaštitu. Sukladno tome, bitno je izdvojiti na što se odnosi sami pojam tunelske obloge. Na slici 6. prikazana je shema presjeka tunela na kojoj je prikazan sloj okolnog tla, primarna ili inicijalna tunelska obloga, vodootporna membrana te sekundarna tunelska obloga.



Slika 6. Presjek konstrukcije tunela

Po završetku bušenja tla, potrebno je osigurati privremenu stabilizaciju istoga što se vrši primarnom tunelskom oblogom, najčešće predgotovljenom segmentnom oblogom ili

oblogom od mlaznog betona. Primarna tunelska obloga u interakciji sa stijenskom masom, mora preuzeti cjelokupno opterećenje nakon čega se postavlja sekundarna tunelska obloga koja štiti cjelokupnu konstrukciju tunela od prodora vode i vlage, osiguravajući projektiranu trajnost istoga. Kako bi se ostvarila dana vodonepropusnost, između primarne i sekundarne obloge postavlja se vodootporna membrana. Budući da je sekundarna tunelska obloga ona koja je direktno izložena u slučaju nastanka požara, osim detalja o pojedinim vrstama tunelskih obloga koje se mogu izvoditi, u nastavku rada dan je i pregled različitih sustava zaštite kojima se sekundarna tunelska obloga, a time i konstrukcija tunela, mogu štititi od djelovanja požara.

## 2. Svojstva požara u tunelima

Iako svaki požar zahtijeva jednake preduvjete za svoj nastanak, požari u tunelima imaju bitno različita svojstva u pogledu širenja vatre i dima te evakuacije ljudi u odnosu na požare u zgradama. Tehnički, tuneli spadaju u tzv. „linearne građevine“, imaju otvore (portale) na svome početku i kraju ali u većini se slučajeva, zbog svoje duljine, tunelski prostor promatra kao zatvoren. Za razliku od požara na otvorenom gdje je širenje topline i dima u okolinu te evakuacija ljudi neometana, kod požara u zatvorenom prostoru isti procesi znatno su usporeni i ograničeni. Iako se požari u zgradama i tunelima mogu okarakterizirati kao požarima u zatvorenom prostoru, zbog niza faktora navedenih u nastavku poglavlja, požari u tunelima predstavljaju vrlo opasan proces koji često dovodi do velikih materijalnih i ljudskih gubitaka. Dani faktori su promjenjivo požarno opterećenje, posebice imobilno, uvjetovano različitim sastavom i brojem vozila, nasumičnost i nemogućnost točnog predviđanja razvoja požara, vrlo visoke temperature, eksplozivno odlamanje betona tunelskih obloga, velike količine dima kojima se smanjuje preglednost u zatvorenom prostoru te otežan pristup izvoru požara vatrogasnim jedinicama [12]. Bitno je istaknuti kako uobičajene debljine tunelske konstrukcije te slojevi okolnog tla znatno utječu na smanjenje mogućnosti raspršivanja topline uslijed djelovanja požara što dovodi do akumulacije velike količine topline na dijelovima tunela koji su zahvaćeni požarom [1]. Takva nagla akumulacija topline i povišenje temperature, uz ostale parametre navedene u nastavku radu, može dovesti do fenomena odlamanja betona koji kao takav predstavlja jedan od glavnih problema požara u tunelima. Također, s obzirom na veliku brzinu kretanja te velik broj vozila u tunelima nije moguće jednoznačno odrediti požarno opterećenje. Sukladno tome, *PIARC* (eng. *Permanent International Association of Road Congresses*) daje uobičajene vrijednosti maksimalne (vršne) toplinske snage (eng. *Peak Heat Release Rate* „HRR“) prikazane u tablici 2 [13].

Tablica 2. Uobičajene vršne HRR vrijednosti različitih vozila [12]

Vrsta vozila	Vršna HRR vrijednost [MW]
Osobno vozilo	5-10
Laki kamion	15
Autobus	20
HGV vozilo do 25 tona	30-50
HGV vozilo do 50 tona	70-150
Cisterna za prijevoz goriva	200-300

Nadalje, u današnje vrijeme teži se zamjeni motora s unutarnjim izgaranjem s automobilima čiji pogon su električne baterije, najčešće litij-ionske [14]. Naime, 2020. godine ukupan broj električnih automobila na svijetu iznosio je 10.1 milijun, a pretpostavlja se da će taj broj do 2030. godine porasti na 116 milijuna [14]. Pogonske električne baterije smatraju se opasnima zbog svoje podložnosti samozapaljenju uslijed mehaničkih, toplinskih ili električnih utjecaja. Osobito opasna je litij-ionska baterija kod koje na visokim temperaturama dolazi do lanca egzotermnih reakcija, poznatih pod nazivom „termički pobjeg“ baterije (eng. *Runaway*), koje uzrokuju izrazito povećanje toplinske snage, a time i veliku brzinu razvoja požara [14]. Dostupni podaci pokazuju kako je prosječna vršna HRR vrijednost pojedinog električnog automobila između 4 i 9 MW. Također, veliki problem litij-ionskih baterija je njihovo gašenje nakon zapaljenja. Naime, pokazalo se kako čak 22 sata nakon uspješnog gašenja požara može doći do ponovnog samozapaljenja iste baterije [15]. Spomenute stavke još uvijek predstavljaju relativno neistraženo područje te je potrebno usmjeriti pažnju na provođenje istraživanja te razvoja regulative u tom području.

Nadalje, organizacija *STUVA* [16] koja se bavi podzemnim građevinama u funkciji prometa, mjerama zaštite od požara te sigurnošću tunela općenito, 1980-ih godina provela je opsežno istraživanje o tome kako poboljšati zaštitu od požara u tunelima na zahtjev

njemačkog ministarstva prometa [16], [17]. Rezultati istraživanja bili su izrazito značajni za područje zaštite od požara u tunelima, a njihove teze prikazane u tablici 3. potvrđene su velikim brojem požarnih ispitivanja provedenih u Norveškoj u sklopu istraživačkog projekta Eureka 499 FIRETUN [16].

Tablica 3. Rezultati istraživanja organizacije Stuva [15], [16]

1)	Za prosječna vozila u prigradskom prometu rasplamsavanje (eng. Flashover) se ostvaruje nakon 7-10 minuta od početka požara
2)	Duljina gorenja vozila uvelike ovisi o vanjskim uvjetima te varira od 30 minuta do nekoliko sati
3)	Čak i mali požari mogu proizvesti znatnu količinu dima te stvoriti kritične uvjete za ljudski život
4)	U većini slučajeva dim vrlo brzo ispuni čitav presjek tunela dimom, do razine gdje se čak i uz uporabu svjetiljki ne vidi više od jednog metra ispred
5)	Gašenje požara u tunelima teško je zbog ograničenog pristupa požarištu, velike količine dima i ekstremno visokih temperatura
6)	U željezničkim tunelima zbog vrste vozila i tereta tj. velikog požarnog opterećenja može doći do znatnih oštećenja same konstrukcije tunela

S obzirom na veliku mogućnost unaprjeđenja i razvoja novih metoda pri projektiranju i izvedbi tunela, koje bi mogle utjecati na povećanje sigurnosti u slučaju požara u tunelima, dva aspekta tunelskih požara su naročito bitna:

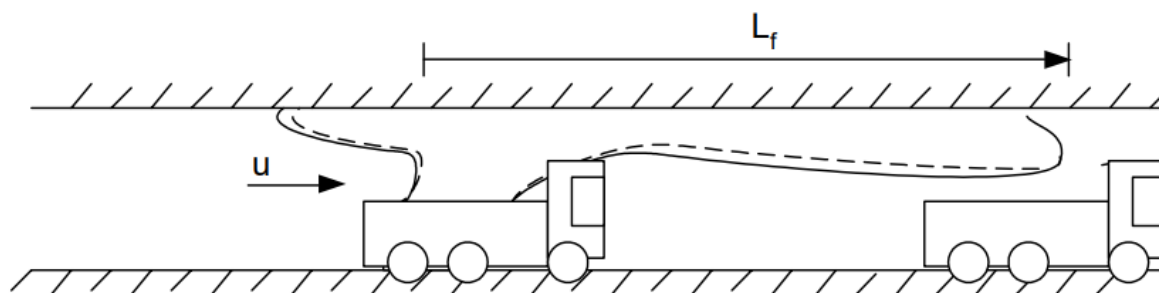
- razvoj i širenje požara
- razvoj i širenje dima.

## 2.1. Razvoj i širenje požara

Vrijeme trajanja požara često se bilježi kao vrijeme od trenutka detekcije požara do trenutka u kojem vatrogasne službe stave požar pod kontrolu ili ga potpuno ugase. Problem nastaje u činjenici da se to vrijeme može razlikovati od prave duljine trajanja požara. Naime, pojam početka požara trebao bi se promatrati kao trenutak u kojem je moguće zabilježiti i najmanju količinu oslobođene toplinske energije, a ne od trenutka kada se pojavi vidljivi plamen. Razlika u opisanim vremenima može biti znatna te se jasno očitovati na HRR krivulji [18].

U požaru od samoga početka, i tokom širenja, sudjeluje velik broj vozila ili u slučaju željezničkih tunela, vagona. Do zapaljenja najčešće dolazi u jednom vozilu uslijed samozapaljenja ili u više vozila uslijed sudara, nakon čega se požar širi na okolna vozila primarno uslijed zračenja topline i vrućih, dimnih plinova [18]. Različite studije pokušale su odrediti glavne mehanizme širenja požara, a podjela danih mehanizama koju su iznijeli Rew i Deaves bazirana je na temelju širenja požara u tunelu Channel 1996. godine te službenim ispitivanjima HGV-EUREKA 499 [19], [20] i Memorial (tunel u SAD-u) [21]. Posebno su bitna teška teretna vozila čiji sadržaj predstavlja vrlo veliko požarno opterećenje [22]. U većini tunelskih požarnih katastrofa sudjelovalo je barem desetak HGV-a. Zapaljenje takvog vozila, naročito uz uzdužno strujanje zraka uslijed djelovanja ventilacije, naglo omogućava širenje požara po tunelu [22]. U nastavku su navedena četiri glavna mehanizma širenja požara.

- 1) Prvi mehanizam koji predlažu Rew i Deaves je udar plamena u susjedna vozila [22]. U slučaju postojanja uzdužnog strujanja zraka između 2.2 i 2.5  $m/s$ , plamen se odbija od stropa tunela i širi primarno u smjeru djelovanja ventilacije. Duljina plamena  $L_f$ , prikazana na slici 7, definirana je udaljenošću između centra HGV-a do granice temperaturnog polja od 600°C, koja je korištena kao temperatura koja se postiže na vrhu plamena [18]. Dana duljina plamena  $L_f$ , predstavlja udaljenost na kojoj isti može uzrokovati zapaljenje nekog objekta poput vozila.



Slika 7. Mehanizam udara plamena u tunelima s uzdužnim strujanjem zraka [17]

- 2) Sljedeći mehanizam je širenje požara sa zapaljenih vozila na udaljena vozila. Budući da izvor požara stvara vrlo visoke temperature, zračenjem dolazi do zapaljenja udaljenih vozila [18], [22].
- 3) Stoga treći mehanizam predstavlja tzv. spontano zapaljenje ili daljinsko zapaljenje. Nadalje, sudarima vozila dolazi do razlijevanja različitih zapaljivih tekućina poput goriva. Zapaljenjem takvih tekućina također može doći do širenja požara što predstavlja četvrti mehanizam, širenje goriva.
- 4) Naposljetku, širenje požara eksplozijom predstavlja posljednji mehanizam širenja požara [18]. Zanimljivo je kako eksplozija spremnika goriva može dovesti do širenja goriva i na udaljena vozila što dijelom pripada i mehanizmu širenja goriva. Širenje požara udarom plamena smatra se najčešćim mehanizmom nastanka velikih požarnih katastrofa u tunelima. Ipak, mehanizam širenja požara koji najbolje opisuje stvarni proces širenja požara je upravo kombinacija mehanizama koje predlažu Rew i Deaves [22].

Važna stavka prilikom ispitivanja širenja požara u tunelima je udaljenost na kojoj požar može uzrokovati zapaljenje drugih vozila. Mogućnost zapaljenja vozila ovisi o tome koliki je rizik spontanog zapaljenja istoga, odnosno određuje se mogućnost da površina promatranog vozila dosegne kritičnu temperaturu, tj. temperaturu zapaljenja [18]. Ovisno o primarnom mehanizmu širenja topline, zračenju ili strujanjem, kritična temperatura poprima različite vrijednosti. U slučaju spontanog zapaljenja, bez izravnog djelovanja plamena ili iskri, kritična temperatura za zračenje iznosi  $600^{\circ}\text{C}$ , a za strujanje  $500^{\circ}\text{C}$ . S druge strane, ukoliko se radi



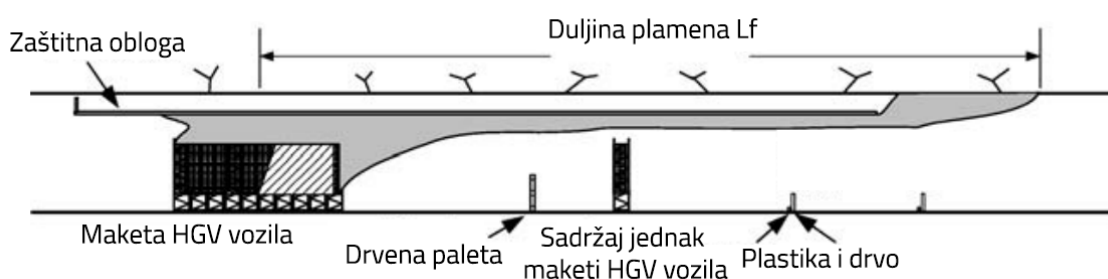
o potpomognutom zapaljenju, odnosno zapaljenju uz izravno djelovanje plamena ili iskri, kritična temperatura zapaljenja iznosi od 300 do 410°C u slučaju zračenja te 450°C u slučaju strujanja [22]. Newman i Tewarson [23] kažu da u trenutku kada prosječna temperatura plinova u kanalima ventilacijskog sustava tunela dosegne vrijednost kritične temperature, dolazi do zapaljenja materijala u tunelu, za promatrani presjek [23]. Nadalje, bitno je gdje i kako je kritična temperatura određena. Vrlo često se ista određuje kao prosječna temperatura nekog presjeka te se zbog toga postavlja pitanje ispravnosti takvog izračuna. Naime, temperatura u gornjim dijelovima presjeka može biti znatno veća od prosječne temperature presjeka što dovodi do upitnih rezultata proračuna širenja požara [22]. Naposljetku, bitno je istaknuti kako je razvoj požara kontroliran jednim od dva uvjeta: ventilacijom ili gorivom. Naime, budući da se izgaranjem troši kisik, u trenutku kada nestane kisika počinje gašenje požara te se tako kontroliran požar naziva požarom koji je kontroliran ventilacijom (dostupnim zrakom potrebnim za izgaranje). Nadalje, razvojem požara zahvaća se sve više vozila te postoji mogućnost postojanja dovoljne količine kisika ali manjak dostupnog zapaljivog materijala koji bi omogućio daljnji razvoj i širenje požara. Takav požar naziva se požarom koji je kontroliran gorivom [18].

Istraživanjem provedenim na tunelu Runehamar u Norveškoj pokušala se utvrditi kritična udaljenost između izvora požara i vozila na kojoj dolazi do zapaljenja istih [18]. Za potrebe samog ispitivanja, izvor požara predstavljala je maketa HGV-a koja je bila napunjena uobičajenim sadržajem teških teretnih vozila, a umjesto vozila korištene su makete vozila u obliku komada drva, plastike i drvenih paleta [18]. Jedan od glavnih ulaznih parametara ispitivanja bilo je korištenje dviju mobilnih ventilacijskih jedinica kojima se ostvarilo uzdužno strujanje zraka od približno 3 m/s. Provedena su četiri ispitivanja s različitim sadržajem u maketi teškog teretnog vozila te se promatralo širenje požara od makete, u smjeru uzdužnog strujanja zraka. Tablica 4. prikazuje sadržaj makete teretnog vozila u svakom pojedinom ispitivanju te ukupnu masu i količinu oslobođene topline.

Tablica 4. Ulazni parametri sadržaja makete teretnog vozila [21]

Ispitivanje	Opis sadržaja	Ukupna masa sadržaja [kg]	Vršna HRR vrijednost [MW]
T1	Drvene i plastične (PE) palete	10 160	202
T2	Drvene palete i madraci (PUR)	6390	157
T3	Namještaj + gume	7530 + 800	119
T4	Plastične (PS) čaše u kartonskim kutijama na drvenim paletama	2850	66

Također, pozicije i vrste meta (različitih uzoraka materijala) čije se zapaljenje promatralo prikazane su na slici 8.



Slika 8. Pozicije i vrste maketa [21]

Rezultati ispitivanja dali su prosječne udaljenosti na kojima je došlo do zapaljenja plastičnih i drvenih maketa. Promatrajući duljinu samoga plamena u danom trenutku, do zapaljenja plastičnih meta dolazilo je na cijeloj duljini  $L_f$ . S druge strane, drvene mete prestale su se zapaljavati na otprilike 70% duljine  $L_f$ . Specifično, u prvom ispitivanju, za požarno opterećenje od 202 MW, spomenute udaljenosti iznosile su 95 metara za plastične mete i 70 metara za drvene mete [22]. Osim direktnog djelovanja plamena i gorućih otpadaka, do zapaljenja meta dolazilo je i zbog zračenja topline kroz čitav presjek tunela, od stropa do ceste. Pretpostavlja se da bi u slučaju korištenja više makete, odnosno pravoga vozila, širenje požara bilo veće uslijed pojačanog vođenja topline kroz gornje slojeve tunelske obloge. Rezultatima ispitivanja pokušali su se dati određeni korelacijski faktori u pogledu duljine

plamena, oslobođene topline i temperature. Prosječna količina oslobođene topline zabilježena na maketi sadržaja jednakog maketi HGV vozila, bila je u rasponu od 20–40 MW, a korelacija duljine plamena  $l$  i količine oslobođene topline dana je eksponentom 0.8 ( $l = HRR^{0.8}$ ), uz uvjet uzdužnog strujanja od 2 do 3 m/s. Prilikom određivanja korelacije temperature i širenja požara bilo je potrebno uzeti u obzir vrlo bitnu činjenicu da postoje razlike u temperaturi gornjih slojeva tunela i same tunelske obloge u odnosu na središnje dijelove presjeka tunela. Spomenuta razlika često može utjecati na zračenje koje je u većini slučajeva glavni razlog širenja požara. Naposljetku, ukoliko se za proračun širenja uzima prosječna temperatura presjeka, rezultati ovog ispitivanja pokazali su kako temperatura od 500 °C pokazuje najbolju korelaciju s udaljenošću na kojoj dolazi do zapaljenja drugih vozila, tj. širenja požara [22].

Širenje i razvoj požara u željezničkim tunelima može biti brži i intenzivniji nego u cestovnim tunelima. Vagoni vlakova nalaze se na uvelike manjim i pravilnijim razmacima od vozila u cestovnim tunelima [24]. Promatrajući teretne vlakove, gotovo svaki pojedini vagon predstavlja jedinicu s vrlo visokim požarnim opterećenjem. Dakle, u željezničkom prometu radi se o nizu HGV-ova što predstavlja daleko veću opasnost od nekoliko teških teretnih vozila koji se u trenutku požara nađu u cestovnim tunelima. Do zapaljenja vlakova najčešće dolazi zbog električnih kvarova te sudara vlakova ili ispadanja vlakova iz tračnica; preko 50% poznatih požara uzrokovali su dani faktori [25]. Također, do požara može doći zbog sabotaze, cigareta i upaljača te uslijed trenja kotača s tračnicama. Uvriježene vršne HRR vrijednosti pojedinih vagona uobičajeno se kreću između 15 i 35 MW što ovisi o mnoštvu faktora poput sadržaja samog vagona, ventilacijskim uvjetima, geometriji tunela, ukupnoj masi gorive tvari i slično [25]. Vagoni se mogu promatrati kao dodatan zatvoren prostor unutar tunela te je potrebno posvetiti pažnju samome razvoju požara u pojedinom vagonu. Naime, glavni mehanizam širenja i razvoja požara u vagonu predstavlja zračenje topline s krova vagona koji se direktno zagrijavao uslijed izravnog djelovanja vertikalnog plamena na mjestu nastanka požara [26]. Danim mehanizmom sadržaj vagona postepeno se zapaljuje te dolazi do rasplamsavanja i daljnjeg širenja požara na okolne vagone. Rasplamsavanje se

očituje plamenim udarima kroz prozore vagona, činjenicom da su sve zapaljive površine vagona počele goriti, požarom koji je kontroliran ventilacijom te naglim zapaljenjem ne izgorenog dima ili pare uz strop. Spomenuti faktori predstavljaju kvalitativne karakteristike rasplamsavanja, a kvantitativne se očituju postizanjem temperature na kojoj dolazi do rasplamsavanja te kritičnom vrijednošću HRR-a; uvriježeno je da do rasplamsavanja dolazi na temperaturi od otprilike 600 °C [25].

## 2.2. Razvoj i širenje dima

Dim predstavlja najveću opasnost za ljudski život u požaru. Preko 80% svih ljudskih žrtava u požarnim katastrofama uzrokovano je utjecajem dima [27]. Sami dim smanjuje koncentraciju kisika u promatranom prostoru i emitira toksične plinove poput sumporovog dioksida ( $SO_2$ ) i sumporovodika ( $H_2S$ ) [12]. Kada započne požar u tunelu, naglo se troši velika količina postojećeg kisika te se postepeno povećava maseni udio ugljikovog dioksida ( $CO_2$ ) i ugljikovog monoksida ( $CO$ ). U trenutku kada maseni udio ugljikovog dioksida dosegne 20% ili maseni udio ugljikovog monoksida dosegne 1% ljudski životi su u opasnosti [12]. Nadalje, dim kao takav znatno smanjuje vidljivost i time uvelike otežava samu evakuaciju. Kako bi se osigurali odgovarajući uvjeti za evakuaciju ljudi, nameće se problematika ventilacijskog sustava. Naime, ovisno o načinu rada ventilacijskog sustava u danome trenutku, može se utjecati na ponašanje i širenje požara i dima. Postoje dvije osnovne vrste ventilacijskih sustava: longitudinalni (uzdužni) i transverzalni (poprečni) [2]. Longitudinalni sustav osigurava strujanje zraka u smjeru osi tunela. Osnovni princip rada očituje se kretanjem svježeg zraka, dima i zagrijanih plinova u odabranom smjeru strujanja čime se osigurava čist zrak na početku tunela ili presjeka tunela na kojem je sustav izveden, a zagađeni zrak iz tunela se izbacuje ili na njegovom kraju ili kroz okna [2]. S druge strane, transverzalni sustav stvara strujanje zraka okomito na os tunela te osigurava jednoliku raspodjelu svježeg zraka, odnosno konstantnu razinu temperature te dima i zagrijanih plinova kroz cijeli tunel [2].

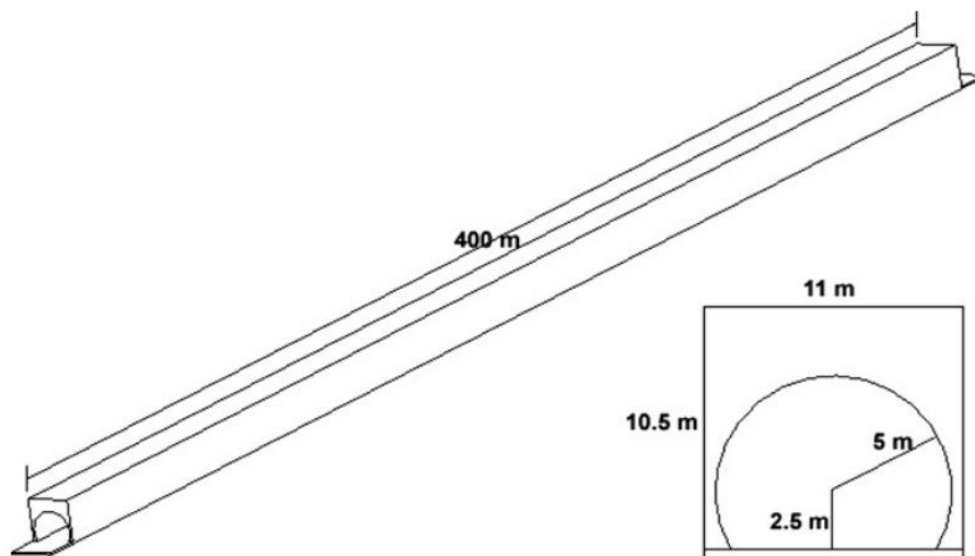
U literaturi se opisuju brojne operativne strategije rada ventilacijskog sustava u uvjetima požara, ovisno o dužini tunela i uzdužnom nagibu, načinu odvijanja prometa (istosmjerni,

dvosmjerni), tipu vozila koja sudjeluju u prometu i sl. Neki od autora [12] opisuju tri različite strategije koriste se kako bi se ostvarili najpovoljniji uvjeti za gašenje požara i evakuaciju.

- 1) Na samome početku požara, strujanje ventilacijskog sustava može se podesiti do kritične brzine uzdužnog strujanja zraka, čime se osigurava smanjeno širenje dima te se utječe na raspršivanje topline. Takvim djelovanjem ventilacijskog sustava sprječava se nastanak iznimno velikog temperaturnog gradijenta te izdizanje i akumuliranje topline uz strop tunela.
- 2) Nadalje, razvojem požara, predlaže se smanjenje brzine strujanja zraka kako bi se spriječilo ubrzano širenje dima niz struju i omogućila adekvatna evakuacija [12]. Specifičan scenarij javlja se ukoliko je požar nastao u blizini izlaza iz tunela sa strane suprotne djelovanju ventilacijskog sustava. U tom slučaju uzdužno strujanje ventilacijskog sustava osigurat će kretanje dima niz struju i slobodan evakuacijski put prema izlazu iz tunela, suprotno smjeru djelovanja ventilacijskog sustava. U spomenutim situacijama ne preporučuje se smanjenje snage niti gašenje ventilacijskog sustava [12].
- 3) Naposljetku, ukoliko požar nastane pod uobičajenim okolnostima, duboko unutar tunela, predlaže se gašenje ventilacijskog sustava nakon inicijalne faze požara kako bi se postigao efekt stratifikacije i osigurali adekvatni uvjeti evakuacije [12].

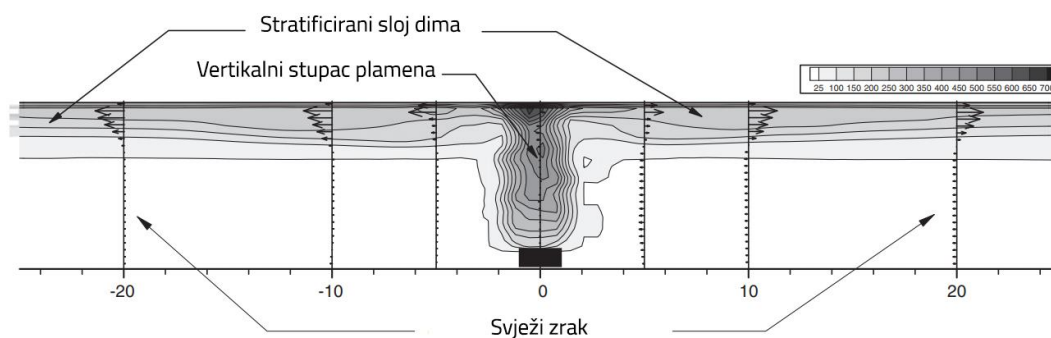
Gore navedene strategije su generičkog karaktera, a njihova primjena na konkretnim tunelima treba biti posebno analizirana Također, značajno ovisi o nacionalnoj tehničkoj regulativi i projektantskim smjernicama koje se koriste u pojedinim državama.

Sami fenomen stratifikacije i djelovanje ventilacijskog sustava istražili su i Chen, F. i Leong, J.C. na vrlo jednostavnom modelu tunela prikazanog na slici 9 [28].



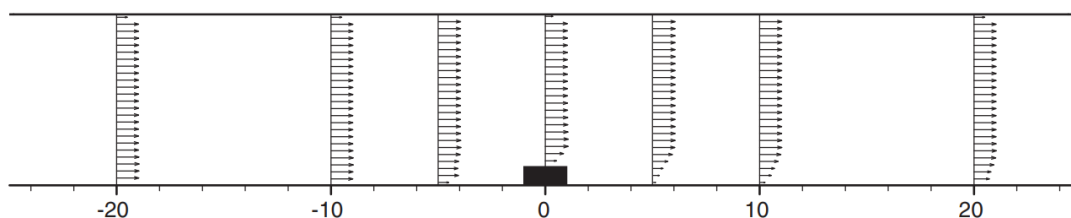
Slika 9. Geometrija modela tunela [27]

Autori predlažu promatranje djelovanja ventilacijskog sustava u dva scenarija, kada je operabilan i kada nije. Ukoliko se ventilacijski sustav ugasi u slučaju nastanka požara, vrući zrak i dim, koji nastaje na samome mjestu požara, izdiže se zbog velikog temperaturnog gradijenta [28]. Kada se stup dima približi stropu tunela, uslijed efekta stratifikacije postepeno se širi uz tunelsku oblogu. Slijedi postepeni prijelaz iz radijalnoga u jednodimenzionalni tok koji, nakon određene udaljenosti, leži uz sami strop i kreće se paralelno s njime [28]. Opisani proces kretanja dima predstavlja fenomen stratifikacije te je prikazan na slici 10. Važnost stratifikacije očituje se u poziciji dima koja se njome ostvaruje. Budući da je dim izdignut uz strop, a ispod sloja dima nalazi se svježiji zrak, koji dolazi s obje strane tunela, osiguran je siguran evakuacijski put kroz određeni vremenski period. Postizanje kontroliranog stratifikacijskog širenja dima jedan je od preduvjeta u fazi evakuacije putnika u dvosmjernim tunelima.



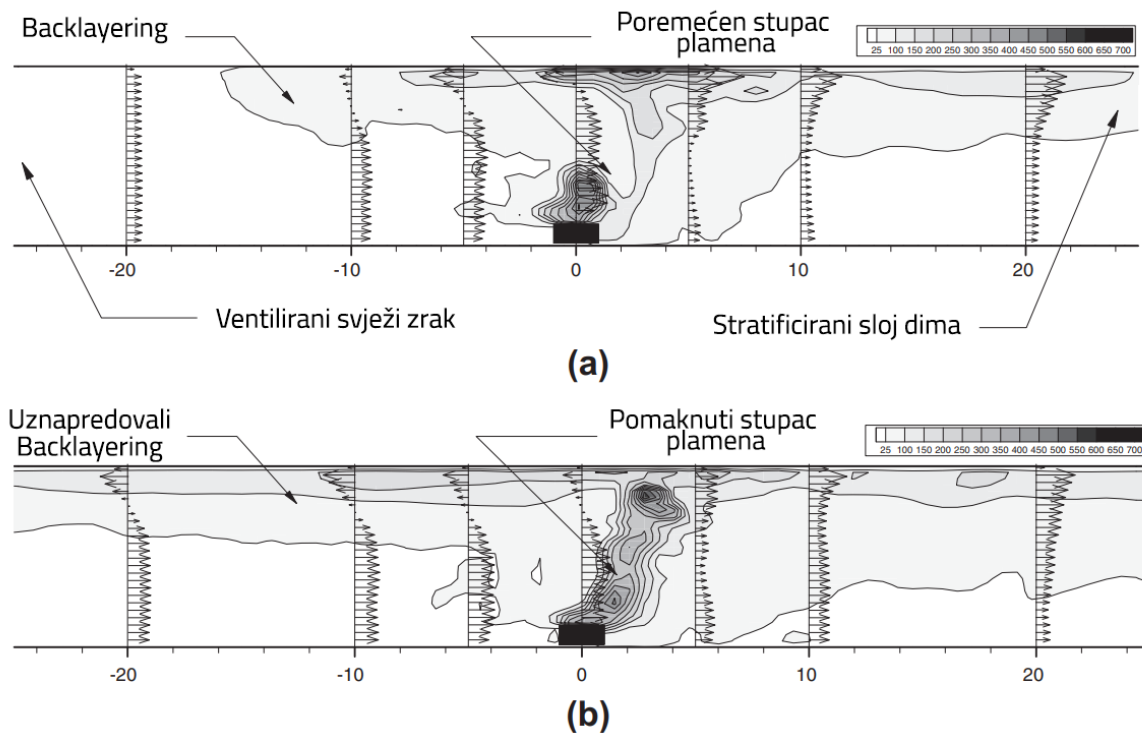
Slika 10. Stratifikacija dima [27]

Ukoliko ventilacijski sustav ostane uključen u slučaju požara bitno je promotriti kako utječe na širenje dima. Na slici 9. prikazani su profili brzine strujanja zraka uslijed djelovanja uzdužnog ventilacijskog sustava brzinom od  $3\text{ m/s}$  [28]. Izrazito bitno je i postojanje prepreka u strujanju koje su na slici 11. prikazane u obliku središnjeg pravokutnika predstavljajući izvor požara. Nailaskom na prepreke, brzina strujanja se smanjuje, kako na samoj prepreci tako i na određenoj udaljenosti iza same prepreke [28].



Slika 11. Profili uzdužne brzine strujanja zraka [27]

U stvarnosti, širenje dima sastoji se od oba procesa, izdizanja dima uslijed temperaturnog gradijenta te kretanja dima niz struju uslijed djelovanja ventilacijskog sustava. Slikom 12. prikazano je takvo djelovanje za požar snage  $10\text{ MW}$ , deset i trideset sekundi nakon zapaljenja.



Slika 12. Uzajamno djelovanje temperaturnog gradijenta i ventilacijskog sustava nakon a) 10 sekundi i b) 30 sekundi [27]

Iako rad ventilacijskog sustava teži potiskivanju dima niz struju, ipak postoji određena količina dima koja odlazi u smjeru suprotnom strujanju zraka, te se takav efekt naziva *backlayering*. Nadalje, ukoliko se u danom slučaju može ostvariti brzina strujanja zraka, koja će osigurati da sav dim odlazi niz struju, ona se naziva kritičnom brzinom strujanja [28]. Potrebno je napomenuti da je za idealnu sliku stratificiranog širenja dima, simetrično na obje strane u odnosu na lokaciju požara, potrebno smanjiti brzinu uzdužnog strujanja zraka na nulu. Međutim, ta strategija, poznata kao „zero-velocity“ strategija nije uobičajena u praksi iz više razloga. Jedan od njih je činjenica da u realnim eksploatacijskim uvjetima uvijek postoji izvjesno uzdužno strujanje zraka u tunelu, koje je teško eliminirati. Drugi razlog, izravno vezan za sigurnost, je taj da se pri nultoj brzini uzdužnog strujanja zraka tijekom požarnog incidenta mogu generirati eksplozivne koncentracije smjesa zapaljivih plinova i para sa okolnim zrakom.

Nadalje, ukoliko se u danom slučaju može ostvariti brzina strujanja zraka, koja će osigurati da sav dim odlazi niz struju, bez pojave povratnog strujanja dima, ona se naziva kritičnom



brzinom strujanja, tj. odimljavanja [28]. Kontrolirano odimljavanje s kritičnom brzinom strujanja zraka je strategija koja se primjenjuje nakon završetka evakuacije putnika, u trenutku kada vatrogasci započinju sa gašenjem požara i koja im osigurava da tijekom akcije gašenja neće doći do pojave *backlayering-a*, koja bi ih dovela u zamku; ispred njih se nalazi požar, a iza se spušta dim koji se hladi.

### 3. Zahtjevi za sigurnost u slučaju požara u tunelima

Kako bi se osigurala posvećenost svim detaljima problematike sigurnosti u slučaju požara u tunelima razvijen je niz različitih normi i specifikacija koje daju zahtjeve za pojedine aspekte djelovanja te zaštite od požara. Više međunarodnih organizacija kao što su PIARC (*Permanent International Association of Road Congresses*) i UIC (*International Union of Railways*), surađuju na razvoju i usklađivanju zahtjeva za projektiranje tunela i zaštite od požara u tunelima [29]. 1970-ih godina U Sjevernoj Americi započinje razvoj područja zaštite od požara u tunelima. Danas postoje dvije glavne organizacije u SAD-u koje se bave danom problematikom: ASHRAE i NFPA [29]. ASHRAE (*The American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers*), uz nekolicinu njenih prethodnika, predstavlja organizaciju koja je godinama proučavala podzemne građevine poput tunela i time postavila temelje za daljnji napredak [29]. Nadalje, NFPA (*National Fire Protection Association*) je organizacija koja je objavila ključne standarde NFPA 502 [30], [31] i NFPA 130 [31] koji postavljaju različite zahtjeve za sve stavke sigurnosti u slučaju požara u cestovnim i željezničkim tunelima te ih konstantno razvija i dopunjava paralelno s razvojem samoga područja zaštite od požara u tunelima [30].

Prve preporuke sigurnosti u tunelima u Europi bile su rezultat formiranja multidisciplinarnе grupe stručnjaka po nalogu Europske ekonomske zajednice između 2000. i 2001. godine [32]. Nadalje, 2004. godine Europska komisija odobrila je Direktivu 2004/54/EC [33] koja propisuje minimalne zahtjeve sigurnosti za tunele u trans-europskoj mreži tunela. Cilj spomenute direktive bio je postaviti i ujednačiti zahtjeve za visoku razinu sigurnosti diljem Europe i osigurati manji broj nesreća te smanjiti posljedice istih. Zahtjeve iz NFPA 502 i NFPA 130 usvojile su mnoge organizacije, čije se preporuke spominju u nastavku rada, poput EFACTIS-a [34] i EFNARC-a [35]. Naposljetku, bitno je istaknuti kako u Hrvatskoj vrijedi Pravilnik o minimalnim sigurnosnim zahtjevima za tunele [36] koji se temelji upravo na Direktivi 2004/54/EC. Jedan od glavnih zahtjeva tog pravilnika, koji se odnosi na tunelske obloge, kaže kako tunelske obloge moraju imati otpornost na požar u trajanju od najmanje

60 minuta. Također, u Hrvatskoj je u cijelosti preuzet i jedan od najznačajnijih regulatornih okvira za projektiranje i gradnju cestovnih tunela te zaštitu betonskih tunelskih obloga od djelovanja požara, a to su austrijske RVS smjernice [37].

Kako je spomenuto, ključne standarde koji se koriste kao takvi ili su implementirani u druge, predstavljaju NFPA 502, koji se odnosi na cestovne tunele te NFPA 130 koji se odnosi na željezničke tunele. Minimalne zahtjevi za pojedine segmente zaštite od požara u cestovnim tunelima, daje NFPA 502. Prema NFPA 502, tuneli su podijeljeni u pet kategorija, ovisno o njihovoj duljini, a svaki pojedini razred mora zadovoljiti određene zahtjeve. Sama podjela dana je tablicom 5 [30].

Tablica 5. Kategorizacija tunela po NFPA 502 [43]

Kategorija tunela	Duljina tunela	Zahtjevi u skladu s NFPA 502
X	Manja od 90 metara	Sustavi kontrole prometa
A	Preko 90 metara	Sustavi kontrole prometa i vertikalni hidrantski sustav
B	Preko 240 metara	Primijeniti sve odredbe NFPA 502 ukoliko dokument (NFPA 502) ne određuje drugačije
C	Preko 300 metara	Primijeniti sve odredbe NFPA 502 ukoliko dokument (NFPA 502) ne određuje drugačije
D	Preko 1000 metara	Nužno primijeniti sve odredbe NFPA 502

Općenito, pri projektiranju, izvođenju i funkcioniranju tunela, međusobna ovisnost različitih mjera zaštite od požara ima primarnu zadaću osigurati zaštitu života te konstruktivnih

elemenata tunela [30]. Zaštita konstruktivnih elemenata podrazumijeva izbjegavanje konstruktivne štete i progresivni kolaps tunela te minimiziranje ekonomskih gubitaka zbog zatvaranja tunela. Iz tog razloga postavlja se prvi zahtjev koji kaže da konstrukcija tunela mora moći izdržati požar po RWS krivulji ili sličnim vremensko-temperaturnim krivuljama [30]. Nadalje, promatrajući trajanje požara od 120 minuta, ne smije doći do eksplozivnog odlamanja betona konstruktivnih elemenata. Također, tunelske obloge od čelika ili lijevanog željeza moraju biti zaštićene na način da se u njima ne dosegne temperatura od 300°C [30]. Materijal koji se koristi za zaštitu konstruktivnih dijelova od djelovanja požara mora zadovoljiti četiri različita zahtjeva:

1. U tunelima s *in-situ* betonskom tunelskom oblogom temperatura na površini betona ne smije prijeći 380°C.
2. Također, temperatura armature u betonu, uz pretpostavku minimalnog zaštitnog sloja debljine 25 mm, ne smije prijeći 250°C.
3. Sami materijal mora biti klasificiran kao nezapaljiv te mu temperatura otapanja ne smije biti manja od 1350°C.
4. Nadalje, mora zadovoljavati zahtjeve zaštite od požara za raspon saturacije vlagom od 5 do 100% [30].

Za tunele kategorija B, C i D mora postojati instaliran barem jedan ručni način za identifikaciju i lociranje požara te mora biti dostupan svim ljudima koji se nađu u tunelu. Uobičajeno se postavljaju barem ručni javljači požara. Javljači za ručnu dojavu požara moraju biti postavljene na definiranim mjestima s razmakom manjim od 90 metara te na svim izlazima iz tunela [30]. Također, svi javljači moraju biti postavljeni, ispitivani i održavani u skladu s NFPA 72 [38]. Nadalje, moguće je koristiti 24-satne CCTV (eng. *Closed - Circuit Television*) sustave za nadzor kojima se požar može s udaljenosti identificirati i locirati. Ukoliko tuneli kategorija B, C i D nisu pod 24-satnim nadzorom, potrebno je instalirati automatske sustave za detekciju požara odobrene od strane nadležnog tijela u skladu sa zahtjevima NFPA 72. Također, NFPA 502 definira kako nije potrebno instalirati signale za evakuaciju i premještanje ljudi u tunelima ukoliko su sustavi za identifikaciju i lociranje

požara instalirani u skladu sa svim zahtjevima [30]. Sami sustavi trebali bi sadržavati detalje o tzv. požarnim potpisima koji predstavljaju promjene u atmosferi uslijed čega dolazi do aktivacije sustava za detekciju požara. Također, sustavi za automatsku detekciju požara moraju moći identificirati požar na udaljenosti do 15 metara od pozicije danog uređaja te moraju biti postavljeni u zonama sukladno s ventilacijskim sustavom, ukoliko on postoji [30]. Sve prostorije unutar samog tunela, poput crpnih stanica, također moraju imati instaliran automatski sustav detekcije požara.

Svi postojeći i novi tuneli moraju imati pristup pouzdanom načinu komunikacije s okolinom. Preciznije, mora postojati odvojena radio mreža s kojom se može dvosmjerno komunicirati te se ista primarno koristi za komunikaciju između vatrogasnog osoblja na terenu i samog komunikacijskog centra vatrogasne postrojbe [30]. Također, svi tuneli moraju biti u mogućnosti zaustaviti i kontrolirati promet u slučaju požara. Za sve tunele dulje od 240 metara postavlja se zahtjev mogućnosti sprječavanja direktnog ulaska u tunel na način da se ne oteža pristup hitnim službama. Nadalje, mora postojati mogućnost zaustavljanja prometa u tunelu, koji se približava mjestu nastanka požara te mogućnost ubrzanja prometa nizvodno od nastanka požara kako bi ljudi što prije izašli iz opasne zone [30].

Tuneli moraju imati vlastiti sustav odvodnje koji će skupljati, pohranjivati i na koncu sukladno pravilnicima otpuštati otpadnu vodu [30]. Sustav treba biti projektiran na način da se gorivo i druge zapaljive tekućine nakon izlivanja minimalno šire i time uzrokuju širenje požara. Ulazne točke na samoj cesti moraju biti na što manjim razmacima kako bi se udaljenost od izlivanja goriva do ulazne točke sustava odvodnje maksimalno smanjila [30]. Sve komponente sustava odvodnje moraju biti od nezapaljivog materijala, čime mnogo klasičnih materijala za izradu cijevi, poput PVC-a, ne dolaze u obzir. Nadalje, zapremina bazena za pohranjivanje otpadne vode mora biti dovoljno velika da može prihvatiti svu vodu iz svih projektiranih ulaznih točaka, bez poplavlivanja ceste [30].

Prostorije u kojima se nalaze različiti skladišni rezervoari i crpne stanice, te sustavi vodoopskrbe smatraju se rizičnim prostorima u skladu s NFPA 70 i NFPA 820 [30]. Također,

u danu skupinu spadaju i prostori s različitim motorima, električnom opremom i instalacijama. Bitno je istaknuti kako u prostorima s rezervoarima i crpnim stanicama može doći do znatnog porasta razine ugljikovodika, a ukoliko se isti pojave u sustavu odvodnje, mora doći do paljenja i lokalnog i općeg alarma [30].

Zahtjevi za izlaze iz tunela, u pogledu evakuacije, dani su u skladu s zahtjevima NFPA 101 [30]. Osvijetljeni ili reflektivni putokazi koji označavaju najbliže mjesto izlaza iz tunela moraju biti postavljeni na zidove tunela i to na udaljenostima manjima od 25 metara. Sve površine za hodanje, na svim evakuacijskim putevima, moraju biti otporne na klizanje. Nadalje, vrata prema evakuacijskom izlazu moraju se otvarati u smjeru evakuacije. Ukoliko se koriste klizna vrata, potrebno je postaviti natpis o smjeru klizanja. Protupožarna vrata koja se koriste na križištima evakuacijskih puteva te protupožarna vrata između tunela i evakuacijskih puteva moraju održati zahtjeve otpornosti na požar u vremenskom periodu od 90, odnosno 120 minuta [30]. Također, sama vrata moraju se moći otvoriti jednako lako, a u isto vrijeme moraju biti otporna na pozitivne i negativne pritiske uslijed prolaska vozila. Maksimalna sila pri kojoj se vrata moraju otvoriti iznosi 222 N [30]. Razmak između evakuacijskih izlaza iz tunela ne smije biti veći od 300 metara. Razmak između pojedinih izlaza ovisi o razredu promatranog tunela, projektiranim parametrima razvoja požara i dima, evakuacijskoj analizi, sustavima zaštite koji mogu osigurati odgovarajuće uvjete za evakuaciju, sustavu upravljanja prometom, postojanju plana odgovora na hitne slučajeve te nesigurnostima ljudskog ponašanja u požaru [30]. Nadalje, ukoliko su izvedeni nogostupi koji se koriste za evakuaciju, njihova minimalna širina mora biti 1.12 metara te mora biti zaštićena od prometa.

Dodatni zahtjevi o različitoj požarnoj opremi, hidrantima i zalihama vode, ventilacijskom sustavu, vodenim sustavima za gašenje požara i sl. dani su u odgovarajućim poglavljima NFPA 502 [30]. Također, spomenuti zahtjevi mogu se naći u istom ili prilagođenom obliku u sklopu zaštite od požara u željezničkim tunelima, u različitim poglavljima NFPA 130 [31].

S ciljem osiguravanja sigurnosti u slučaju požara te ostvarivanja postavljenih zahtjeva različitim normama i specifikacijama poput NFPA 502 i NFPA 130 potrebno je posvetiti posebnu pažnju svim stavkama takozvanog sigurnosnog lanca: prevencija, pasivna i aktivna zaštita, kontrola te evaluacija [2]. Stavka prevencije odnosi se na adekvatno projektiranje samoga tunela i uvođenje mjera s ciljem sprječavanja nastanka događaja koji bi doveo do samoga požara kao što je jednosmjerno kretanje tunelom, čime se izbjegavaju frontalni sudari [2]. Nadalje, pasivne i aktivne mjere zaštite koje ograničavaju štetu uslijed djelovanja požara i održavaju konstrukcijsku cjelovitost za vrijeme i nakon požara. Kontrola i popravci odnose se na različite radnje i mjere, kojima se osigurava potpuna funkcionalnost tunela nakon požara [2]. Naposljetku, evaluacijom se određuje uspješnost primijenjenih sigurnosnih strategija i mjera zaštite te se procjenjuje mogućnost napretka.

### **3.1. Pasivne mjere zaštite od požara**

Pasivne mjere zaštite primarno se odnose na konstrukcijsku cjelovitost i sigurnost. Ukoliko tunel nije primjereno zaštićen koristeći mjere navedene u nastavku poglavlja, može doći do gubitka konstruktivne cjelovitosti te raspucavanja ili u najgorem slučaju, rušenja tunela prije nego sama evakuacija ljudi završi [2]. Raspucavanje betonske konstrukcije i gubitak cjelovitosti naročito je bitan u podvodnim tunelima ili tunelima koji su izvedeni u relativno mekom tlu. Ukoliko ne dođe do urušavanja tunela, požar svejedno može uzrokovati velike štete na konstrukciji tunela što dovodi do velikih troškova pri popravku tunela te gubitaka uslijed zatvaranja tunela u vremenskom periodu popravka [2]. Nadalje, neadekvatna zaštita tunela može rezultirati uvećanim rizicima za hitne službe, koje sudjeluju u evakuaciji ljudi i gašenju samoga požara. Također, osim odabira ispravnih mjera zaštite, potrebno je osigurati kvalitetno izvođenje istih te izbjeći otkazivanje različitih sustava koji bi na taj način mogli dodatno povećati ishod samoga požara [2].

U načelu pasivne mjere zaštite očituju se u jednom od tri glavna oblika:

1. sekundarni sloj betona ili nekog drugog materijala na bazi cementa koji se postavlja na unutarnju površinu tunela,

2. obložne ploče od različitih zaštitnih materijala koje se također fiksiraju uz unutarnju površinu tunela te
3. različiti dodaci betonu, u obliku vlakana, koji čine beton otpornijim na djelovanje požara [2].

Također, osim dodavanja različitih sustava postojećoj konstrukciji tunela, postoji pristup u kojem se betonski konstruktivni elementi s namjerom predimenzioniraju s ciljem ostvarivanja vrlo velikog zaštitnog sloja, koji će u slučaju eksplozivnog odlamanja betona i dalje ostati dovoljno velik da konstrukcija izdrži utjecaje požara [39].

Nadalje, uz glavne mjere pasivne zaštite, postoje još tri dodatna oblika:

1. prefabriciranje konstruktivnih elemenata tunelske obloge sa slojevima kompozita koji su otporni na djelovanje požara [40], [41],
2. korištenje kompozita ojačanih vlaknima, primarno za zaštitu instalacija, a ne konstruktivnih elemenata [42]
3. te posljednja kategorija koja obuhvaća ponajprije različite organske premaze koji pri djelovanju povišene temperature bubre i tvore izolacijski sloj.

Osim organskih premaza, koriste se i ablativni proizvodi koji troše veliku količinu topline nastale u požaru za svoju vlastitu razgradnju te naposljetku sublimirajući proizvodi koji također koriste toplinu pri čemu sami isparavaju [43].

### **3.2. Aktivne mjere zaštite od požara**

S druge strane, aktivne mjere zaštite od požara u tunelima, odnosno različiti aktivni sustavi zaštite predstavljaju tehničke sustave koji mijenjaju svoje stanje u slučaju požara, ručno ili automatski [2], te aktivno sudjeluju u procesu identifikacije požara, ograničavanja njegovog širenja, sudjeluju u gašenju, te upravljaju razdiobom dima u tunelu i predportalnim zonama. Dva najkorištenija oblika aktivne zaštite su ventilacijski sustavi i sustavi za gašenje požara na bazi vode (hidrantska mreža, sprinkler sustavi, sustavi visokotlačne vodene magle, *deluge* sustavi i sl.).



Obzirom da je glavni naglasak ovog diplomskog rada na pasivnoj zaštiti od požara, u daljnjem tekstu će se predmet interesa biti isključivo pasivna zaštita od požara u tunelima.

## 4. Tehnologija izvedbe tunela i tunelske obloge

Projektiranje i izvođenje tunelske konstrukcije predstavlja vrlo složen proces. Naime, često se podrazumijeva kako je glavno svojstvo tunela materijal, koji tvori tunelsku oblogu kao takvu ali činjenica je da glavnu ulogu u projektiranju i izvođenju tunela ima tlo u kojem se tunnel izvodi [44]. Za projektiranje te izvođenje tunela zahtijevaju se iste informacije o tlu i okolini u kojoj se tunnel izvodi ali iz različitih razloga. Naime, projektiranje tunela uvelike ovisi o geotehničkim svojstvima tla. Na temelju istih projektant mora ponuditi rješenje kojim će ostvariti sve postavljene zahtjeve za dani tunnel, a pritom u vidu imati i ekonomski aspekt; projekt mora moći biti izveden i u pogledu vremena i troškova [45]. S druge strane, izvođač koristi dobivene podatke o mediju u kojem se izvodi tunnel u svrhu provjere onoga što i kako smije izvesti. Naime, mora odrediti kako će poduprijeti tlo, koja je najbolja metoda miniranja, kako riješiti problem s vodom prilikom miniranja i slično [45]. Zbog toga su prvi koraci pri izvođenju tunela određivanje svojstava tla na danoj lokaciji. Nakon početnog određivanja svojstava samoga tla treba odrediti dijagram tlaka tla po Pecku [46]. Naposljetku potrebno je projektirati sustav potpore za tlo i odrediti pojedinosti za kontrolu dane konstrukcije kao što su: raspodjela momenata, graf pomaka, iznose posmičnih sila i njihovu raspodjelu i slično [46]. Danim podacima vrši se konstruktivna analiza jednom od dvije metode, ručno ili uz pomoć kompjutorske analize. Nadalje, rezultati analize konstrukcije koriste se za određivanje parametara same konstrukcije tunela kao što je debljina obloge, količina i pozicije armature itd. [45]. Ipak, bitno je naglasiti kako se neovisno o broju preliminarnih ispitivanja tla na lokaciji izvođenja tunela time dobivaju podaci o vrlo malom području i količini tla u odnosu na onu koja će uistinu biti zahvaćena izvođenjem tunela [44]. Posljedično, zaduženi inženjer na temelju postojećih podataka mora procijeniti i donijeti odluku o prikladnom projektu tunela te tehnikama izgradnje istoga [44]. Budući da se tlo ne ponaša kao kontinuum i postoji mogućnost pojave raslojavanja, rupa, promjene svojstava tla i sl., iskustvo predstavlja krucijalan aspekt u ishodu projektiranja i izvođenja tunela [45].

Renomirana međunarodna organizacija *International tunneling association* (ITA) u sklopu dokumenta „*Guidelines for structural fire resistance for road tunnels*“ iz 2004. godine predlaže podjele tunela s obzirom na različita svojstva poput: vanjske konfiguracije/oblika, vrste tunelske obloge, tehnologiji izvedbe, medija u kojem se tunel izvodi, svojstava ventilacijskog sustava, lokacije te o vrsti evakuacijskih puteva [47]. Upravo odabir metode konstrukcije predstavlja jedan od ključnih koraka u procesu izgradnje, odabira tunelske obloge i upotrebe tunela. Pregledom literature [44-47] napravljena je tablica 6. koja prikazuje podjelu različitih vrsta tunela s obzirom na tehnologiju izvedbe tunela te vrstu primarne i sekundarne tunelske obloge koje se za danu metodu najčešće izvode.

Tablica 6. Podjela tunela s obzirom na tehnologiju izvedbe tunela i vrstu tunelske obloge [44-47]

<b>Tehnologija izvedbe tunela:</b>	<b>Najčešće korištene tunelske obloge:</b>
S otvorenim licem bez štitova	Obloga od mlaznog betona ili predgotovljena betonska obloga
Bušenja dijela tunelskog lica	Obloga od mlaznog betona
Parcijalnog štitnog iskopa	Predgotovljena betonska obloga
Potpunog štitnog iskopa	Predgotovljena betonska obloga
Bušenja i korištenja eksploziva	In-situ armirano betonska ili predgotovljena betonska obloga
Novom austrijskom metodom (NATM)	Obloga od mlaznog betona
Iskopa i zatrpavanja	In-situ armirano betonska ili predgotovljena obloga
Uranjanja cijevi	Predgotovljena betonska obloga

Utiskivanja predgotovljenih segmenata	Predgotovljena betonska obloga
Utiskivanja tunela malih promjera	Armirano betonske i čelične obloge ili obloge od plastike ojačane staklenim vlaknima
Usmjerenog horizontalnog bušenja	Obloge od čelika ili polietilena visoke gustoće

#### 4.1. Tunelske obloge

Tunelske obloge predstavljaju sustave koji se postavljaju nakon iskopa tunela s ciljem ostvarenja dugoročne stabilnosti i trajnosti tunela te dugoročno održive završne površine [48], [49]. Nadalje, glavni parametri za odabir sustava tunelske obloge su geološki uvjeti i završna namjena tunela [49]. S druge strane Chapman D. et al. [44] kažu kako osim geoloških uvjeta i završne namjene tunela te sprječavanja prodora fluida u tunel [45], projektiranje tunelske obloge za određeni projekt ovisi o širokom rasponu parametara koji su specifični za isti. Sukladno tome, Legge N. ističe važnost uloge tunelskih obloga u pogledu sigurnosti tunela u slučaju požara [50]. Projektni parametri koje je potrebno uzeti u obzir su funkcionalnost u pogledu vrste i svojstava materijala te debljine obloge. Nadalje, bitno je kako se sama obloga konstruira, njen izgled te naposljetku trajnost u pogledu korozije, neželjenih kemijskih reakcija betona poput napada sulfata ili alkalno agregatne reakcije te otpornosti na djelovanje požara [44]. Hemphill G. B. ističe kako tunelske obloge imaju višestruku funkciju poput održavanja oblika tunela, osiguravanja stabilnosti iskopa i cjelokupne konstrukcije tunela, prenošenja svih opterećenja kroz predviđeni uporabni vijek, sprječavanja ulaska fluida u tunel i sl. [45]. Postoje dvije vrste tunelskih obloga: primarne (inicijalne) i sekundarne (finalne). Primarne služe kao potpora i stabilizacija okolnom tlu, a postavljaju se odmah nakon iskopa osiguravajući privremenu konstrukciju koja osigurava zaštitu radnika i opreme te mogućnost nastavka radova [45]. S druge strane, sekundarne

obloge osiguravaju dugotrajnu stabilnost i nosivost tunelske konstrukcije te sprječavaju prodor vode i vlage čime osiguravaju trajnost iste.

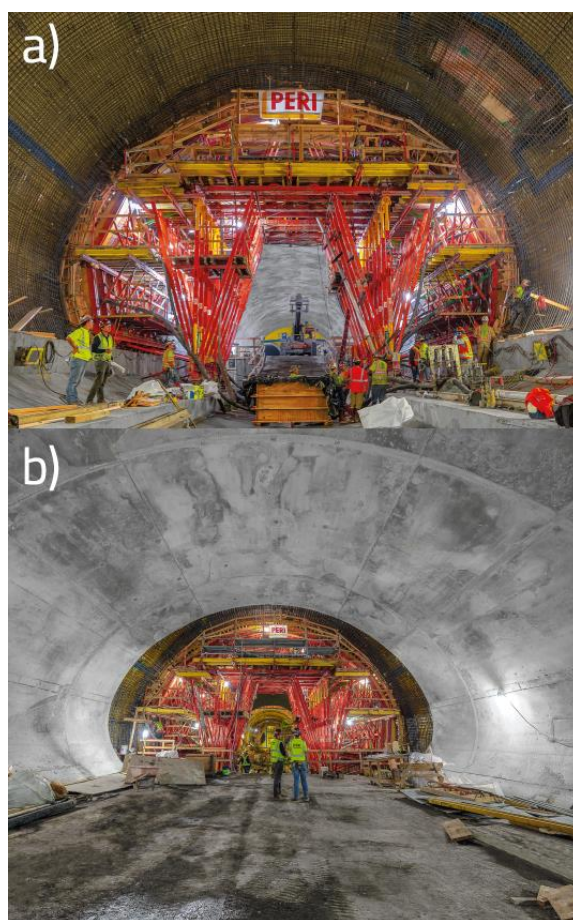
Iako postoji mnogo različitih sustava i materijala koji se mogu koristiti prilikom izrade tunelskih obloga, za sve vrijede određena pravila, odnosno sve tunelske obloge dijele određene karakteristike koje navode Bickel J. et al. 1996. godine: procesi prethodne obrade, iskop i stabilizacija tla mijenjaju postojeće stanje naprezanja promatranog tla prije nego tunelska obloga dođe u kontakt s tlom; opterećenja koja djeluju na tunelsku oblogu jako se teško definiraju, a ovise o svojstvima okolnog tla zbog čega se projektiranje tunelske obloge vrši na temelju interakcije tlo-konstrukcija; sva svojstva tla smatraju se vremenski-ovisnima, posebice nakon iskopa, što rezultira pojavom vremena stabilnosti koje predstavlja nužan uvjet za praktično izvođenje tunela; najozbiljniji konstruktivni problemi tunelskih obloga javljaju se uslijed nedostatka šupljina iza same obloge, više nego uslijed intenziteta i distribucije opterećenja; budući da je savojna čvrstoća i krutost tunelske obloge relativno mala u odnosu na okolno tlo, mijenjanje svojstava tunelske obloge neće znatno utjecati na činjenicu da je tlo ono koje deformira oblogu zbog čega se kao bitno svojstvo promatra duktilnost tunelske obloge [44], [45], [49].

Projektiranje tunelske obloge, koja će osigurati sve zahtijevane parametre u pogledu otpornosti na djelovanje požara, kategorizira se kao pasivna mjera zaštite u lancu požarne sigurnosti [2]. Detaljan pregled pasivnih mjera zaštite dan je u poglavlju 4.

#### **4.1.1. In situ betonske obloge**

Iako se in-situ betonska obloga može koristiti i kao primarna tunelska obloga za stabilizaciju tla, uobičajeno se koristi kao sekundarna tunelska obloga [49] gdje već postoji inicijalni sustav za stabilizaciju tla poput čeličnih lukova ili mlaznog betona [44]. U oba slučaja beton se izlijeva u oplatu koja se prisanja ili uz tlo ili inicijalni sustav stabilizacije. Projektiranim parametrima određuje se nužnost i količina armature [45]. Može se primjenjivati i u mekom i tvrdom tlu. Nadalje, ukoliko se radi o vlažnim uvjetima tla, potrebno je postaviti vodootporne membrane između inicijalnog sustava stabilizacije i sekundarne tunelske

obloge [48], [49]. In situ betonske obloge često se izvode koristeći pomičnu oplatu kojom se ostvaruje mogućnost kontinuiranog izvođenja tunelske obloge kroz 24-satne cikluse. Iako je takav sustav vrlo skup, njegovim kontinuiranim korištenjem za veće duljine tunela, postaje ekonomski isplativ [44]. Također, oplata se može izvesti u raznim oblicima i dimenzijama što uvelike olakšava izvođenje različitih poprečnih presjeka. Kako bi se osigurao kontakt inicijalnog sustava stabilizacije i tunelske obloge, u trenutku kada sekundarna betonska obloga dosegne 28-dnevnu čvrstoću, vrši se injektiranje injekcijskom smjesom [48]. Sama duljina izlivanja betona obično je ograničena zahtjevima vezanim uz površinske pukotine, posebno u slučaju kada tunelska obloga nije armirana [48]. Izgled tunela prije i nakon izvođenja in-situ betonske obloge prikazan je na slici 13.



Slika 13. Izgled tunela a) prije izvođenja in situ betonske tunelske obloge i b) nakon izvođenja iste [51]

Zahtijevana debljina in-situ betonske obloge, ukoliko nije armirana, iznosi 25 cm. S druge strane, uobičajena debljina armirane in-situ betonske obloge i vodonepropusne in-situ

betonske obloge iznosi 30 i 35 cm [50]. Minimalna debljina zaštitnog sloja primarno ovisi o lokaciji izvođenja tunela te kemijskom sastavu podzemnih voda. Pretraživanjem i pregledom stručne i znanstvene literature nije utvrđeno postojanje jasno definiranih zahtjeva o čvrstoći betona specifično za izvođenje in-situ tunelskih obloga ali sugerira se korištenje preporuka prema ACI 318M – 11 [52] i Eurokoda 2 [53] kojima se daju općenite preporuke za korištenje betona normalne čvrstoće (<C50/60) te betona visoke čvrstoće (>C55/60). Nadalje, sastav betona mora biti projektiran na način koji će osigurati minimalan nastanak pukotina. Pukotine najčešće nastaju uslijed: razlike u čvrstoći i naprezanjima u betonu koji sazrijeva, temperaturnog gradijenta površine i središta betona te mogućeg pre ranog skidanja oplata [50]. Iako se konačni sastav betona optimizira velikim brojem iteracija na temelju rezultata laboratorijskih ispitivanja pojedinih mješavina, postoje neka temeljna pravila koja osiguravaju smanjenje vjerojatnosti nastanka pukotina; potrebno je:

1. Minimalizirati količinu cementa u sastavu
2. Minimalizirati količinu vode u sastavu
3. Dodati aditive za povećanje obradivosti
4. Dodati leteći pepeo i dobro graduiran agregat kako bi se povećala obradivost u slučaju korištenja minimalnog udjela vode
5. Koristiti membrane za njegovanje betona te ograničiti djelovanje ventilacijskog sustava [50].

Tijekom uporabnog vijeka tunela isti će biti izložen djelovanju velikog broja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja što može uzrokovati nastanak pukotina, njihovo širenje te raspucavanje betonske tunelske obloge. Uobičajen pristup zaštiti betona od djelovanja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja je odabrati agregat za sastav betona koji je otporan na smrzavanje. Takav agregat karakterizira niska razina apsorpcije vode čime se smanjuje rizik od smrzavanja. Nadalje, potrebno je koristiti niski vodocementni omjer čime se smanjuje poroznost betona i time ponovo smanjuje količina vode koja može ući u beton. Naposljetku, upotrebom aeranata, stvaraju se sitni mjehurići zraka unutar betonske konstrukcije što

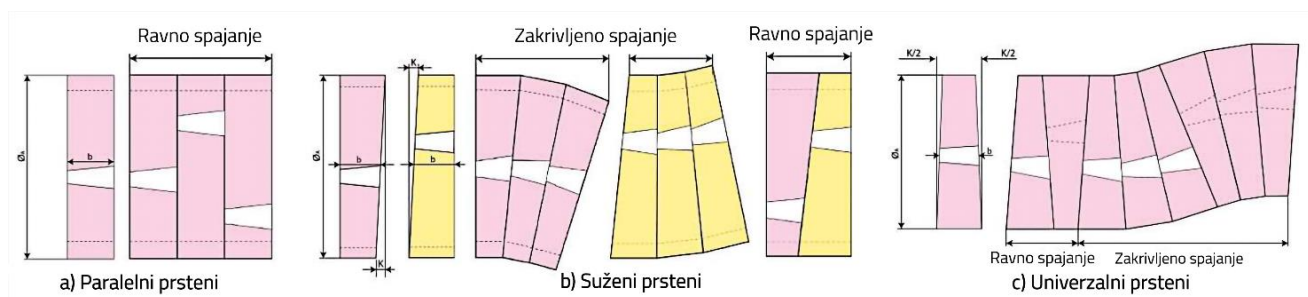
omogućuje širenje vode pri smrzavanju. Dane mjere rezultiraju manjim rizikom od nastanka pukotina prilikom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja.

Glavne prednosti in-situ betonske obloge su mogućnost njenog izvođenja neovisno o vrsti iskopa i inicijalnom sustavu stabilizacije te oblika tunela. Također, njome se mogu ispraviti nepravilnosti pri iskopu, a zahtijeva minimalno održavanje [48]. S druge strane, nije moguće vršiti vibriranje betona u oplati što može rezultirati lošom konsolidacijom. Nadalje, kemijske tvari iz tla i podzemnih voda mogu uzrokovati ubrzanje korozije, a ukoliko dođe do stvaranja pukotina, taj proces se dodatno ubrzava [48].

#### **4.1.2. Predgotovljene betonske tunelske obloge**

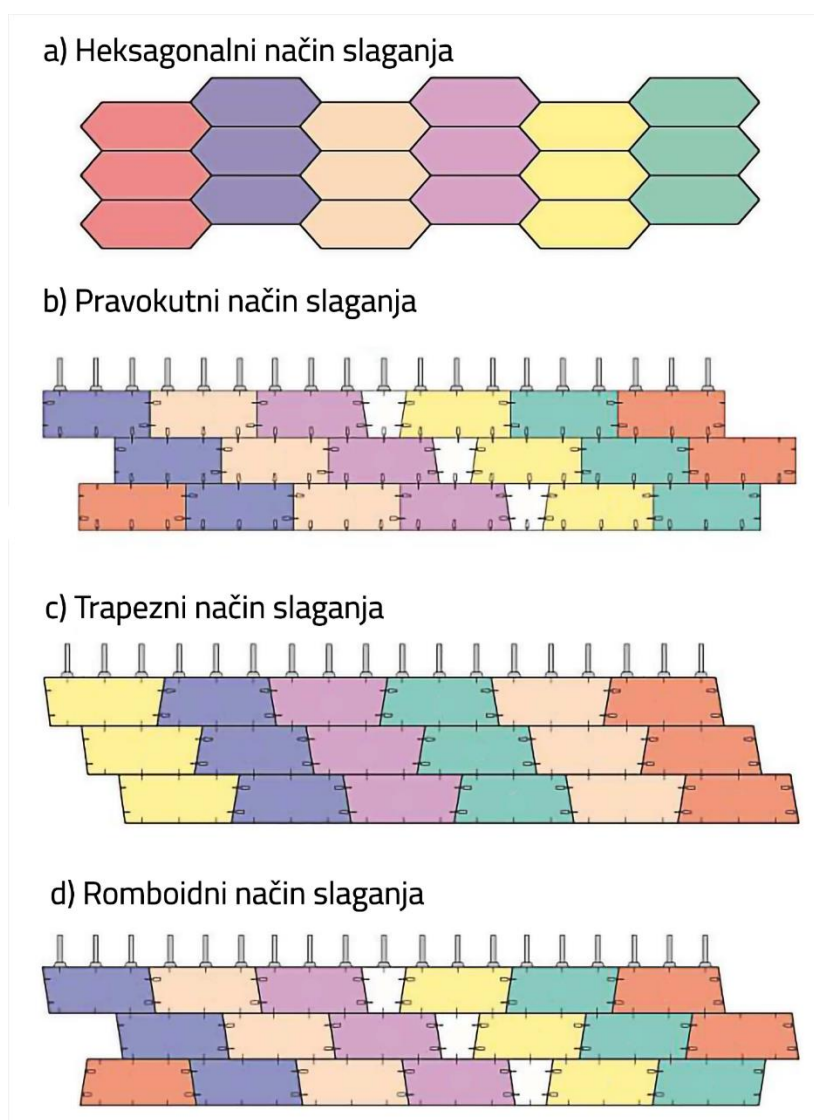
Segmentne tunelske obloge podupiru i stabiliziraju okolno tlo konstrukcijom koja se sastoji od velikog broja predgotovljenih konstruktivnih elemenata koji se međusobno povezuju i formiraju kontinuiranu, najčešće kružnu konstrukciju [44]. Dimenzije samih segmenata mogu se izvesti specifično za potrebe danog projekta. Nadalje, mogu se izvoditi kao inicijalni sustav za stabilizaciju tla nakon čega se izvodi in-situ betonska sekundarna obloga ili se mogu izvoditi s dvostrukom ulogom, inicijalne i finalne obloge. Svaki prsten predstavlja jednu cjelina tunelske konstrukcije koja se najčešće sastoji od šest ili više predgotovljenih elemenata koji se spajaju i postavljaju u repu stroja za bušenje tunela, TBM (eng. *Tunnel Boring Machine*) prilikom iskopa tunela. Potom ih svojevrsna dizalica koja najčešće radi na principu vakuuma postavlja na konačnu poziciju u tunelu nakon čega se može izvesti injektiranje s ciljem ostvarenja boljeg kontakta između segmenata i tla [45], [48]. Debljina i duljina pojedinih elemenata ovisi o promjeru tunela, a u pravilu radi se o debljini u rasponu od 15 – 25 cm i duljini od 1.5 do 2 metra [47]. Postoje različiti sustavi izvođenja prstena segmentne obloge. Naime, sustavi prstena mogu biti paralelni s ili bez dodatnih korektivnih prstena, suženi s lijeve ili desne strane te univerzalni; pojedini sustavi prikazani su slikom 14.





Slika 14. Različiti sustavi prstenova segmentne obloge [47]

Nadalje, postoje četiri glavna oblika pojedinih segmenata: heksagonalni, pravokutni, trapezni i romboidni te sukladno tome i njihov način slaganja [47]. Slika 15. prikazuje način slaganja pojedine vrste [54], [55].



Slika 15. Načini slaganja različitih geometrijskih oblika segmentne tunelske obloge [47]

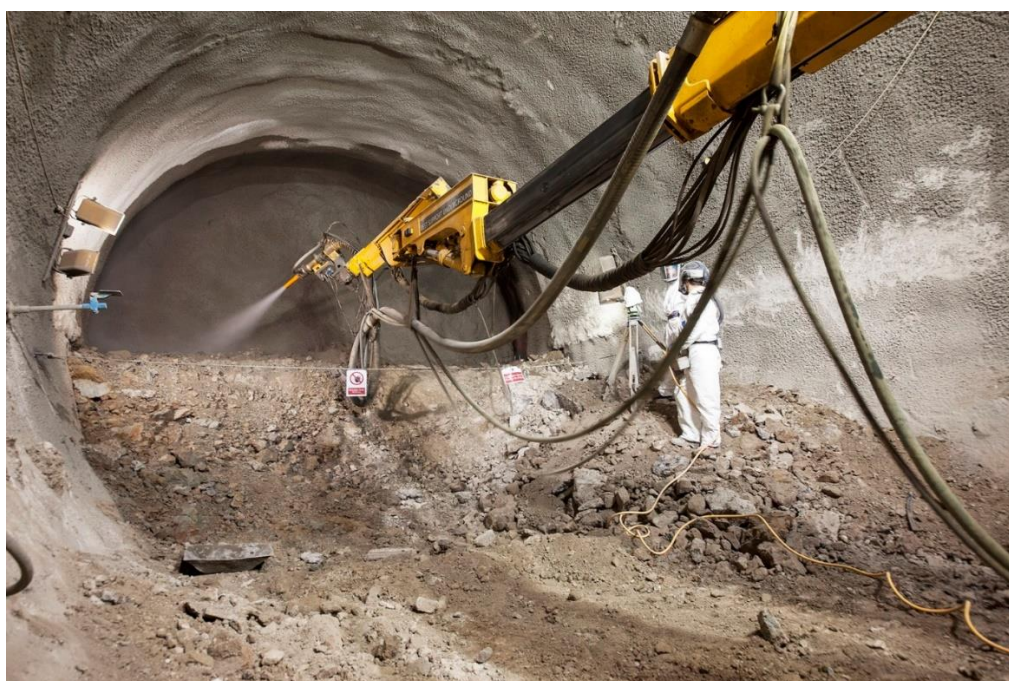
Ova vrsta obloga najčešće se izvodi ukoliko se radi o mekom tlu ili ukoliko se radi o teškim uvjetima izvođenja u tvrdim tlima ali svi projektni principi vrijede i za tvrda tla [45]. Glavna razlika očituje se u različitim opterećenjima koja se javljaju na tunelsku oblogu. Naime, opterećenja uslijed vađenja elemenata iz kalupa, skladištenja, transporta, postavljanja i injektiranja čine privremena opterećenja [56], a opterećenja uslijed djelovanja težine tla, vodnih tlakova, prometnih opterećenja i susjednih konstrukcija predstavljaju stalna opterećenja; najveća opterećenja često nastaju uslijed pomicanja tunelskog štita ili TBM stroja [44]. Segmentne tunelske obloge mogu biti povezane vijcima ili tiplama. Također, mogu se spajati bez veznih sredstava, tada se nazivaju tzv. proširenim oblogama. Odabir načina povezivanja uvelike ovisi o načinu konstrukcije samog tunela [56]. Najčešće se izrađuju od ne armiranog betona, armiranog betona ili betona ojačanog vlaknima te tzv. nodularnim lijevom, odnosno vrstom lijevanog željeza s dodatkom kuglastog grafita. Trajnost ovih obloga može se poboljšati različitim načinima poput povećanja debljine zaštitnog sloja, smanjenja propusnosti i povećanja gustoće, različitim premazima i korištenjem vlakana te katodne zaštite [54], [56]. Sastav betona za izvođenje ovih obloga u pravilu može biti uobičajen. Naime, čvrstoće u rasponu od 25 – 35 MPa najčešće zadovoljavaju sve tražene zahtjeve. Poželjno je koristiti aerante kako bi se povećala otpornost na smrzavanje budući da postoji mogućnost skladištenja danih segmenata u hladnim uvjetima te vrlo niskim temperaturama u samome tunelu nakon ugradnje [48].

Zaštita od vode tradicionalno se izvodila u obliku brtvljenja prema unutarnjoj strani obloge na spojevima, a u novije vrijeme povećava se upotreba EPDM (eng. *Ethylene Propylene Diem Monomer*) predgotovljenih brtvi [45], [57]. Dani sustavi se ne koriste kako bi se ostvarila vodonepropusnost samih segmenata obloga, nego spriječio prodor vode na njihovim spojevima. Nadalje, glavne prednosti predgotovljenih betonskih tunelskih obloga su: osiguravanje potpore i stabilnosti tlu, elementi se jednostavno transportiraju, lako se rukuje istima, nije potrebna oplata i njegovanje betona, dobra su podloga završnim slojevima te se lako održavaju [48]. Ipak, postoje različiti nedostaci poput činjenice da segmenti moraju biti izvedeni vrlo precizno, na mjestu izvođenja potrebno je osigurati skladišni prostor, mogu se

oštetiti prilikom transporta ili rukovanja, segmenti za brtvljenje moraju biti izvedeni s visokom tolerancijom kako bi se osiguralo njihovo funkcioniranje nakon ugradnje, problem korozije armature te njeno ubrzanje uslijed pukotina i kemijskih tvari iz tla i vode [48].

#### 4.1.3. Obloge od mlaznog betona

Mlazni beton predstavlja beton koji se prska pod visokim tlakom kroz pneumatsko crijevo i na taj način ugrađuje na svoje konačno mjesto velikom brzinom i simultanim zbijanjem, slika 16 [55].



Slika 16. Strojno izvođenje tunelske obloge od mlaznog betona [58]

Sastoji se od vode, cementa, agregata i različitih dodataka, a u odnosu na obični beton ima više sitnih frakcija te više cementa i aditiva. Dano rezultira bržim porastom čvrstoće ali manjom konačnom čvrstoćom te izraženijim efektom skupljanja i puzanja [44], što je izrazito bitno pri ranom opterećivanju [59]. Najbitniji dodatak je ubrzivač vezivanja, kojim se osigurava brzo povećanje čvrstoće te posljedično veća brzina ugradnje. Problem dodavanja ubrzivača vezivanja u sastav betona je smanjenje 28-dnevne čvrstoće ali isto se može kompenzirati prilikom projektiranja sastava ostalih komponenti [45]. Dodavanjem letećeg pepela postiže se veća gustoća i trajnost betona te bolja prionjivost što omogućava

ostvarivanje veće debljine slojeva. Također dodatak letećeg pepela povećava čvrstoću, smanjuje skupljanje te smanjuje odbijanje betona od podloge za otprilike 50% [45]. Armiranje mlaznog betona koristi se kako bi se povećala njegova duktilnost. Najčešće se dodaju čelična ili sintetička vlakna, žičane mreže ili armaturne šipke [45]. Budući da se beton prska velikom brzinom i postoji mogućnost njegovog odbijanja, neizmjereno je bitno osigurati sastav betona koji će minimalizirati odbijanje i osigurati dobro prijanjanje i zbijen sloj betona [45]. Korištenjem velike količine sitnih čestica povećava se potreba za vodom što može dovesti do povećanog skupljanja. Također, velika količina vode i visoki vodocementni omjer dovest će do smanjenja čvrstoće i gustoće mlaznog betona [60]. Prionjivost mlaznog betona za podlogu ovisi o faktorima poput svojstava površine same podloge, vlazi, površinskoj vodi te sastavu samog mlaznog betona i brzini njegovog nanošenja. Idealna površina za nanošenje mlaznog betona treba biti vlažna i hrapava [48]. Vodonepropusnost može se ostvariti vodootpornim plahtama, prskanim membranama ili korištenjem vodonepropusnog betona [44]. Postoje dva načina izvođenja mlaznog betona, suhim i mokrim postupkom. U suhom postupku sastojci se miješaju s vodom tek u mlaznici prilikom prskanja, a kod mokrog postupka smjesa betona se prska gotova. Prednosti korištenja suhog postupka su sljedeće: visoka rana čvrstoća, niski troškovi ugradnje u usporedbi s drugim metodama te mal prostor potreban za manevar prilikom ugradnje, a glavni nedostatak ove metode je nastanak velike količine prašine te varijabilnost svojstava betona s obzirom da se količina vode kontrolira na mlaznici [59]. S druge strane, prednosti korištenja mokrog postupka očituju se u manjem utjecaju ljudske pogreške budući da je vodocementni omjer fiksiran, mogućnost bržeg i većeg izbacivanja betona jer se prskanje vrši robotski zbog težine mlaznice, manje odbijanje betona pri udaru u površinu te manje prašine [59]. Mokri postupak se češće koristi na većim projektima zbog spomenute mogućnosti prskanja veće količine betona, a u pogledu troškova nema velike razlike. Obloge od mlaznog betona najčešće se koriste kao sekundarne obloge koje se postavljaju na primarne obloge koje stabiliziraju okolno tlo [59].

#### 4.1.4. Rebrasti sustavi

Rebrasti sustav potpore tradicionalno se koristio i razvijao za iskope tunela metodom bušenja i korištenja eksploziva, posebice za stijene vrlo loših svojstava [49]. Rebrasti sustav ostvaruje se postavljanjem elemenata valjanog čelika po ovojnici iskopa tunela na određenim intervalima [44]. Neizbježno je postojanje prostora između tla i čeličnih rebara te se stoga ista moraju dobro učvrstiti kako bi se spriječile prekomjerne deformacije. Slika 17. prikazuje izgled i način postavljanja čeličnih rebara.

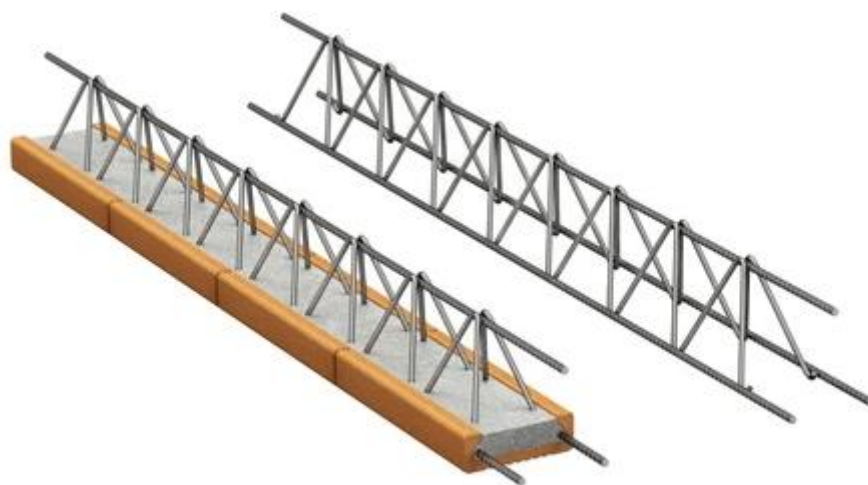


Slika 17. Rebrasti potporni sustav s čeličnim rebrima [61]

Vrlo često se rebrasti sustav izvodi u kombinaciji s mlaznim betonom. Uobičajeno se prvo izvodi sloj mlaznog betona nakon čega se postavljaju čelična rebra. Na taj način osigurava se bolja podloga i lakše učvršćivanje rebara. Potom se nanosi još jedan sloj mlaznog betona kako bi se postigla bolja integracija rebrastog sustava s tunelskom oblogom te postigla veća stabilnost [44]. Čelična rebra se često zabijaju u betonske blokove kako bi se osigurao prijenos opterećenja u tlo i spriječilo slijeganje. Također, potrebno je osigurati ravnomjernu

raspodjelu opterećenja na pojedina rebra s obzirom da se radi o točkastom prijenosu opterećenja [44].

U novije vrijeme, čelična rebra često se zamjenjuju rešetkastim nosačima prikazanima na slici 18. Radi se o vrlo laganim, trodimenzionalnim čeličnim okvirima koji se uobičajeno sastoje od tri osnovne šipke povezane elementima za ukrućivanje [48]. One se također izvode u kombinaciji s mlaznim betonom te u završenom sustavu služe kao njegova armatura. Dizajn samog nosača određen je veličinom jedne sekcije te momentima koji se javljaju u primarnim šipkama. Položaj elemenata za ukrućivanje mora osigurati barem pet posto ukupnog momenta tromosti. Također, položaj primarnih šipki te elemenata za ukrućivanje mora osigurati nesmetano prskanje mlaznog betona na podlogu [48]. Glavna uloga danog sustava je osigurati potporu tlu, kontrolirati geometriju tunela te osigurati potporu žičanoj mreži koja se razvija između nosača.



Slika 18. Rešetkasti nosači za izvođenje rebrastih sustava [62]

#### **4.2. Oštećenja na tunelskim oblogama uzrokovana požarom – odlamanje betona**

Beton predstavlja najčešće korišten materijal za izradu tunelskih obloga. Budući da nije zapaljiv, njegovo korištenje u skladu je sa zahtjevima sigurnosti u slučaju požara u tunelima.

Ipak, uslijed djelovanja visokih temperatura, dolazi do mikrostrukturnih promjena u materijalu koje utječu na mijenjanja svojstava betona i do pojave odlamanja (eng. *Spalling*) [63]. Proces tzv. odlamanja betona predstavlja veliki problem kod požara u tunelima. Radi se o odlamanju manjih ili većih komada betona s površine elementa u uvjetima povišene temperature [64]. Iako postoji više različitih vrsta odlamanja betona [63], [65], najopasniju vrstu predstavlja eksplozivno odlamanje koje uzrokuje naglo odlamanje dijelova betonskog elementa te time i smanjenje njegovog poprečnog presjeka što naposljetku dovodi do izloženosti armature, smanjene nosivosti i sl. [64]. Primjer elementa tunelske obloge nakon eksplozivnog odlamanja betona prikazan je na slici 19 [66].



Slika 19. Element Great Belt tunela nakon požara – posljedice eksplozivnog odlamanja betona sekundarne obloge [66]

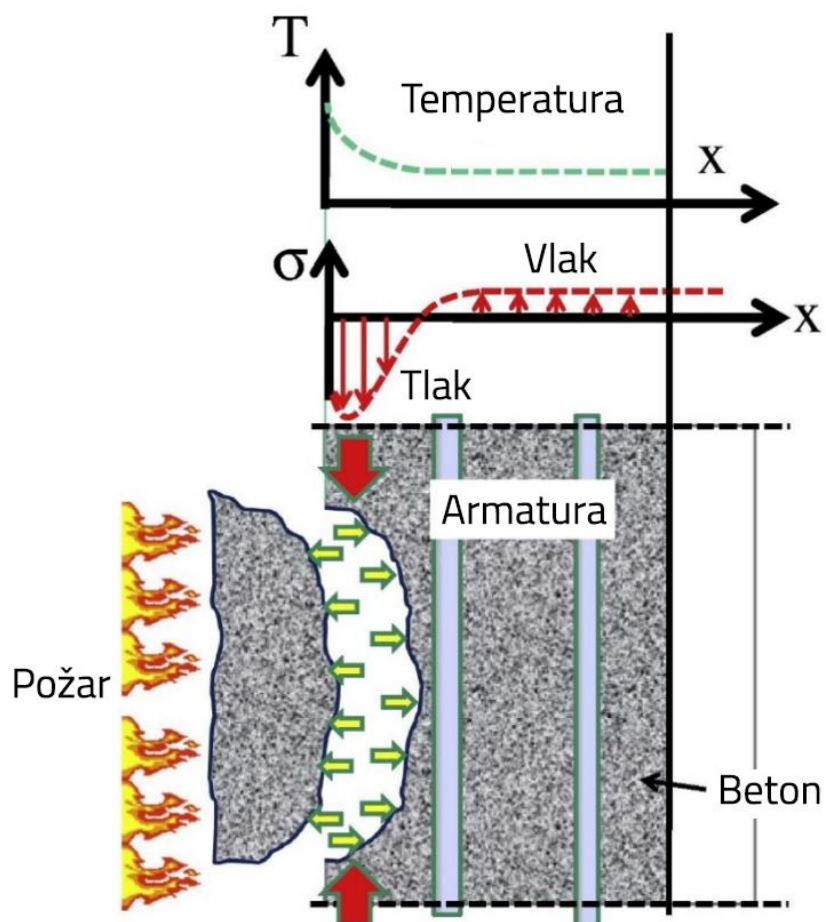
Pregledom literature [67-70] utvrđeno je kako ne postoji precizna definicija trenutka, odnosno temperature pri kojoj dolazi do odlamanja betona uobičajenih čvrstoća. Tenachev et al. [67], za kritičnu temperaturu odlamanja betona predlažu vrijednost od  $300^{\circ}\text{C}$ , dok Khoury et al. [68] kažu kako će kritična temperatura biti u rasponu od  $250$  do  $420^{\circ}\text{C}$ . Sličan raspon temperature predlažu i Qiao et al. [69], pretpostavljajući kako će do odlamanja betona doći pri temperaturi između  $200$  i  $500^{\circ}\text{C}$ . S druge strane, zbog svojstava navedenih

u nastavku poglavlja, kod betona visokih i ultra visokih čvrstoća, do odlamanja betona dolazi prije nego kod betona uobičajenih čvrstoća, odnosno sa znatno nižom gornje granice raspona temperatura. Rezultati ispitivanja koje su proveli Amran et al. [70] na betonima visokih čvrstoća, pokazali su kako je do odlamanja betona dolazilo u temperaturnom rasponu od 320-360°C.

Nadalje, postoje različiti faktori koji utječu na povećanje ili smanjenje rizika od odlamanja betona. Bitno je istaknuti kako po Eurokodu 2 [53], ukoliko je sadržaj vlage na ukupnu težinu elementa manji od 3%, nije potrebno provoditi mjere zaštite tj. opasnost od odlamanja betona je gotovo zanemariva ako se radi o betonima relativno niske čvrstoće. Spomenuti zahtjev pokazuje kako je sadržaj vlage jedan od glavnih faktora koji utječe na rizik od pojave odlamanja betona [69], [71]. Osim sadržaja vlage, na povećanje rizika utječe i velika brzina zagrijavanja, niski vodocementni omjeri te visoka čvrstoća betona. Dani uvjeti su na određen način isprepleteni. Naime, kako bi se ostvarile visoke i ultra visoke čvrstoće betona, potrebno je koristiti vrlo niske v/c omjere što rezultira vrlo niskom propusnošću i poroznošću te većim rizikom od odlamanja betona [5]. Dva faktora su direktno povezana s tunelima, visoka relativna vlažnost te posljedično visok sadržaj vlage samih betonskih obloga te vrlo velika brzina zagrijavanja; npr. jedna od najkorištenijih požarnih krivulja za predviđanje razvoja temperature u tunelima, RWS krivulja, predviđa razvoj temperature preko 1300°C već nakon 30 minuta.

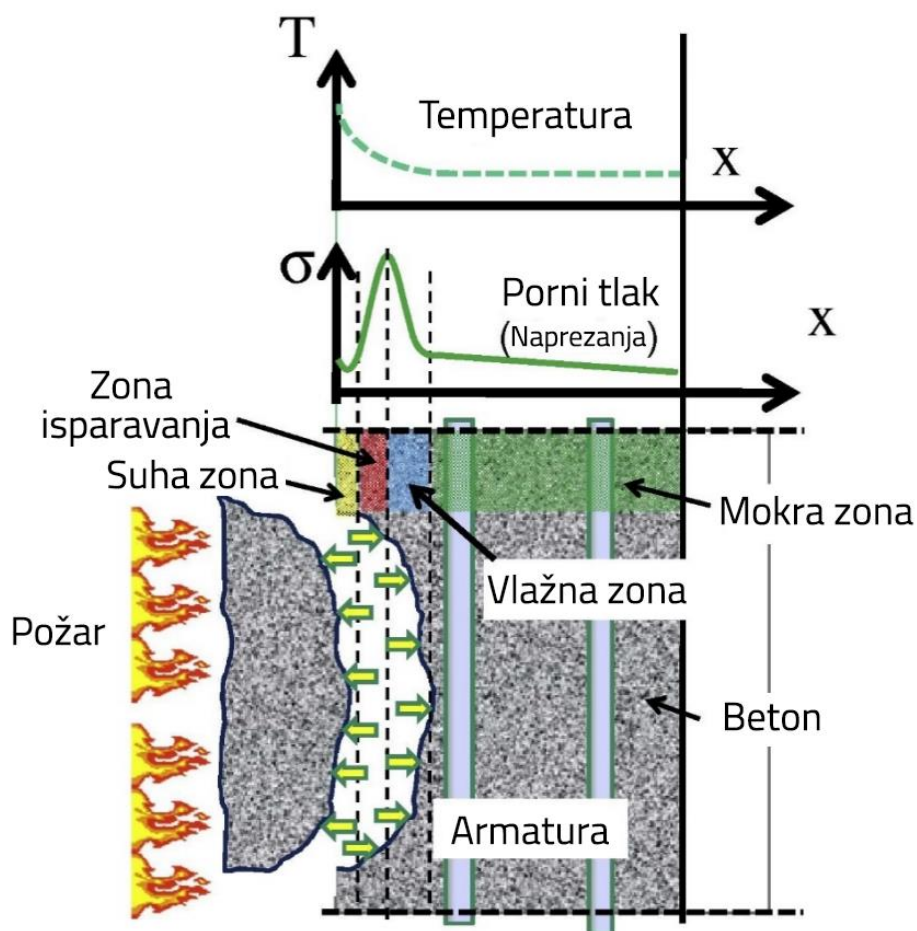
Dva različita fenomena uzimaju se kao mogući uzroci odlamanja betona: termo-mehanički procesi i termo-hidraulički procesi [72], [73]. Termo-mehanički procesi opisuju toplinsko širenje zagrijanog betona u odnosu na hladniji beton. Takav proces dovodi do pojave dvoosnih tlačnih naprezanja paralelno sa zagrijanom površinom što rezultira vlačnim naprezanjima okomito na zagrijanu površinu [72]. Vizualno, pojava tlačnih naprezanja paralelno s površinom uzrokuje naglo odlamanje betona s površine [73]. Termo-mehanički mehanizam odlamanja betona prikazan je slikom 20.





Slika 20. Termo-mehanički mehanizam odlamanja betona [74]

Nadalje, termo-hidraulički procesi opisuju transport i akumulaciju vlage i vodene pare u porni prostor betona što uzrokuje porast pornog tlaka. Nakon nekog vremena stvara se nepropusni sloj vlage (eng. *moisture clog*) koji dodatno ubrzava proces porasta pornog tlaka te u konačnici odlamanje betona [75]. Termo-hidraulički mehanizam odlamanja betona prikazan je slikom 21. Bitno je istaknuti kako su termo-hidraulički procesi dokazani i eksperimentalno i numerički [64].



Slika 21. Termo-hidraulički mehanizam odlamanja betona [74]

Također, postoje različiti numerički pristupi koji promatraju samo plinovitu fazu, dvije faze (tekućina – plin te plin – čvrsta tvar) ili uspostavljaju vezu između plinovite i tekuće faze [64]. Kako bi se ostvario što realniji model potrebno je uzeti u obzir sve utjecajne faktore poput provođenja topline, difuzije plinova i vlage, propusnosti betona i sl.

Rezultati ispitivanja koje su proveli Zhang Y. et al. [64] prikazuju utjecaj pojedinih faktora na povećanje ili smanjenje vjerojatnosti odlamanja betona. Manja vrijednost unutarnje propusnosti rezultira većim rizikom odlamanja betona jer dolazi do brže akumulacije plinskog tlaka [64]. Uz pretpostavku da saturacija promatranog elementa ostane nepromijenjena, rizik od odlamanja betona raste s porastom poroznosti uslijed povećanja količine vode koja može isparavati tijekom zagrijavanja. Nadalje, s povećanjem saturacije raste i količina vode koja može isparavati tijekom zagrijavanja i smanjuje se relativna plinopropusnost što rezultira povećanjem rizika od odlamanja betona. Naposljetku, rezultati

ovog ispitivanja pokazali su kako povećanjem čvrstoće betona dolazi do smanjenja vjerojatnosti odlamanja betona što u stvarnosti nije tako budući da je beton viših čvrstoća u pravilu gušći što rezultira manjom unutarnjom propusnošću i većim rizikom od odlamanja betona [64].

### **4.3. Dokazivanje otpornosti na požar tunelskih obloga**

Općenito, za dokazivanje otpornosti na požar konstrukcijskih elemenata koriste se dva pristupa: preskriptivni pristup koji uključuje standardizirana ispitivanja te tzv. *performance-based* pristup koji se uglavnom temelji na modeliranju.

*Performance-based* metodologija i napredni CFD modeli predstavljaju budućnost projektiranja mjera zaštite od požara u tunelima na temelju velikog broja promjenjivih ulaznih parametara čime se daje vrlo vjerodostojan i realan prikaz ponašanja požara u tunelima. Spomenutom metodologijom u obzir se uzimaju parametri poput stvarne duljine trajanja požara, širenja požara unutar samoga tunela te stavki specifičnih za pojedine tunele i incidente kao što je veličina požarnog opterećenja, promjenjiva snaga ventilacijskog sustava, nagib i oblik tunela itd. Rezultat takvog pristupa očituje se u učinkovitijem projektiranju, namijenjenom specifično za potrebe promatranoga tunela, što u konačnici smanjuje i same troškove [76].

Ipak, u inženjerskoj praksi i dalje se najčešće upotrebljava preskriptivni pristup, temeljen na standardiziranim ispitivanjima, opisan detaljno u nastavku [76].

#### **4.3.1. Ispitivanje tunelskih obloga izloženih požaru**

S ciljem procjene rizika nastanka odlamanja betona za pojedinu vrstu tunelske obloge, zajedno s njenom zaštitom u obliku vanjskog zaštitnog sustava ili dodataka mješavini betona, provode se ispitivanja odlamanja betona ili ograničivanja porasta temperature sukladno preporukama [34]. Do sada u još nije donesena harmonizirana norma za ispitivanje odlamanja ili utjecaja požara na tunelske obloge, pa se u praksi koriste preporuke Rijkwaterstaat-a i nizozemskog požarnog instituta, Efectisa [34], koje će biti detaljno

opisane u nastavku. Također, bitno je istaknuti kako je krovni dokument u pogledu projektiranja i proračuna betonskih konstrukcija na djelovanje požara u Hrvatskoj HRN EN 1992-1-2 [53] gdje su tablično dane otpornosti na požar betonskih zidova ili stropova ovisno o debljini, koje se mogu primijeniti i na tunelske obloge pravilnog podgleda, ali se ovdje neće dodatno razmatrati.

#### 4.3.1.1. Ispitivanje odlamanja betona

Prema [34], postoje četiri glavna zahtjeva prilikom ispitivanja odlamanja betona:

1. Prvi kaže da sastav betona mora biti što reprezentativniji u pogledu vrsta i omjera sastojaka te kako je uporaba polipropilenskih vlakana poželjna, ukoliko je to moguće.
2. Tlačno opterećenje na uzorak trebalo bi odgovarati opterećenju na stvarnu tunelsku oblogu.
3. Uzorci trebaju biti pripremljeni i njegovani na odgovarajućoj temperaturi i vlažnosti.
4. Naposljetku, preporuča se ispitivanje uzoraka uz uporabu zaštitnih mjera, odnosno sustava zaštite.

#### **Geometrija i dimenzije elemenata za ispitivanje**

Kako bi se neko ispitivanje smatralo važećim, isto mora biti provedeno barem dva puta na identičnim uzorcima stvarne veličine, u mjerilu 1:1. Također, odgovarajući, tj. identičan mora biti i sastav betona, korišteni sustavi zaštite od požara, debljine elemenata, opterećenje te uvjeti zagrijavanja. S obzirom da uzorci moraju biti reprezentativni u pogledu promatranog tunela u stvarnosti, rezultati ispitivanja u načelu su važeći samo za predmetni tunel [34].

Geometrija uzoraka za ispitivanje mora odgovarati geometriji danih elemenata u stvarnome tunelu. Osim geometrije elemenata, isto vrijedi i za njihovu veličinu [34]. Za elemente koji će se izvoditi in-situ, uzorci za ispitivanje trebaju biti izvedeni u dimenzijama koje će osigurati da na rubovima istih ne dođe do smanjene pojave odlamanja betona. Naime, odlamanje betona na rubovima elemenata u pravilu manje je nego na ostalim dijelovima te se zbog vjerodostojnosti uzorka, isti mora izvesti u dovoljno velikim dimenzijama [34]. Nadalje,

ukoliko se ispitivanje provodi na betonskim elementima, tj. betonskoj tunelskoj oblozi bez izvedenog sustava zaštite od požara najmanja izložena površina mora biti  $5 \text{ m}^2$ , kako bi se izbjegao smanjeni efekt odlamanja betona na rubovima. S druge strane, ukoliko se radi o ispitivanju uzoraka s izvedenom vanjskom zaštitom od požara, minimalna izložena površina iznosi  $8 \text{ m}^2$  [34]. Naposljetku, debljina zidova i ploča ograničena je na debljinu od 40 centimetara zbog praktičnosti ispitivanja. Naime, duljina greda i stupova izloženih djelovanju požara treba biti barem četiri puta veća od debljine ili visine, ovisno o tome koja vrijednost je veća; granična vrijednost debljine ili visine se uzima kao jedan metar [34]. Nadalje, armatura također mora biti izvedena sukladno stvarnom tunelu. Promjer šipki armature, osni razmak, debljina zaštitnog sloja betona i vrsta distancera mora odgovarati istim stavkama u stvarnom tunelu [34]. Također, način proizvodnje uzorka mora odgovarati načinu proizvodnje stvarnog elementa kako bi se izbjegli neželjeni efekti. Različito stanje površine u pogledu materijala, hrapavosti, propusnosti oplata, sredstva za čišćenje te vrsta i veličina distancera mogu biti faktori koji utječu na nejednakosti u proizvodnji. In-situ izvedeni elementi koji se koriste kao stropni elementi, dobivaju se iz horizontalne oplata, pri čemu je donja ploha, koja je bila u oplati, ona koja je izložena djelovanju požara. Isto vrijedi i za zidne elemente ukoliko je donja ploha u oplati ona koja će biti izložena djelovanju požara [34]. U pogledu identičnosti sastava betona stvarnog elementa i uzorka za ispitivanje potrebno je koristiti jednaku vrstu i veličinu zrna agregata, vrstu i količinu cementa, isti vodocementni omjer, vrstu i količinu mikro-filera te vrstu i količinu polipropilenskih vlakana ako su predviđeni u mješavini [34].

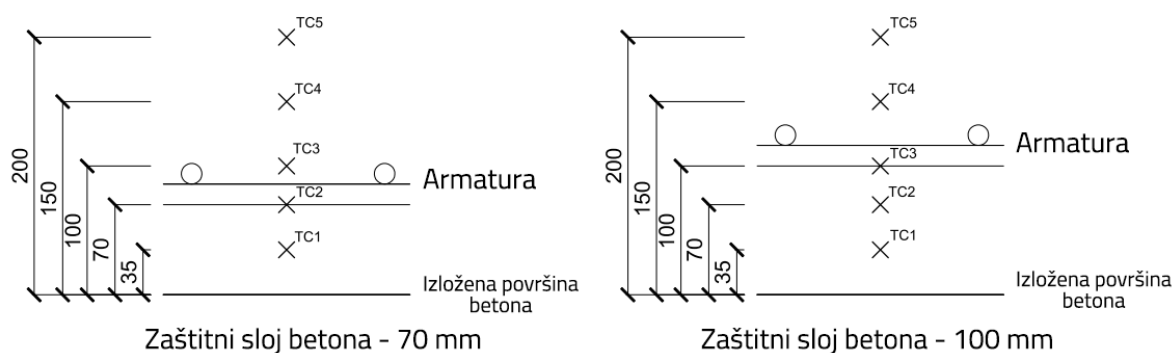
### **Opterećenje tijekom ispitivanja**

Tlačna naprezanja koja djeluju na konstrukciju tunela u stvarnosti, trebaju biti primijenjena i na uzorke koji se ispituju. Bitno je istaknuti kako uzorci moraju biti jednoliko opterećeni [34]. Iznos tlačnih naprezanja na površini uzorka koja je izložena djelovanju požara treba biti jednaka maksimalnoj vrijednosti tlačnih naprezanja izložene površine tunelske obloge pri čemu je sama obloga, tj. tunelska konstrukcija izložena određenom opterećenju [34]. U praksi se opterećenje na uzorke nanosi korištenjem vanjskog okvira. Ukoliko okvir za

nanošenje opterećenja nije dostupan ili ne može nanijeti odgovarajući iznos opterećenja, mogu se koristiti tehnike naknadnog napinjanja. Kako bi se omogućila uporaba tehnike naknadnog napinjanja, potrebno je prilikom ugradnje uzoraka izvesti otvore kroz koje će se provući kablovi za napinjanje. Također, izrazito je bitno pozicioniranje otvora i kablova kako bi se ostvarilo uniformno opterećenje [34].

### **Praćenje temperature tijekom ispitivanja**

Budući da je cilj samoga ispitivanja odlamanja betona provjeriti dolazi li ili ne dolazi do odlamanja betona te ukoliko dolazi na kojoj temperaturi se to događa, mjerenje temperature u samoj betonskoj tunelskoj oblozi je izrazito bitno. Kako bi se provelo mjerenje, najčešće se koriste termočlanci vrste K (legure nikla, kroma i aluminijska) zbog velike učinkovitosti mjerenja [34]. Naime, odgovor termočlanka na promjenu temperature je jedno od glavnih svojstava kojim se osigurava zahtijevana preciznost. Termočlanci se postavljaju u oplatu na način da su povezani s armaturom te su pozicionirani tako da ne utječu na promjenu dimenzija elementa i da se ne pomiču tijekom izlivanja betona [34]. S ciljem mjerenja temperature na različitim pozicijama unutar elementa te mogućim praćenjem napretka odlamanja betona, termočlanci se postavljaju uz samu površinu elementa, uz armaturu te u zaštitni sloj betona. Rijkwaterstaat propisao je pozicije termočlanaka, gdje isti trebaju biti postavljeni s donje strane dna armature te na polovici razmaka između površine i donje strane armature s maksimalnim razmakom od 35 milimetara, iza same armature postavljaju se s razmakom od maksimalno 50 milimetara do dubine od 200 milimetara. Temperatura treba biti mjerena na barem 6 lokacija za svaku promatranu dubinu i to jednoliko po cijeloj površini uzorka. Primjeri postavljanja termočlanaka prikazani su na slici 22 [34].



Slika 22. Pozicije termočlanaka u uzorku [34]

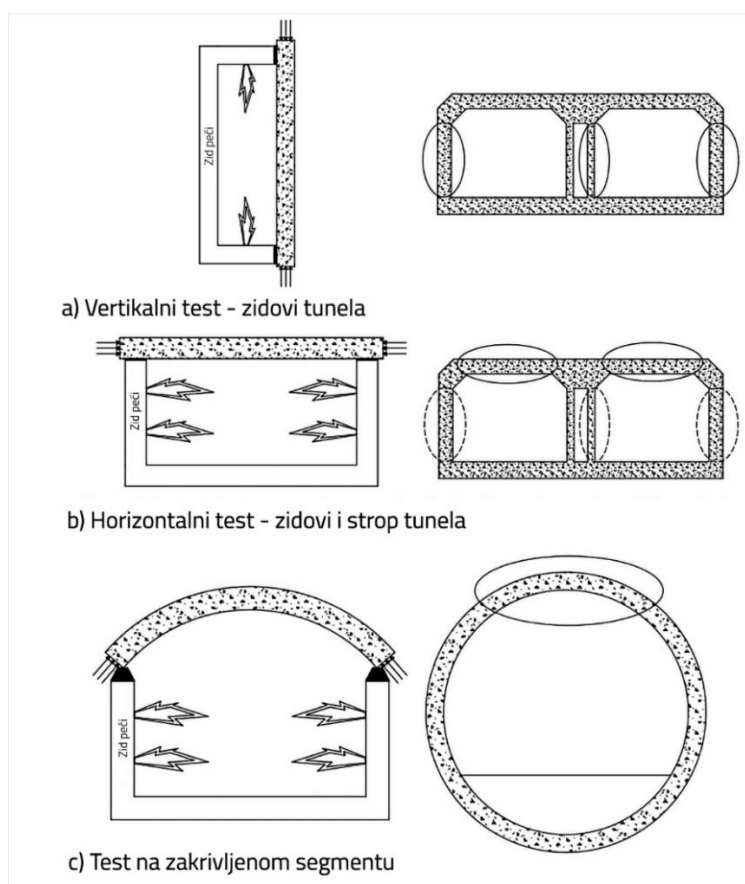
### Sustav primijenjene zaštite

Kao što je već spomenuto, ukoliko je u tunelu predviđeno da se na tunelsku oblogu ugradi dodatna zaštita od porasta temperature uslijed požara, onda se ta zaštita treba postaviti i na sami uzorak za ispitivanje. S obzirom na različite vrste takvih sustava poput prskanog morta, premaza, morta ugrađenog u oplatu prije betoniranja, fiksnih ploča ugrađenih prije ili nakon betoniranja i slično, Rijkwaterstaat, u dokumentu Efectis-R0695 iz 2020. godine [34] daje različite zahtjeve u pogledu izvođenja, kontrole te ispitivanja. Nadalje svaki sustav zaštite od strane proizvođača mora imati definirane barem sljedeće informacije: prirodu različitih komponenti materijala, očekivane gustoće materijala, službeni naziv sustava i njegovih komponenti, očekivanu ravnotežnu vlažnost, maksimalnu dopuštenu širinu spojeva, opis sustava spajanja, očekivano vrijeme sušenja ili sigurnosni list materijala [34]. Već spomenute dimenzije uzoraka s instaliranim sustavom zaštite moraju iznositi barem 8 m<sup>2</sup>. Priprema uzoraka također mora biti izvršena u skladu s pravilima: uzorci nakon ugradnje betona moraju biti omotani plastičnom folijom koja se uklanja tek nakon starosti uzorka od 28 dana. Samo ispitivanje danih uzoraka ne smije se provoditi dok beton nije star barem 91 dan kako bi se ostvarila dovoljno zrela mikrostruktura. Također, sadržaj vlažnosti materijala za zaštitu od djelovanja požara mora odgovarati sadržaju vlage u stvarnom tunelu, za pretpostavljene uvjete okoline [34]. U određenim slučajevima može se koristiti povišena temperatura i mala relativna vlažnost kako bi se ubrzalo sazrijevanje betona, ali pritom temperatura ne smije biti tolika da utječe štetno na same materijale zaštitnog sustava;

najčešće se radi o temperaturi do maksimalno 40°C. Također, sadržaj vlage može štetno utjecati na materijale zaštitnog sustava, naročito visoke razine vlažnosti. Zbog toga je potrebno, uz glavni uzorak, izvesti još dva na kojima će se pratiti razina vlažnosti [34].

### Pozicija uzorka tijekom ispitivanja

Prilikom samog ispitivanja, uzorci trebaju biti postavljeni na peć u istom položaju u kojem će se nalaziti u tunelu. Rezultati horizontalnog ispitivanja vrijede i za horizontalnu i vertikalnu upotrebu, a rezultati vertikalnog ispitivanja vrijede samo za vertikalnu upotrebu [34]. Uzorci trebaju biti pridržani s dvije strane, a dvije strane trebaju biti izložene djelovanju požara. U načelu opterećenje se nanosi s dvije pridržane strane; ipak, ukoliko se takav način opterećivanja smatra pre konzervativnim u odnosu na opterećenje u stvarnom tunelu, uzorak se opterećuje sa sve četiri strane. Način oslanjanja uzoraka na peć te sheme opterećenja dane su slikom 23.



Slika 23. Sheme oslanjanja i opterećivanja uzoraka [34]



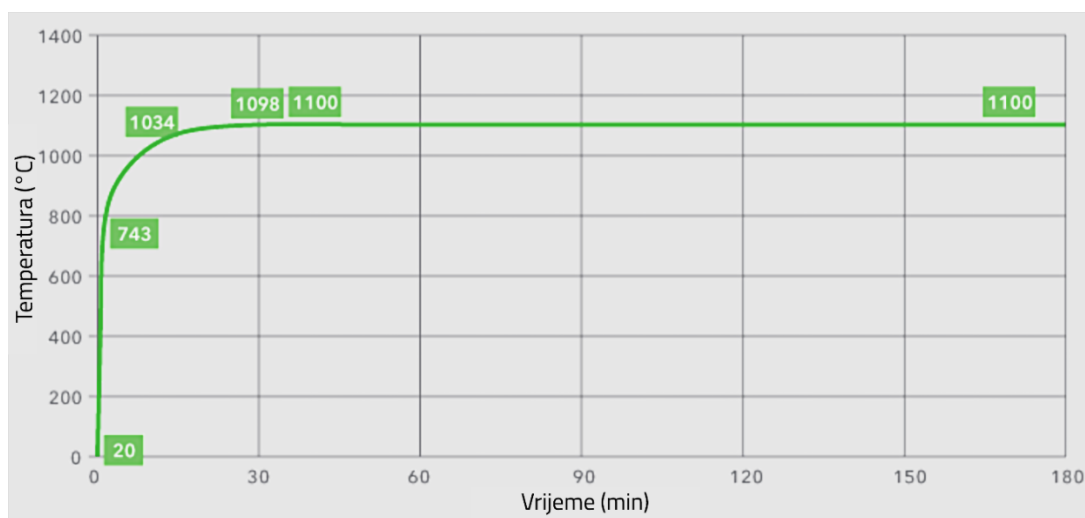
### Praćenje tijeka ispitivanja

Predlaže se postavljanje barem jedne kamere unutar peći koja će snimati površinu samog uzorka. Takve snimke omogućavaju lakše uočavanje i mogućnost boljeg razumijevanja samog procesa odlamanja betona te ponašanja tunelske obloge [34]. Zahtjevi, koji se odnose na tlak, koji se razvija u peći dani su u dokumentu EN 1363-1 [77].

### Režim zagrijavanja uzorka

Nadalje, zagrijavanje peći odvija se po propisanoj temperaturnoj krivulji.

U praksi se za analiziranje razvoja požara, predviđanja razvoja temperature te ispitivanja otpornosti na požar tunelskih elemenata, najčešće koriste tri požarne krivulje: krivulja ugljikovodika ili hidrokarbonska krivulja, Rijkwaterstaat (RWS) krivulja te RABT ZTV krivulja. Spomenute osnovne krivulje prikazane su slikama 24-27.



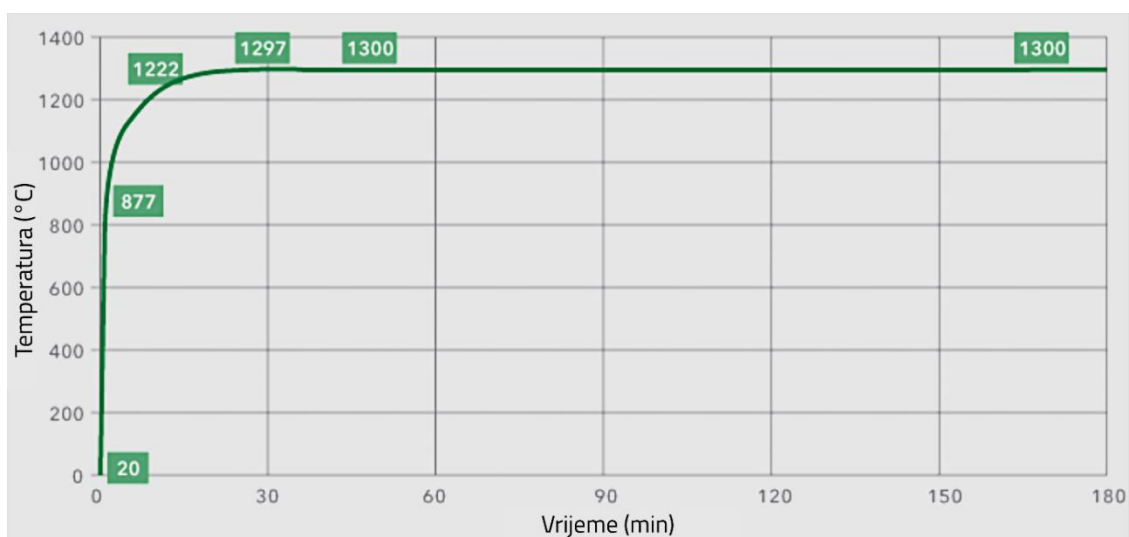
Slika 24. Hidrokarbonska krivulja [78]

Između ostalih faktora koji mogu ugroziti ljude i osoblje hitnih jedinica, veliku opasnost predstavlja sama temperatura [79]. Naime, promatrajući širenje topline strujanjem, već pri temperaturama iznad  $100^{\circ}\text{C}$ , posljedice mogu biti smrtonosne. Nadalje, maksimalna razina zračenja topline, pri kojoj postoji mogućnost za preživljavanje ljudi iznosi  $2.5 \text{ kW}/\text{m}^2$  za ljude bez zaštite te  $5.0 \text{ kW}/\text{m}^2$  za spasilačku ekipu koja ima specifičnu zaštitu [80]. Jednostavnim geometrijskim proračunima pokazano je da uvjet za širenje topline zračenjem

od  $5.0 \text{ kW/m}^2$  odgovara temperaturi dimnoga sloja od  $450^\circ\text{C}$  uz strop tunela te se ta temperatura smatra krajnjom vrijednost pri kojoj može doći do spašavanja ljudi [80]. Nakon provođenja požarnih ispitivanja u tunelu Memorial koji se nalazi u saveznoj državi Zapadnoj Virginiji u Sjedinjenim Američkim Državama, francuska vlada odlučila je modificirati do tada postojeću hidrokarbonsku krivulju koja je bila definirana Eurokodom 1, dijelom 1-2 [53]. To su učinili postavljajući asimptotu krivulje na  $1300^\circ\text{C}$  čime su dobili tzv. pojačanu hidrokarbonsku krivulju, prikazanu na slici 11, za koju vrijedi izraz:

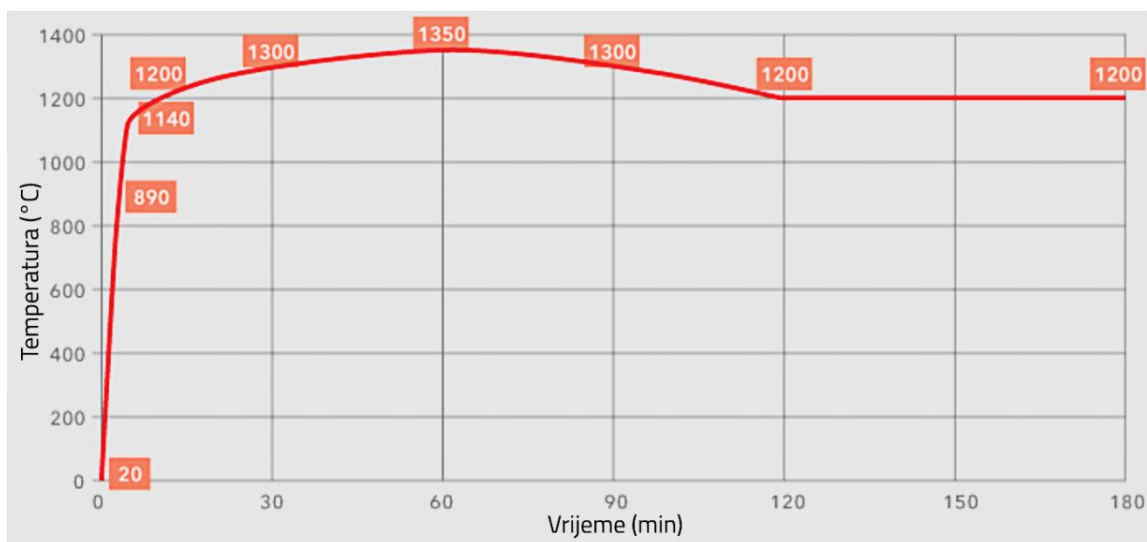
$$T = 20 + 1280 (1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t}),$$

gdje je  $t$  vrijeme trajanja požara [min].



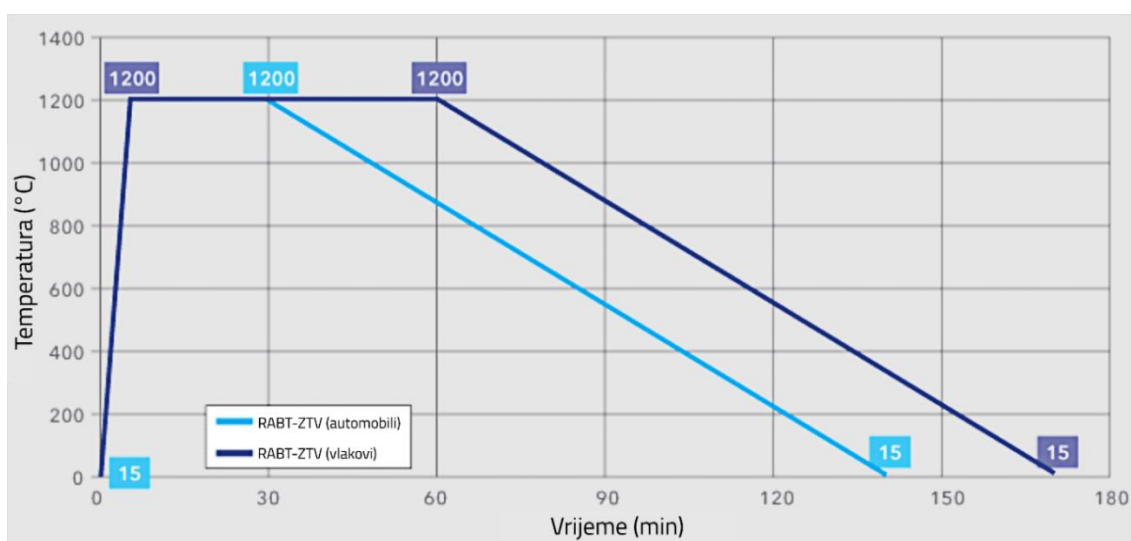
Slika 25. Modificirana hidrokarbonska krivulja [78]

Razvojem područja, posebice nakon provođenja ispitivanja u sklopu projekta EUREKA 499 [20] te ispitivanja u tunelima Memorial i Runehamar, u upotrebu ulaze spomenute krivulje: RWS i RABT ZTV krivulja [81]. Iako se RWS krivulja, nastala u Nizozemskoj, inicijalno koristila za simulaciju požara na tankerima, ubrzo je prilagođena požarima u tunelima. Temelji se na pretpostavci požarnog opterećenja od 300 MW što odgovara spremniku goriva od  $50 \text{ m}^3$  uz trajanje požara u vremenskom periodu od 120 minuta [82]. U Nizozemskoj se primjenjuje u slučaju podvodnih potopljenih tunela, kojima Nizozemska obiluje, kod kojih bi gubitak nosivosti betonske obloge predstavljao kolaps tunela i posljedično plavljenje tunela u cijelosti.



Slika 26. RWS krivulja [78]

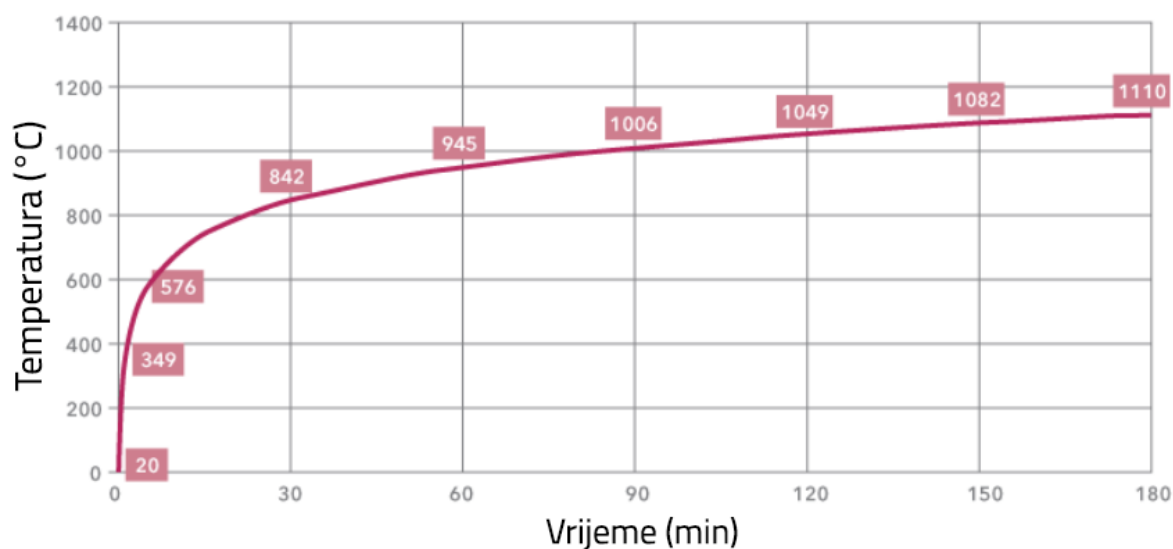
S druge strane RABT ZTV krivulja nastala je u Njemačkoj te opisuje gorenje vozila u zatvorenom prostoru kao što su tuneli [83]. Samom krivuljom pretpostavlja se razvoj temperature do 1200°C u vremenskom periodu od pet minuta. Također, RABT ZTV krivulja dolazi u dvije varijacije. Jedna za požare u cestovnim tunelima, a druga za požare u željezničkim tunelima. Razlika leži u trenutku početka faze gašenja, odnosno hlađenja koja traje 110 minuta od njenog početka [83]. Kod požara u cestovnim tunelima, spomenuta faza započinje nakon 30 od početka gorenja, za razliku od željezničkih tunela gdje ta faza započinje nakon 60 minuta.



Slika 27. RABT-ZTV krivulje [78]

Također, osim 100–150 °C više maksimalne temperature koju razvija RWS krivulja, glavna razlike između dviju spomenutih krivulja očituje se u fazi hlađenja. Naime, kod RWS krivulje ne postoji faza hlađenja i do tri sata nakon početka ispitivanja što znatno mijenja utjecaj na raspodjelu topline u presjeku tunelske obloge i povećava rizik od različitih mehanizama oštećenja [82].

Osim spomenutih krivulja, u svrhe ispitivanja svojstava toplinske izolacije sustava zaštite tunelskih obloga, može se koristiti i ISO 834 krivulja, tzv. standardna temperaturna krivulja (ETK), prikazana na slici 28.



Slika 28. ISO 834 požarna krivulja [78]

Pored gore opisanih standardiziranih temperaturno-vremenskih krivulja treba spomenuti i parametarske krivulje, koje su složenije po svojoj matematičkoj strukturi i čija upotreba je ograničena i zahtjeva detaljnu analizu.

Nadalje, Ingason H. i Lönnemark A. u svom istraživanju pokazali su kako RWS krivulja jako dobro opisuje razvoj temperature za većinu velikih požarnih ispitivanja poput ispitivanja u sklopu projekta EUREKA 499 te ispitivanja provedenih u tunelima Memorial i Runehamar [81]. Štoviše, nakon početne odgode razvoja požara, temperatura mjerena u spomenutim testovima razvijala se brže nego je pretpostavljeno RWS krivuljom [81]. Također, za

ispitivanja u tunelu Ruhehamar, razvoj temperature pokazao je poklapanje s kombinacijom hidrokarbonske i RWS krivulje. Naime, nagli porast temperature odgovara hidrokrabonskoj krivulji, a period s najvišim temperaturama i najintenzivnijim djelovanjem požara odgovara RWS krivulji. Predložen je i matematički izraz za kombinaciju dvaju spomenutih krivulja:

$$T = 20 + \sum_i^N n_i r_i (1 - e^{-k_i t})^{n_i - 1} e^{-k_i t}$$

gdje je  $T$  temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $t$  vrijeme [min],  $N$  broj slučajeva,  $n$  retard index,  $r$  koeficijent amplitude [ $^{\circ}\text{C}$ ] i  $k$  koeficijent vremenskog perioda [1/min].

Bitno je istaknuti kako početna odgoda razvoja požara može ovisiti o izvoru zapaljenja, vrsti vozila, materijalu ili geometriji tereta [81]. Upravo tih par minuta odgode može biti krucijalno za ishod promatranoga incidenta.

### **Rezultati ispitivanja**

Naposljetku, zahtjevi pomoću kojih se donosi ocjena promatranog uzorka najčešće se odnose na:

1. maksimalnu temperatura na površini betona,
2. maksimalnu temperaturu armature,
3. maksimalnu vrijednost temperature na određenoj mjerenoj dubini u betonu te maksimalnu dozvoljenu dubinu odlamanja betona.

Kriteriji za betonski element, bez unutarnjih ili vanjskih sustava zaštite od požara su slijedeći:

- temperatura čelične armature mora biti manja od  $250^{\circ}\text{C}$ ,
- temperatura na udaljenosti od jednog promjera prve šipke armature mora biti manja od  $380^{\circ}\text{C}$  te
- dubina odlamanja betona mora biti manja od 35 milimetara za 95% izložene površine [34].

S druge strane, ukoliko uzorak betonskog elementa ima ugrađen/primjenjen neki od sustava zaštite od požara, zahtjeva se da:

- odlamanje betona uopće nije dopušteno
- temperatura na površini betona mora biti manja od 380 °C
- a temperatura čelične armature, kao i kod nezaštićenog betona, mora biti manja od 250 °C [34].

#### 4.3.1.2. Ispitivanje toplinske izolacije

Ciljevi ispitivanja svojstava toplinske izolacije vanjskog zaštitnog sustava tunelske obloge su sljedeći [34]:

- procijeniti mogućnost materijala zaštitnog sustava da izdrži visoke temperature uslijed djelovanja požara po propisanoj temperaturnoj krivulji,
- procijeniti ostaje li zaštitni sustav ispravno pričvršćen za betonsku oblogu tijekom zagrijavanja te procijeniti kolika je potrebna debljina materijala zaštitnog sustava u pogledu ostvarivanja prvog cilja.

Budući da cilj ovog ispitivanja nije određivanje parametara odlamanja betona, odlamanje je potrebno izbjeći projektiranjem odgovarajuće mješavine betona te osiguravanjem niskog sadržaja vlage. Nadalje, osim toplinskih svojstava materijala zaštitnog sustava, uvjeti sazrijevanja betona, način pričvršćenja sustava, spojevi te razina vlažnosti također utječu na rezultate ispitivanja [34]. Također, neki materijali koji se koriste pri izradi zaštitnog sustava mogu se širiti ili skupljati pri zagrijavanju što može rezultirati stvaranjem rupa ili pukotina kroz koje dolazi do ubrzanog zagrijavanja betona ispod zaštitnog sustava. Na isti problem utječe i veličina elemenata zaštitnog sustava te deformabilnost same betonske obloge.

U načelu vrijedi da veći uzorci daju reprezentativnije i pouzdanije rezultate zbog čega se za ispitivanja toplinske izolacije predlaže provedba ispitivanja u srednjem ili velikom mjerilu [34]. Ispitivanja uzoraka u srednjem mjerilu podrazumijevaju površinu izloženu djelovanju požara dimenzija 1.15 x 1.15 metara. Rezultati ispitivanja uzoraka u srednjem mjerilu daju

samo procjenu zadovoljenja prvog zahtjeva, odnosno je li debljina materijala zaštitnog sustava dovoljna da izdrži visoke temperature uslijed djelovanja požara. Zbog toga se ispitivanja u srednjem mjerilu najčešće koriste u istraživanjima ili razvojnim fazama novih zaštitnih sustava [34].

S druge strane, površine uzoraka izložena djelovanju požara prilikom provođenja ispitivanja u velikom mjerilu trebaju biti minimalno  $8 m^2$ , a sami zaštitni sustav mora biti pričvršćen na jednak način kao što je to u stvarnom tunelu. Ispitivanjem u velikom mjerilu pouzdano se provjerava učinkovitost cijelog zaštitnog sustava. Osim toplinskih svojstva tj. toplinske izolacije, procjenjuje se hoće li zaštitni sustav ostati pričvršćen uslijed zagrijavanja, cjelovitost zaštitnog sloja, gubitak topline kroz pukotine nastale uslijed skupljanja ili širenja zaštitnih elemenata i slično [34]. Neovisno o mjerilu ispitivanja, armaturna mreža se sastoji od šipki promjera 10 mm na razmaku od 150 mm ili od šipki promjera 12 mm na razmaku od 200 mm. Debljina zaštitnog sloja treba biti minimalno 25 mm.

Mjerenje temperature vrši se termočlancima. Jednako kao i kod ispitivanja odlamanja betona, pozicioniranje i način pričvršćivanja termočlanaka ne smije utjecati na dimenzije uzorka. Udaljenost termočlanaka od najbližeg slobodnog ruba mora biti veća od 300 milimetara. Nadalje, za ispitivanje toplinske izolacije također se koriste termočlanci vrste K (legure nikla, kroma i aluminijska). Rijkwaterstaat [34] daje posebne uvjete postavljanja termočlanaka ovisno o mjerilu uzoraka za ispitivanje koje se provodi. Naime, potrebno je postaviti određeni broj termočlanaka te ih rasporediti na kritična mjesta kao što su površina uzorka, spojevi ploča zaštitnog sustava te rupe u pločama kroz koje prolazi toplina [34]. Također, Rijkwaterstaat daje zahtjeve u pogledu izvođenja zaštitnih sustava, pripremanja uzoraka te provođenja samoga ispitivanja. Naposljetku, određivanje rezultata ispitivanja i svojstava danog zaštitnog sustava očituje se u istim zahtjevima kao i kod ispitivanja odlamanja betona; potrebno je odrediti maksimalnu, srednju i 95% karakterističnu vrijednost svih mjerenja temperature za danu dubinu mjerenja. Posljednja se može odrediti jedino ukoliko je korišten sustav koji nema promjenjivu debljinu, koristeći sljedeći izraz. Vrijednosti faktora  $t$  ovise o broju ispitivanja.

$$T_{95\%} = T + t \times \sigma$$

gdje je  $T_{95\%}$  95% karakteristična vrijednost svih mjerenja temperature,  $T$  je srednja vrijednost izmjerenih temperatura, a  $\sigma$  standardna devijacija.

#### 4.4. Načini zaštite tunelskih obloga

S ciljem sprječavanja prekomjernog porasta temperature tunelskih obloga, koji bi doveo do pogoršanja mehaničkih svojstava i pojave eksplozivnog odlamanja betona, te smanjenja rizika nastanka eksplozivnog odlamanja neovisno o sprječavanju porasta temperature, razvijeni su različiti zaštitni sustavi koji se dijele na unutarnje i vanjske. Unutarnji zaštitni sustavi odnose se na različite dodatke sastavu betona same tunelske obloge na temelju čega se ostvaruju zahtjevi navedeni u nastavku poglavlja, uz pojedina ispitivanja. S druge strane, vanjski zaštitni sustavi odnose se na izvođenje pasivnih toplinskih barijera preko postojeće tunelske obloge. Pregledom literature [87-119] napravljena je tablica 7. koja prikazuje podjelu postojećih sustava zaštite tunelske obloge od djelovanja požara.

Tablica 7. Podjela sustava zaštite tunelskih obloga od djelovanja požara [84-116]

Princip zaštite	Pozicija sustava	Kategorija sustava	Vrsta sustava
<b>Ograničenje porasta temperature</b>	Vanjska	Mortovi, žbuke i premazi	Sustavi na bazi perlita i vermikulita
			Alkalno aktivirani sustavi
			Sustavi na bazi geopolimera
	Vanjska	Obloge	Obloge na bazi vermikulita i kalcijevog silikata



			Obloge na bazi geopolimera
			Obloge na bazi ekspandirane gline
<b>Smanjenje rizika odlamanja betona</b>	Unutarnja	Vlakna	Polipropilenska vlakna

#### 4.4.1. Mortovi, žbuke i premazi – vanjski zaštitni sustavi

Jedan od načina zaštite tunelske obloge od djelovanja požara su mortovi na bazi različitih materijala. Velika prednost mortova visoke otpornosti na djelovanje požara očituje se u njihovoj jednostavnosti nanošenja čak i na površine kompleksne geometrije čime se štedi vrijeme i novac [84]. Postoje različite vrste mortova s obzirom na njihov sastav, a neki od najpoznatijih su mortovi s dodatkom perlita, vermikulita, silikatne prašine, aluminij silikata, pepela rižine ljuske te na bazi geopolimera [85]. Najčešće korišteni dodaci su vermikulit i perlit budući da su vrlo dostupni i ekonomski prihvatljivi, a pokazuju odlične svojstva [84].

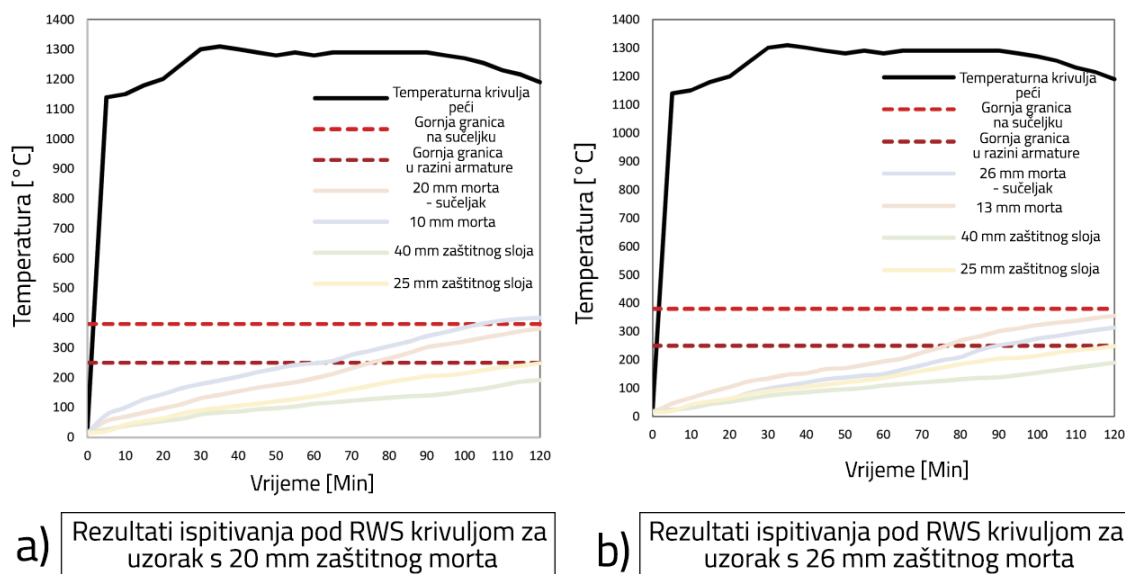
##### 4.4.1.1. Mortovi na bazi vermikulita i perlita

Vermikulit se sastoji od minerala koji nalikuju tinjcu, slojevitom silikatu. Proizvodi se hidrotermalnom obradom flogopita ili biotita [86]. Prilikom zagrijavanja čestica vermikulita na temperature između 650 i 950 °C iste se znatno šire te stvaraju ekspandirani sloj gustoće 80 do 120  $kg/m^3$ , temperature taljenja tek između 1240 i 1430 °C te vrlo niske toplinske vodljivosti od 0.04 do 0.12  $W/mK$  [86]. S druge strane, perlit se sastoji od silikatnog vulkanskog kamena i 2 do 6% vode. Pri temperaturi od otprilike 870 °C, perlit drastično povećava svoj volumen uslijed naglog širenja velikog broja malih zračnih čestica. Ekspandirani perlit ima vrlo slična svojstva vermikulitu: vrlo niska toplinska vodljivost (0.04 – 0.06  $W/mK$ ), niska gustoća (50-400  $kg/m^3$ ) te relativno visoka točka taljenja (između

1200 i 1343 °C) [86]. Različite studije pokazale su kako su mortovi na bazi perlita i portland cementa te perlita i gipsa najefektivniji mortovi u pogledu požarnih barijera [86].

Kounadis et al. [84] proveli su laboratorijska i terenska požarna ispitivanja morta na bazi vermikulita s ciljem određivanja učinkovitosti danog sustava u svrhu zaštite tunelske obloge od djelovanja požara. Laboratorijska ispitivanja provedena su na betonskim pločama s apliciranim mortom pod uvjetima RWS krivulje, a terenska ispitivanja provedena su u tunelu Panagopoula, također pod uvjetima RWS krivulje. Korišten je mort Sikacrete -213 F [87] na bazi vermikulita, a kako bi se osiguralo kvalitetno izvođenje i prionjivost korišten je jedno komponentni, polimerom modificirani primer na bazi cementa, Sika MonoTop -910 Eco; pretraživanjem je utvrđeno kako tehnički listovi danih proizvoda nisu dostupni [84]. Uzorci betonskih ploča izrađeni su u skladu s EFNARC preporukama [35]. Sastav danog betona sadržavao je  $420 \text{ kg/m}^3$  cementa, a vodocementi omjer iznosio je 0.40 što je rezultiralo betonom tlačne čvrstoće od  $65 \text{ MPa}$ . Također, uzorci za terensko ispitivanje sadržavali su polipropilenska vlakna s ciljem sprječavanja odlamanja betona; u članku nije navedena količina vlakana [84]. Na dane uzorke, za laboratorijska ispitivanja, naneseni su slojevi morta u debljini od 20 i 26 mm, a termočlanci su postavljeni na polovici te debljine, na spoju morta i betona i samom betonskom uzorku na pozicijama s 25 i 40 mm zaštitnog sloja [84]. Temperature razvijene prilikom ispitivanja prikazane su na slici 29. Uzorci sa slojem morta od 20 mm na spoju morta i betona, nakon 120 minuta, ostvarili su maksimalnu temperaturu od  $364.5^\circ\text{C}$  što je manje od zahtijevane granične temperature od  $380^\circ\text{C}$ . Nadalje, čak i na polovici sloja morta maksimalna je temperatura vrlo malo prešla danu granicu. Naposljetku, temperatura u uzorcima betona, na dubini od 25 i 40 mm nije prešla graničnu vrijednost od  $250^\circ\text{C}$  što znači da se nije razvila temperatura koja će negativno utjecati na armaturu. Tijekom ispitivanja, površina uzoraka zadržala je početni izgled, odnosno nije došlo do pucanja ili odlamanja betona [84]. S druge strane, uzorci sa slojem morta od 26 mm, ostvarili su zadovoljavajuće temperature na spoju betona i morta jednako kao i na polovici sloja morta, a maksimalne postignute temperature iznosile su  $314.2$  i  $355.8^\circ\text{C}$ . Također, temperature u samome uzorku na dubini od 25 i 40 mm nisu prešle iznos temperature od

250°C [84]. Zaključak laboratorijskih ispitivanja je da odabrani sustav, za obje debljine, ostvaruje zahtijevane kriterije [84].



Slika 29. Rezultati laboratorijskih ispitivanja pod RWS krivuljom za uzorak s a) 20 mm zaštitnog morta i b) 26 mm zaštitnog morta [84]

Nadalje, terensko ispitivanje provedeno je u tunelu Panagopoula. Termočlanci su postavljeni u tunelsku oblogu, na kruni tunela kako je prikazano slikom 30, na dubini od 50 mm unutar samog betona te na budućem sučeljku betona i morta. Potom se mokrim postupkom nanio mort u debljini od 15 mm, a samo ispitivanje provedeno je 56 dana nakon postavljanja morta [84].



Slika 30. Pozicija nanošenja morta te mjerenja temperature termočlancima [84]

Bitno je naglasiti kako pri terenskim ispitivanjima postoji mnoštvo vanjskih faktora, poput tlaka tla, tlaka podzemnih voda te unutarne vlažnosti, koji utječu na rezultate ispitivanja. Rezultati ispitivanja pokazali su kako je do odlamanja betona došlo nakon 73 minute. Teoretski, sve preporuke po EFNARC-u [35] bile su zadovoljene, temperatura na sučelju i na razini armature nije prešla  $380^{\circ}\text{C}$  odnosno  $250^{\circ}\text{C}$  u periodu od 120 minuta. Ipak, zbog postojećih in situ uvjeta, do odlamanja betona došlo je i pri nižim temperaturama te gotovo dvostruko brže od zahtijevane otpornosti u periodu od 120 minuta po RWS krivulji. Autori ističu kako se i terensko ispitivanje prihvaća kao zadovoljavajuće te kako bi pri relativnoj vlažnosti od oko 50% rezultati bili puno bliži laboratorijskim [84].

Kiran et al. [85] razvili su tri različite vrste morta sa svrhom zaštite betonskih elemenata visoke čvrstoće:

- Mort na bazi pijeska (SP)
- Mort na bazi gipsa i perlita (GPP)
- Mort na bazi gipsa i mineralne vune (GMP).

Cilj ovog ispitivanja bilo je određivanje i usporedba različitih mehaničkih svojstava uzoraka betona visoke čvrstoće te spomenute tri vrste morta uslijed djelovanja vrlo visoke

temperature i različitih mehanizama hlađenja, tj. gašenja požara. Uzorci su bile kocke dimenzija 70.6 mm s armaturom postavljenom sukladno normi IS 1608:2005 [88]. Analizirala su se svojstva poput tlačne čvrstoće, čvrstoće prionjivosti, posmične čvrstoće te vizualna oštećenja. Samo zagrijavanje uzoraka provedeno je u električnoj peći, sukladno ISO-834 krivulji. Više uzoraka svake mješavine zagrijano je na temperature od 821°C, 925°C i 986°C, kroz 30, 60 odnosno 90 minuta. Nakon zagrijavanja na ciljanoj temperaturi, ista se održavala 30 minuta kako bi se ostvarila jednolika raspodjela temperature po cijelom poprečnom presjeku uzoraka. Rezultati ispitivanja pokazali su veći broj pukotina SP uzoraka u odnosu na GPP i GMP uzorke, za oba mehanizma hlađenja, zrakom i vodom [85]. Na slici 31. prikazan je izgled površine uzoraka različitih mješavina nakon zagrijavanja od 60 i 90 minute te hlađenja vodom (WC) i zrakom (AC).



Slika 31. Izgled površine uzoraka različitih mješavina nakon zagrijavanja i hlađenja [85]

GPP i GMP uzorci zadržali su veću rezidualnu tlačnu čvrstoću nakon djelovanja visokih temperatura, s vrlo malim prodorom topline u jezgru samog uzorka, čime se potvrđuju bolja

izolacijska danih mortova u odnosu na beton visoke čvrstoće [85]. Ispitivanje prionjivosti provedeno je sukladno normi IS 2770:2007-1 [89], aksijalnim izvlačenjem armaturne šipke iz uzoraka. GMP uzorci pokazali su znatno manji pad čvrstoće prionjivosti (17.8%) u odnosu na uzorke betona visoke čvrstoće koji su pokazali pad čvrstoće prionjivosti od 61.1%. Zaključak samog ispitivanja jest postojanje mogućnosti upotrebe gipsa, perlita i mineralne vune kao lakih materijala od kojih se mogu izrađivati mortovi, odnosno betoni tunelskih obloga s ciljem povećanja otpornosti na djelovanje požara [85].

Koksal et al. [90] proveli su istraživanje ekspandiranog vermikulita i silicijske prašine kao baze za izradu pasivnih toplinskih barijera u obliku lakog morta te su dokazali kako isti osiguravaju nižim temperaturama unutar betonskih elemenata. Nadalje, Caetano et al. [86] razvili su mortove na bazi gipsa i cementa s dodacima ekspandiranog perlita, vermikulita i gline te zaključili kako mort s dodatkom vermikulita pokazuje najbolja zaštitna toplinska svojstva. Također, Duan et al. [91] koristili su zaštitni mort na bazi perlita i vermikulita kako bi obložili tunel s uronjenom cijevi te su zaključili kako je isti dao vrlo dobre rezultate u pogledu toplinske izolacije budući da nije došlo do odlamanja betona. Spomenuta istraživanja samo su neka od mnogih koji potvrđuju učinkovitost korištenja mortova i žbuka na bazi vermikulita i perlita te se istima potiče daljnji razvoj istih.

#### 4.4.1.2. Alkalno aktivirani sustavi

Alkalno aktivirana veziva predstavljaju potpuno anorganske polimerne materijale što ih kao takve čini nezapaljivima [92]. Imaju tzv. keramička svojstva koja ih uslijed stvaranja kristalno aluminosilikatnih faza čine vrlo otpornima na djelovanje visokih temperatura; tale se tek nakon  $1100^{\circ}\text{C}$  čime osiguravaju konstruktivni integritet na povišenim temperaturama. Također, smatraju se endotermnim materijalima zbog fizikalno i kemijski vezane geopolimerne vode što im omogućava apsorpciju velike količine topline [92]. Nadalje, vrijednost toplinske vodljivosti istih iznosi  $0.1$  do  $0.3 \text{ W/mK}$  što predstavlja manju toplinsku vodljivost u odnosu na klasične konstrukcijske materijale te relativno sličnu toplinsku vodljivost materijala za zaštitu od djelovanja požara [93]. Sakkas et al. [93] ističu kako se

kontrolom kemijskog sastava alkalno aktiviranih veziva mogu ostvariti sustavi s vrlo visokom otpornošću na požar koji mogu izdržati temperature i do 1350°C. S obzirom na jačanje politika očuvanja okoliša, korištenjem alkalno aktiviranih veziva u potpunosti se zamjenjuje cement. Njihovom proizvodnjom generira se tek 70% emisije  $CO_2$  pri proizvodnji cementa te se uslijed potrebe za manjom količinom prirodnih resursa, oni štede [94]. Alkalno aktivirani betoni, najčešće se izvode in-situ ili kao predgotovljeni elementi. Upotreba mlaznog, alkalno aktiviranog betona još nije zaživjela, primarno zbog nedostatka pouzdanih i jasno definiranih načela za projektiranje sastava [94].

Alkalno aktivirani betoni općenito se sastoje od praškaste reaktivne tvari i otopine alkalijskog aktivatora. Kemijskom reakcijom, geopolimerizacijom, danih komponenti mješavina očvršćava i stvara se vodootporna i stabilna trodimenzionalna aluminosilikatna struktura. Pregledom literature utvrđeno je kako pitanje jednakosti alkalno aktiviranih betona i geopolimera nije jednoznačno određeno. Naime, često se alkalno aktivirani betoni uistinu nazivaju geopolimerima ali u načelu geopolimeri su podvrsta alkalno aktiviranih betona sa sadržajem kalcija manjim od 10% [94]. Zbog toga je u ovom radu napravljena podjela na alkalno aktivirane sustave te geopolimere.

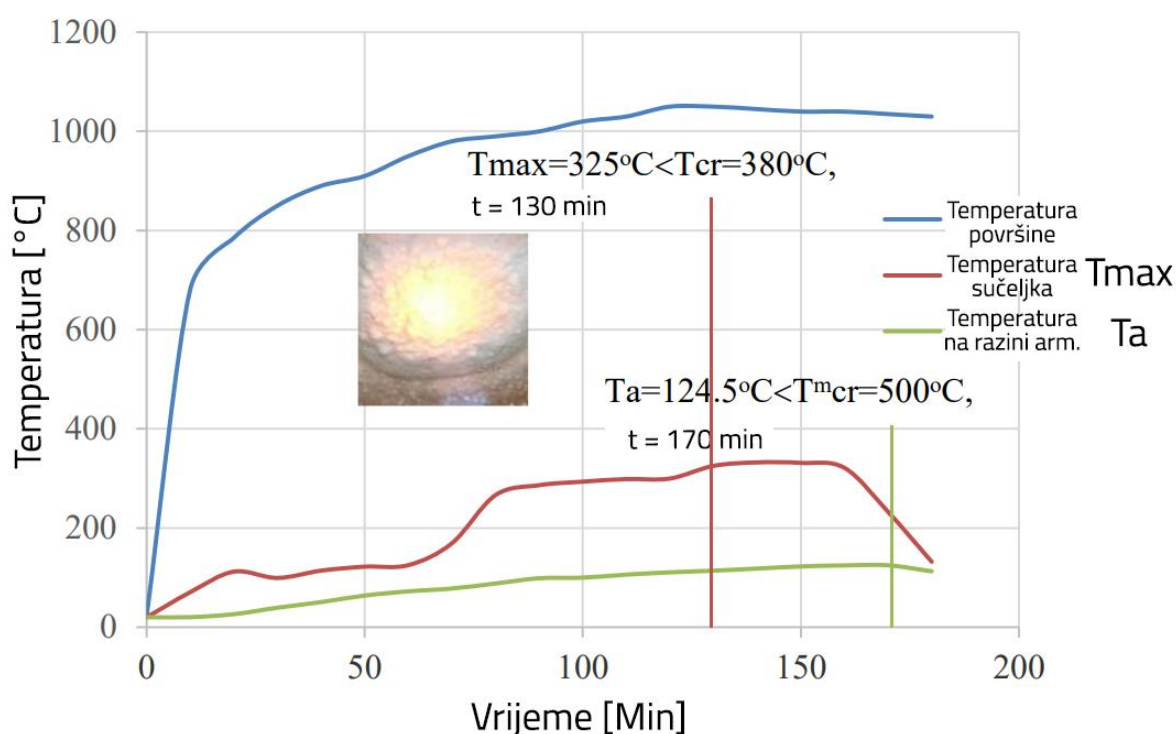
Hammer et al. [94] proveli su istraživanje s ciljem ispitivanja izolacijskih svojstava mlaznog, alkalno aktiviranog betona. Sastav ispitivanog betona sastojao se od vode, letećeg pepela, zgure iz visokih peći, silikatne prašine, alkalijskog aktivatora te raznih frakcija pijeska uz dva posebna dodatka: šuplje kuglice i aerant (AEA). Koriste se primarno za poboljšavanje svojstva kapilarne vodoupojnosti i otpornosti na cikluse smrzavanje-odmrzavanje. Šuplje mikro kuglice su elastoplastične čahure laganog agregata koje se otapaju prilikom očvršćivanja betona i ostavljaju šupljine zraka. Budući da šupljine zraka imaju manju toplinsku vodljivost, njihovim dodatkom u sastav betona želio se provjeriti utjecaj na izolacijski učinak danog mlaznog betona. Sredstvima za uvlačenje zraka, koji stvaraju uniformno raspodijeljene pore zraka, namjeravalo se ostvariti isto [94]. Ugrađeni su uzorci u obliku kocki dimenzija 15x15x15 cm te su omotani paronepropusnim filmom u vremenskom periodu od 24 sata i pohranjeni u vodi na period od 72 sata. Nakon toga uzorci

su čuvani na suhom, a ispitivanje se provelo 24 dana nakon početka sušenja. Nakon izrade uzoraka, termočlanci su bušenjem ugrađeni unutar uzoraka i na površini. Uzorci su zagrijavani u mufolnoj peći, a maksimalna postignuta temperatura u peći iznosila je 1100°C te se ista održavala kroz period od 55 minuta kako bi se ostvarila jednolika raspodjela temperature po cijelom poprečnom presjeku uzorka [94]. Sve mješavine s različitim udjelom pojedinih sastojaka pokazale su zadovoljavajuće rezultate, tj. nije došlo do odlamanja betona. Ipak, na nekim uzorcima došlo je do pojave pukotina ali autori su zaključili da se radi o pukotinama u ravninama bušenja za termočlanke [94]. Također, kod mješavina s dodatkom šupljih mikro kuglica došlo je do odgode odgodu u zagrijavanju kroz cijeli presjek uzorka što nije bio slučaj kod mješavina koje su imale dodatak aeranta [94]. Konačan zaključak ovog ispitivanja je kako alkalno aktiviran, mlazni beton može izdržati temperaturno opterećenje bez jasno vidljivih oštećenja. Također, dodatak šupljih mikro kuglica znatno smanjuje brzinu zagrijavanja uzoraka, dok isto nije zabilježeno dodatkom sredstva za uvlačenje zraka. Ipak, treba istaknuti kako sami proces zagrijavanja i hlađenja te postignuta maksimalna temperatura nisu u potpunosti u skladu sa standardnim ispitivanjem ali rezultati ovog ispitivanja daju dobru bazu za daljnje istraživanje dane problematike.

Nadalje, Krivenko et al. [95] proveli su ispitivanje premaza na bazi aluminosilikatnih cementnih veziva nalik zeolitu u pogledu svojstava zaštite od djelovanja požara. Također, kuglice na bazi aluminosilikatnih cementnih veziva dodane su u sastav premaza kao fileri, a dobivene su granulacijom alkalnog aluminosilikatnog veziva u otopini kalcijevog klorida. Kao čvrsta faza korišten je metakaolin, a alkalna komponenta bila je otopina natrijevog silikata. Također, modifikacije opisane početne matrice izvršene su dodavanjem natrijevog i kalijevog hidroksida te trulog kamena i vapnenca [95]. Uzorci su bile kocke stranica 15 cm, a debljina premaza iznosila je 6 mm. Termočlanci su postavljeni na dubinama od 75 mm (sredina betonskog dijela uzorka), na 25 mm od površine (razina armature), na sučeljku betonskog dijela uzorka i premaza te na samoj površini premaza. Maksimalna postignuta temperatura prilikom ispitivanja bila je 1100°C, a izvor topline bio je plamenik [95]. Na slici 32. prikazani



su rezultati mjerenja razvijenih temperatura kroz uzorak. Rezultati pokazuju kako dani premaz uspješno sprječava porast temperature na sučeljku betonskog uzorka i premaza, pri čemu je maksimalna zabilježena temperatura nakon 130 minuta iznosila  $325^{\circ}\text{C}$ , što je manje od granične vrijednosti od  $380^{\circ}\text{C}$ . Također, zadovoljen je i uvjet maksimalne temperature na razini armature gdje je ostvarena temperatura od  $124.5^{\circ}\text{C}$  nakon 170 minuta, što je manje od granične vrijednosti od  $250^{\circ}\text{C}$ , odnosno  $500^{\circ}\text{C}$ . Premaz debljine 6 mm, nakon ekspaniranja pri zagrijavanju, postiže poroznost od otprilike 95% te ostvaruje toplinsku vodljivost od samo 0.042 do  $0.066 \text{ W/mK}$  čime omogućava zaštitu betonskih elemenata u uvjetima požara tijekom 180 minuta. Također, premaz održava svoja svojstva te mogućnost bubrenja kroz vremenski period od 10 godina [95].



Slika 32. Razvijene temperature kroz uzorak s aluminosilikatnim premazom [95]

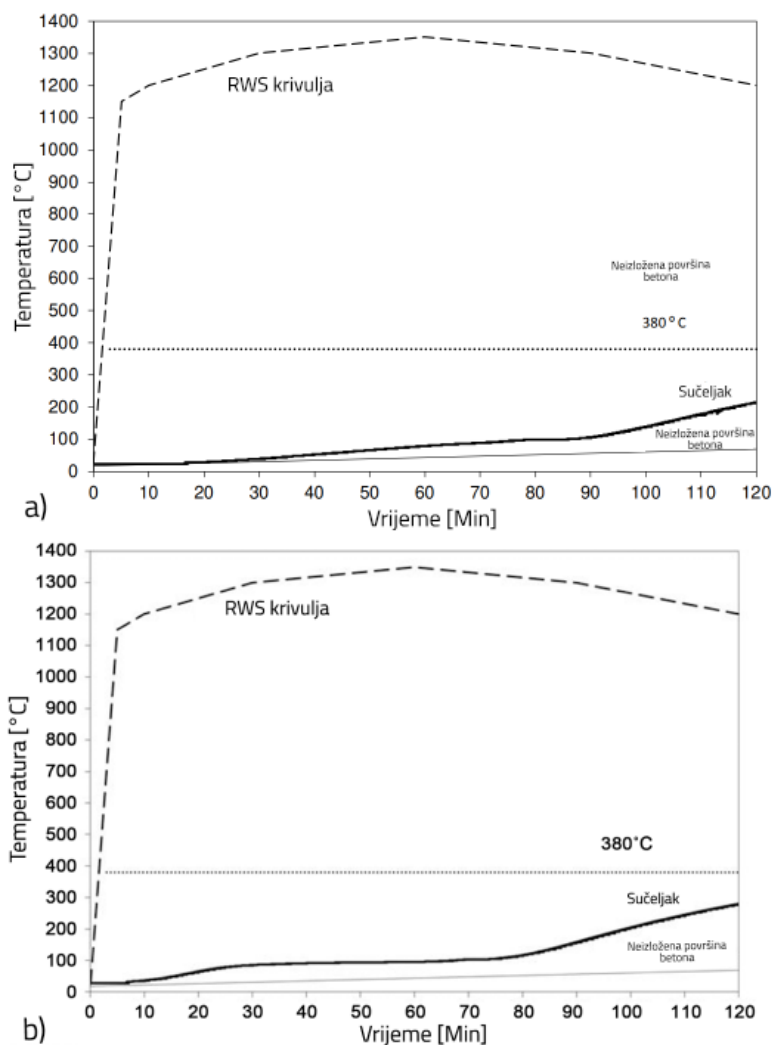
#### 4.4.1.3. Geopolimeri

Najistaknutiji znanstvenik koji se bavi razvojem geopolimernih sustava kao pasivnih toplinskih barijera za zaštitu tunelskih obloga je Konstantinos Sakkas. Postoje brojna njegova istraživanja na danu tematiku, a u ovom radu izdvojit će se nekolicina najzanimljivijih. Jedno od takvih istraživanja, proveli su Sakkas et al. [93] ispitujući geopolimere na bazi metakaolina i metalurške zgure te vodene otopine visoko alkalnog natrijevog hidroksida. Metakaolin korišten u ovom ispitivanju bio je vrlo bogat silikatnim i aluminijskim oksidima, a metalurška zgura dobivena je iz proizvodnje feronikla redukcijskim taljenjem lateritnog tla pri čemu se granulacija vrši naglim polijevanjem hladnom vodom. Za sintezu metakaolina korišten je dodatak čistog silicijevog dioksida, a kako bi se ostvarila sinteza metalurške zgure (FeNi zgura) ista se samljela u prah. Osim spomenutih materijala za sintezu su se koristili još i čista glinica, natrijev hidroksid, kalijev hidroksid, otopina natrijevog silikata, deionizirana voda te visoko alkalna otopina natrijevog hidroksida dobivena otapanjem zrnaca anhidritnog natrijevog hidroksida u deioniziranoj vodi [93]. Geopolimerna pasta ugrađena je u plastične kalupe te se njegovala na 70 °C, 48 sati. Potom su ispitana različita mehanička svojstva poput jednoosne tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće, Youngovog modula elastičnosti, gustoće, poroznosti, toplinske vodljivosti i slično. Nadalje, nakon 28 dana ispitana su svojstva danih geopolimera pod utjecajem djelovanja požara, sukladno EFNARC preporukama. Uzorci za ispitivanje bili su u obliku kocke, s 10 cm betona uobičajenog sastava te 5 cm geopolimernog paste [93]. Bitno je napomenuti kako su postavljena i čelična sidra s ciljem osiguravanja dodatne prionjivosti geopolimerne paste i betona. Uzorak se izložio djelovanju požara sukladno RWS krivulji, a temperatura se mjerila termočlancima na sučeljku betona i geopolimera. Rezultati ispitanih mehaničkih i fizikalnih svojstava, u usporedbi s poznatim zaštitnim sustavima Fire Barrier 135 [96] i Meyco Fireshield 1350 [97], prikazani su u tablici 8 [93].

Tablica 8. Usporedba svojstava geopolimernih i komercijalnih zaštitnih sustava [93]

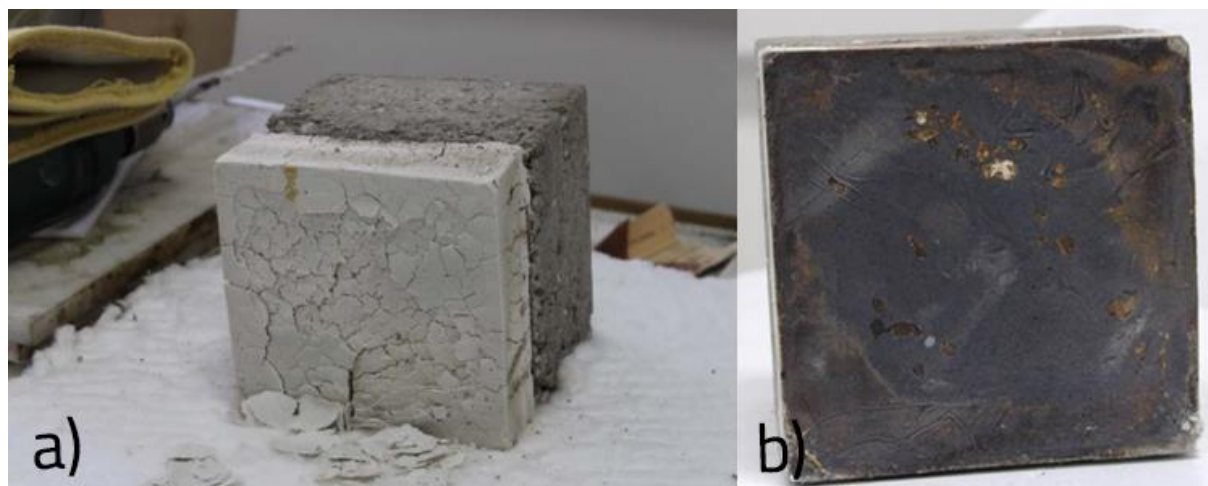
	Fire Barrier 135	Meyco Fireshield	Geopolimer - zgura	Geopolimer- metakaolin
Toplinska vodljivost (300 K) [W/mK]	0.185	0.41	0.16	0.21
Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	1150	1200-1800	1800	1700
Youngov modul [MPa]	4050	7900	3300	3000
Tlačna/Vlačna čvrstoća [MPa]	9/0.8	15-18/1.5	8.7/0.94	9/1
Poroznost [%]	66	52	40	29
Tvrdoća	90 Shore A	-	70 Shore A	90 Shore A
Vodoupojnost [%]	49	18	18	8.7

Nadalje, rezultati ispitivanja uzorka s metakaolinom nakon izlaganja djelovanju požara pokazali su da je temperatura na sučeljku geopolimera i betona kroz cijelo ispitivanje bila manja od 220°C što je znatno manje od granične vrijednosti od 380°C. Temperatura na neizloženoj površini uzorka kroz cijelo ispitivanje nije prešla 70°C (slika 33a) [93]. Rezultati ispitivanja geopolimera na bazi FeNi zgure također su pokazali kako temperatura na sučeljku kroz cijelo vrijeme ispitivanja nije prešla 280°C, a temperatura na neizloženoj površini uzorka, jednako kao kod metakaolinskog geopolimera, nije prešla 70°C (slika 33b) [93].



Slika 33. Razvijene temperature pri ispitivanju uzoraka geopolimera na bazi a) metakaolina i b) FeNi zgure prema RWS krivulji [93]

Nadalje, cijela površina geopolimera na bazi metakaolina ispucala je uslijed isparavanja geopolimerne vode ali prionjivost na sučeljku i strukturni integritet samog geopolimera održan je kroz cijeli tijek ispitivanja. Beton ispod sloja geopolimera nije bio mehanički oštećen i nije došlo do odlamanja betona (slika 34a) [93]. S druge strane, površina geopolimera na bazi FeNi zgure ostala je gotovo nepromijenjena. Naime, osim promjene boje, nije došlo do promjena u geometriji ili pojave većih pukotina. Također, betonski dio uzorka ostao je nepromijenjen; nije došlo do pojave mehaničkih oštećenja ili odlamanja betona (slika 34b) [93].



Slika 34. Izgled površine geopolimera na bazi a) metakaolina i b) FeNi zgure nakon izlaganja djelovanju požara [93]

Zaključak provedenog ispitivanja je kako su oba geopolimera zadovoljila zahtjeve za korištenje u svrhu zaštite tunelskih obloga od djelovanja požara; nije došlo do pojave mehaničkog oštećenja ili odlamanja betona, a temperature su zadržane znatno ispod graničnih vrijednosti. Nadalje, FeNi zgura pokazala se boljom u pogledu minimalnih oštećenja samog sloja geopolimera što su autori pripisali samoj prirodi materijala; smatra se kako će biti potreban minimalan popravak danog sloja ukoliko dođe do požara u tunelu. Također, mehanička svojstva razvijenih geopolimera pokazala su se usporedivim s postojećim sustavima zaštite od požara. Ovim ispitivanjem potvrđena je kvaliteta i mogućnost upotrebe danih sustava kao pasivnih toplinskih barijera što je potrebno potvrditi sveobuhvatnijim ispitivanjima [93].

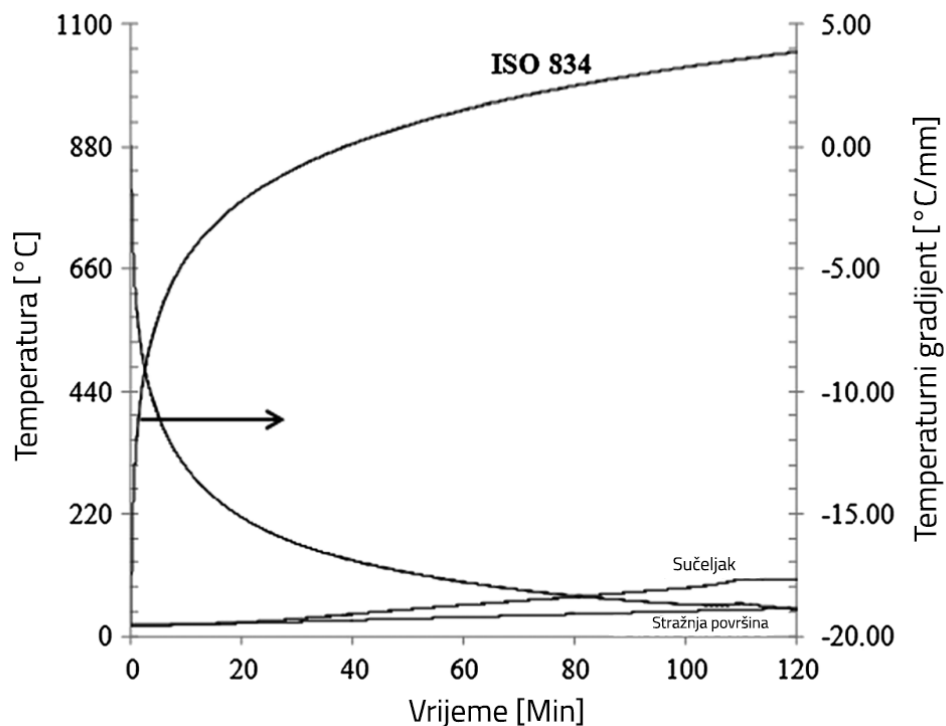
Nadalje, Sakkas et al. [98] proveli su još jedno ispitivanje geopolimernog zaštitnog sustava na bazi FeNi zgure i visoko alkalne otopine natrijevog hidroksida. Geopolimerna pasta ugrađena je u plastične kalupe te se njegovala na sobnoj temperaturi. Nakon tri sata, uzorci su izvađeni iz kalupa te su ispitana mehanička svojstva i otpornost na djelovanje požara. Uzorci za ispitivanje bili su u obliku kocke, s 10 cm betona uobičajenog sastava i 5 cm geopolimera na bazi FeNi zgure. Uzorci su se zagrijavali prema dvjema požarnim krivuljama, ISO-834 i RWS [98], 28 dana nakon izrade uzoraka. I u ovom slučaju postavljena su čelična sidra kako bi se osigurala prionjivost materijala. Mjerenje temperature vršilo se

termočlancima na sučelju materijala i termometrom na stražnjoj, neizloženoj površini. Ispitana mehanička svojstva, u usporedbi s betonom uobičajene čvrstoće, prikazana su u tablici 9 [98].

Tablica 9. Usporedba mehaničkih svojstava betona uobičajene čvrstoće i geopolimera na bazi FeNi zjure [98]

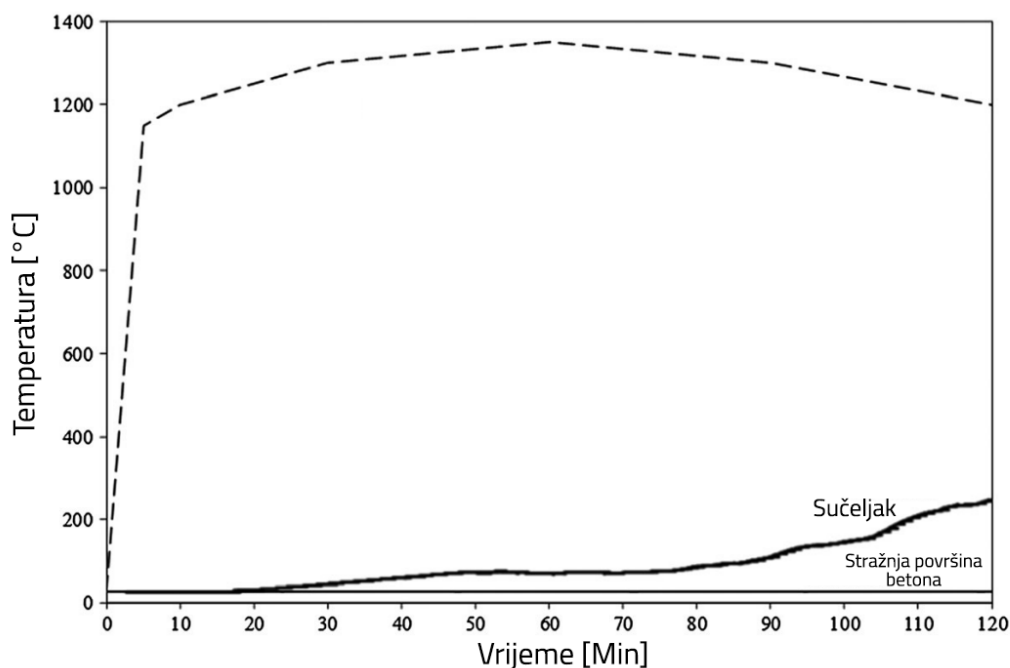
	Beton uobičajene čvrstoće	Geopolimer – FeNi zjura
Tlačna čvrstoća [MPa]	20-40	11-15 ± 0.9
Svojna čvrstoća [MPa]	3-5	2-4 ± 0.5
Vlačna čvrstoća [MPa]	2-5	1.48
Young-ov modul [MPa]	1400-4100	5500

Rezultati ispitivanja prilikom izlaganja uzoraka djelovanju ISO-834 požarne krivulje, prikazani na slici 35, pokazali su kako je maksimalna postignuta temperatura na sučelju iznosila 103°C, a temperatura neizložene površine kroz cijelo vrijeme ispitivanja nije prešla 50°C. Također, na slici 35. prikazan je i temperaturni gradijent po dubini uzorka. Razlika u temperaturi se logaritamski smanjuje s udaljavanjem od površine te je na kraju ispitivanja za svaki milimetar udaljenosti od površine zabilježen pad temperature od 19°C. Nadalje, izložena površina geopolimera ostala je gotovo nepromijenjena; nije uočeno taljenje ili puzanje materijala uslijed djelovanja visokih temperatura, a pukotine su bile minimalne. Površina samog betona također je ostala nepromijenjena; nisu uočena mehanička oštećenja ili odlamanje betona. Nije došlo do gubitka prionjivosti na sučelju betona i sloja geopolimera [98].



Slika 35. Rezultati ispitivanja geopolimera na bazi FeNi zgreje prilikom izlaganja temperaturnom režimu definiranom prema ISO 834 krivulji [98]

Temperaturni profili pod djelovanjem RWS krivulje prikazani su slikom 36, a bili su nešto lošiji od ispitivanja ISO 834 krivuljom. Naime, maksimalna postignuta temperatura iznosila je 250°C na izloženoj strani, a geopolimerni materijal gotovo se u potpunosti otopio te je prilikom ispitivanja primijećen izrazit fenomen puzanja [98].



Slika 36. Rezultati ispitivanja geopolimera na bazi FeNi zgreure prilikom izlaganja temperaturnom režimu definiranom prema RWS krivulji [98]

Zaključak ovog ispitivanja je kako geopolimer na bazi FeNi zgreure, prilikom izlaganja ISO-834 zadovoljava sve postavljene zahtjeve u pogledu izolacijskih i mehaničkih svojstava. S druge strane, pri izlaganju RWS krivulji, izolacijski zahtjevi za beton su zadovoljeni ali izolacijski materijal je u potpunosti uništen [98].

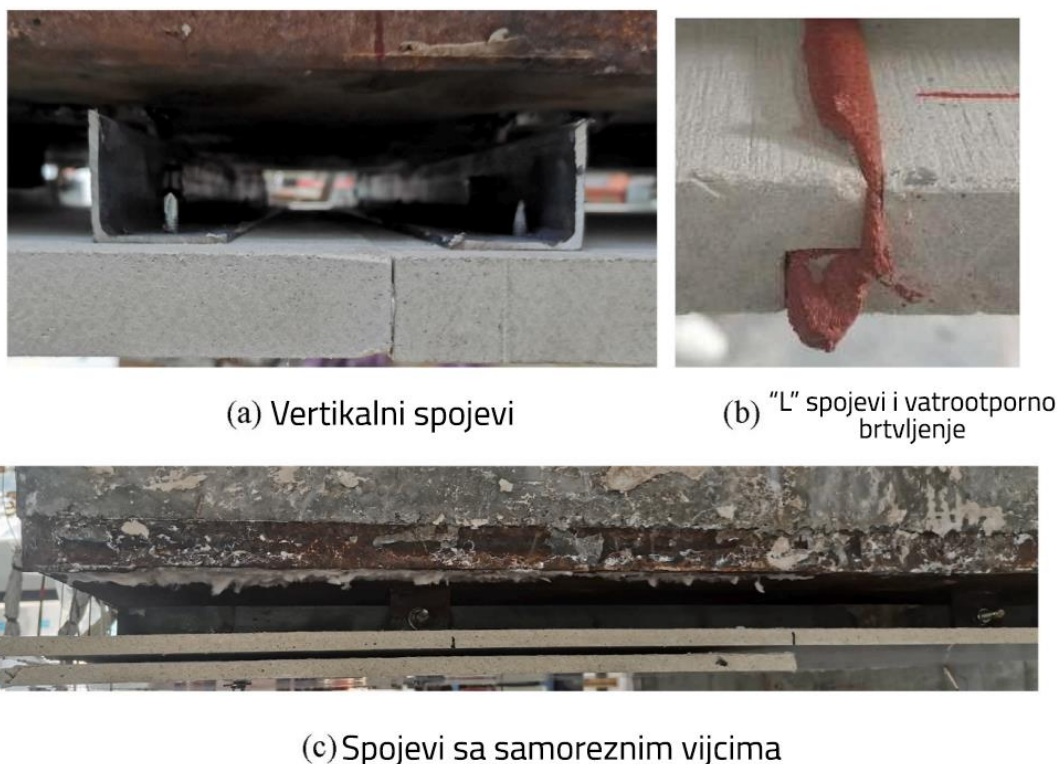
Postoje još brojna istraživanja geopolimernih materijala u pogledu sustava zaštite od djelovanja požara, a mnoga od istih bave se temom upotrebe geopolimera za izradu zaštitnih panela koji su u ovom radu obrađeni u sljedećem poglavlju.

#### 4.4.2. Obloge – vanjski zaštitni sustavi

Uobičajeno se dodatno oblaganje tunela koristilo kako bi se poboljšao estetski izgled same tunelske konstrukcije. U novije vrijeme razvijeni se sustavi obloga koji imaju funkciju zaštite tunelske konstrukcije od djelovanja požara te su isti postali najkorišteniji oblik pasivne zaštite tunelske obloge [99], [100]. Krute panelne ploče postavljaju se jedna uz drugu te se spajaju s postojećom konstruktivnom oblogom tunela pomoću sidrenih vijaka i na taj način tvore zaštitni sloj. Problematika zahtijevane debljine ploče nastaje zbog činjenice da veća



debljina izolacijskog materijala osigurava veću zaštitu ali u isto vrijeme povećava troškove i smanjuje iskoristivi prostor tunela [100]. Također, način spajanja panela za postojeću oblogu te brtvljenje spojeva samih panela međusobno od izrazite je važnosti. Paneli se s tunelskom oblogom najčešće spajaju samoreznim vijcima, međusobno vertikalnim ili „L” spojevima te se brtve vatrootpornim brtvama kao što je prikazano na slici 37 [100].



Slika 37. Različiti načini povezivanja obloga za zaštitu od djelovanja požara [100]

Najčešće korišten materijal za izradu zaštitnih obloga je kalcijev silikat te takve obloge imaju toplinsku vodljivost oko  $0.25 \text{ W/mK}$ , a u nastavku rada prikazat će se i istraživanja provedena na oblogama s dodatkom geopolimera, vermikulita i ekspanzirane gline. Do 2003. godine zabilježena je upotreba ovakvih sustava u gotovo 100 europskih cestovnih tunela, a pretpostavka je da je taj broj danas drastično veći [99].

Hu et al. [100] proveli su ispitivanje svojstava dviju vrsta obloga za zaštitu od djelovanja požara na bazi kalcijevog silikata i vermikulita pri izlaganju toplinskom djelovanju definiranom RABT krivuljom. Uzorci za ispitivanje bili su betonski, dimenzija  $1.0 \times 1.0 \times 1.5 \text{ m}$ , s čeličnim dnom na koje su postavljene zaštitne ploče kao što je prikazano na slici 38.



Slika 38. Uzorci za ispitivanje svojstava zaštitnih ploča na bazi kalcijevog silikata i vermikulita pri izlaganju djelovanju visokih temperatura [100]

Provedeno je pet ispitivanja s različitim debljinama zaštitnih ploča: 0, 24, 25, 30 i 35 mm za svaku vrstu materijala. Termočlanci su postavljeni na sučeljku zaštitnih ploča i simuliranog uzorka tunelske konstrukcije [100]. Razvijene temperature sustava bez zaštitnih ploča prešle su granične temperature od 300°C nakon samo 69 sekundi, a maksimalna postignuta temperatura iznosila je 1037.2°C. S druge strane, sve četiri debljine zaštitnih ploča osigurale su zadržavanje temperature ispod granične vrijednosti nakon 225 minuta izloženosti požaru. Nadalje, nisu uočene pukotine na površini uzorka, prionjivost betona i čelika je očuvana te nije bilo promjena u boji betona. Sami rezultati ispitivanja sa zaštitnim pločama prikazani su u tablici 10 [100].

Tablica 10. Maksimalne postignute temperature donje (izložena strana) čelične ploče [100]

Debljina zaštitne ploče [mm]	Maksimalna temperatura [°C]	
	Vermikulitna vatrootporna ploča	Vatrootporna ploča na bazi kalcijevog silikata
24.0	286.1	284.2
25.0	265.6	264.9
30.0	261.4	246.2
35.0	223.5	210.7

Zaključak ovog ispitivanja jest kako obje vrste ploča, na bazi kalcijevog silikata i vermikulita, za sve odabrane debljine zadovoljavaju postavljene zahtjeve. Bitno je istaknuti kako ploče s kalcijevim silikatom, za iste debljine, ostvaruju bolju izolaciju, odnosno da ploče s vermikulitom ranije gube izolacijska svojstva [100]. Ipak, nakon ispitivanja, ploče s kalcijevim silikatom bile su jako oštećene i deformirane te su autori zaključili kako postoji velika mogućnost otpadanja istih. S druge strane, ploče na bazi vermikulita ostale su gotovo netaknute, s minimalnim pukotinama (slika 39) [100].



Slika 39. Izgled zaštitnih ploča na bazi vermikulita nakon izlaganja djelovanju visokih temperatura s označenim pukotinama [100]

Nadalje, zanimljivo ponašanje kalcij silikatnih zaštitnih obloga zabilježeno je prilikom ispitivanja modela koji su Tomar et al. [101] razvili na temelju podataka iz ispitivanja tunela Runehamar na kojem je korišten tzv. Promatect – T [102], zaštitni sustav na bazi kalcij silikata. Naime, spomenuti model autora pokazao je kako u slučaju korištenja zaštitnih kalcij silikatnih obloga temperatura po visini profila tunela raste. Zabilježena razlika iznosila je između 100 i 200 °C u odnosu na model tunela bez zaštite [101]. Autori su zaključili kako je jedan od mogućih uzroka povećanja temperature prilikom korištenja kalcij silikatnih obloga njihova niska toplinska vodljivost što umjesto apsorpcije i prijenosa topline van tunela, odbija toplinu nazad u tunel i time povećava oslobođenu toplinsku energiju i temperaturu [101]. Potrebno je provesti daljnja istraživanja opisanog fenomena.

Nadalje, Laim et al. [103] ispitali su svojstva zaštitne betonske obloge na bazi ekspanzirane gline. Naime, ekspanzirana glina proizvodi se zagrijavanjem gline na 1200 °C pri čemu dolazi do otapanja gline i proizvodnje plinova koji ostaju zarobljeni unutar otopljenje gline zbog njene viskoznosti. Hlađenjem na sobnu temperatura dobiva se porozni materijal niske gustoće i dobrih izolacijskih svojstava koji se naziva ekspanzirana glina [103]. Sastav betona na bazi ekspanzirane gline korištene za potrebe ovog ispitivanja prikazan je u tablici 11 [103].

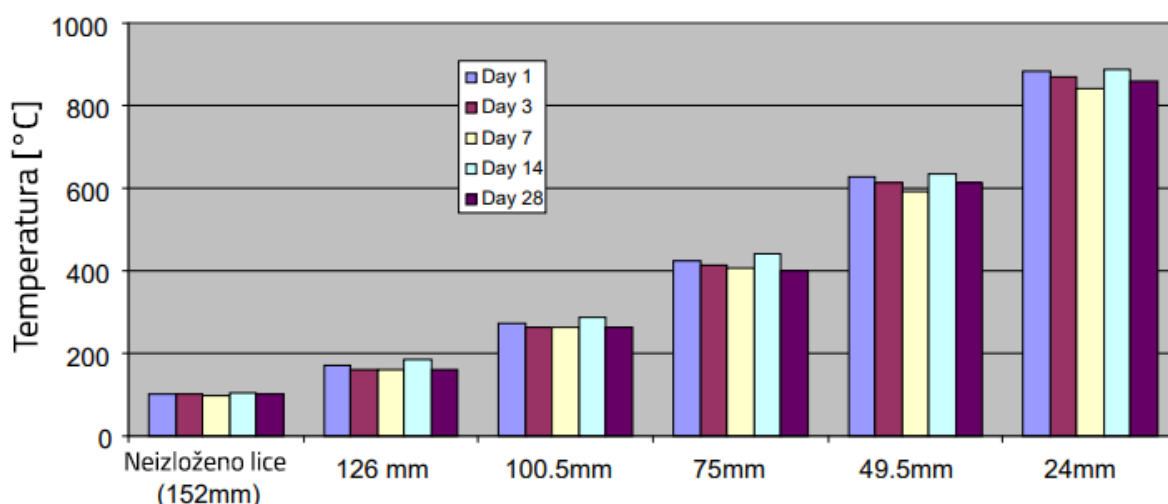
Tablica 11. Sastav betona na bazi ekspandirane gline [103]

Sastav betona na bazi ekspandirane gline	kg/L na $m^3$
Sitna ekspandirana glina (<3 mm)	140 l
Srednje velika ekspandirana glina (3-8 mm)	220 l
Gruba ekspandirana glina (8-16 mm)	700 l
Portland cement (CEM II 42.5)	300 kg
Pijesak	400 l
Superplastifikator	4.0 l
Staklena vlakna	1.5 kg
Voda [v/c]	152 l [0.5]
Željezov oksid	4.0 kg

Provedena su dva ispitivanja na različitim debljinama uzoraka. U prvom ispitivanju korištene su dvoslojne ploče, sa slojem običnog betona od 8 cm i slojem betona na bazi ekspandirane gline debljine 10 cm. Za potrebe drugog ispitivanja, debljine oba sloja smanjene su na 6 cm. Dimenzije zaštitnih ploča iznosile su 1.95 x 2.84 m. Zaštitne obloge bile su samo dio uzoraka za ispitivanje koji su se sastojali od donje ploče (zaštitna obloga), gornje betonske ploče te grede i EPS ispune između ploča [103]. Opisani uzorci izloženi su djelovanju požara približno sukladno RWS krivulji. Maksimalna ostvarena temperatura bila je 1200°C, a ekstremno brz početni porast temperature nije bilo moguće ostvariti u električnoj peći. Mjerodavni termočlanak za procjenu granične temperature bio je termočlanak između zaštitne obloge i betonske grede [103]. Rezultati drugog ispitivanja pokazali su kako debljina zaštitne obloge od 12 cm (6 cm uobičajenog i 6 cm betona na bazi ekspandirane gline) nije dovoljna izolacijska zaštita. Maksimalna zabilježena temperatura bila je 378°C što je više od, za ovo ispitivanje, postavljenije granične vrijednosti od 300°C. S druge strane, razvijene temperature dobivene tijekom prvog, s oblogom debljine 18 cm bile su manje od graničnih vrijednosti, tj. maksimalna ostvarena temperatura bila je 131°C. Površina ekspandirane

glinae prilikom oba ispitivanja promijenila je boju iz crvene u svjetlo smeđu zbog gubitka vode, a veće odlamanje materijala nije uočeno [103]. Zaključak ispitivanja je kako odgovarajuća debljina opisane obloge može biti učinkovito korištena kao zaštita armirano betonske tunelske obloge u slučaju djelovanja požara.

Provis J. [104] proveo je ispitivanje geopolimernih betonskih panela u svrhu izolacijske zaštite tunelske obloge. Ispitani proizvod naziva se E-Crete 40 [105], a radi se o geopolimernom betonu na bazi letećeg pepela i metalurške zguze koji su aktivirani otopinom natrijevog silikata. Također, u sastav su dodani i kvarcni pijesak te smrvljeni granit kako bi se ostvarila slična mehanička svojstva i izgled portland cementa [104]. Izrađeni su uzorci dimenzija 120 x 120 x 15 cm koji su bili omotani u plastičnu foliju određen broj dana (1, 3, 7, 14 ili 28) nakon čega su sazrijevali 56 dana u sobnim uvjetima. Ispitivanje je provedeno koristeći ISO 834 krivulju u trajanju od 4 sata pri čemu je maksimalna postignuta temperatura u peći bila 1150°C [104]. Slika 40. prikazuje postignute temperature na različitim dubinama uzorka u ovisnosti o duljini njegovanja u plastičnoj foliji.



Slika 40. Postignute temperature na različitim dubinama uzoraka u ovisnosti o duljini njegovanja uzoraka [104]

Naime, rezultati ispitivanja pokazali su kako je maksimalna temperatura neizložene strane, što bi u stvarnosti bio promatrani sučeljak zaštitne i postojeće tunelske obloge iznosila je

105.3°C za uzorak njegovan 14 dana. Dobivena temperatura zadovoljava zahtjev ASTM E 119 [106] koji kaže da porast temperature mora biti manji od 139°C [104]. Autori ističu kako su prethodno provodili ispitivanja bez njegovanja uzoraka na sobnim uvjetima u periodu od 56 dana što je rezultiralo visokim sadržajem vode te pri zagrijavanju, posljedično i visokim porastom tlakovima te odlamanjem betona [104]. Nakon uključivanja njegovanja uzoraka u proces pripreme uzoraka, nije došlo do odlamanja betona. Također, zadržan je strukturni integritet uzoraka te autori zaključuju kako se paneli danog geopolimernog betona mogu koristiti kao zaštita tunelske obloge pri djelovanju požara [104].

#### 4.4.3. Vlakna – unutarnji zaštitni sustav

Jedan od glavnih načina sprječavanja nastanka odlamanja betona pri izlaganju istoga visokim temperaturama je korištenje polipropilenskih (u nastavku „PP“) vlakana prikazanih na slici 41.



Slika 41. Polipropilenska vlakna [107]

Prije svega, potrebno je istaknuti kako za razliku od pasivnih toplinskih barijera opisanih u prethodnim poglavljima, dodatak vlakana u sastav betona nema funkciju snižavanja temperature tj. toplinskog opterećenja na betonsku tunelsku oblogu [108]. Dodatkom PP vlakana u sastav betona reducira se rizik od nastanka eksplozivnog odlamanja betona.

Naime, pri temperaturi od  $170^{\circ}\text{C}$ , *PP* vlakna počinju se otapati pri čemu se stvara mreža otvora na mjestima gdje su bila vlakna [109]. Time se povećava propusnost betona što posljedično smanjuje tlakove vodene pare pri zagrijavanju betona i smanjuje rizik eksplozivnog odlamanja betona [109]. Bitno je istaknuti kako je potvrđen utjecaj različite duljine vlakana na razinu propusnosti betona koja se ostvaruje. Naime, Hager et al. [110] zaključili su kako kratka *PP* vlakna duljine 6 mm ostvaruju 4 puta manju propusnost betona u odnosu na vlakna duljine 12 mm te 8 puta manju propusnost u odnosu na vlakna duljine 19 mm. Također, rezultati istraživanja pokazali su kako u načelu vlakna manjeg promjera ostvaruju veće povećanje propusnosti betona te smanjenje odlamanja betona u odnosu na vlakna većeg promjera [111]. Osim u sastav betona za izvođenje in situ elemenata, *PP* vlakna mogu se dodati i u sastav mlaznog betona, jednako kao i u beton za predgotovljene elemente [108]. Connolly R. [112] došao je do zaključka kako se za betone vodocementnog omjera 0.4 s dodatkom *PP* vlakana u iznosu od 0.05% ukupne težine, u potpunosti uklanja rizik eksplozivnog odlamanja. Također, utvrđeno je kako se dodatkom  $2.0\text{ kg}/\text{m}^3$  *PP* vlakana osigurava znatno smanjenje rizika eksplozivnog odlamanja betona [109].

Hager et al. [113] proveli su istraživanje utjecaja količine *PP* vlakana u sastavu *RPC* (eng. Reactive Powder Concrete) betona na smanjenje eksplozivnog odlamanja. Naime, spomenuti *RPC* beton je kompozitni materijal na bazi cementa s vrlo niskom poroznošću i vodovezivnim omjerom. Homogenost betona poboljšava se korištenjem finih agregata, a gustoća se kontrolira preciznom gradacijom veličine zrna agregata. Ono što ovim betonima omogućava postizanje vrlo visokih čvrstoća (preko 200 MPa), osim spomenutog, je i modificiranje mikrostrukture postupkom njegovanja vrućom parom ili autoklaviranjem [113]. Vrlo gust materijal s minimalnom poroznošću i propusnošću gotovo sigurno dovesti će do rasta unutarnjeg pronačkog tlaka prilikom zagrijavanja te pojave eksplozivnog odlamanja betona. Sukladno tome, autori su ispitivali utjecaj određenih količina *PP* vlakana kako bi isti fenomen minimalizirali [113]. Sastav betona korištenog pri ispitivanju bio je sljedeći: portland cement CEM I 52.5 R, silikatna prašina, kvarc i kvarcni pijesak, superplastifikator i dodatak jednog, odnosno  $2\text{ kg}/\text{m}^3$  *PP* vlakana. Uzorci su bili dimenzija  $0.04 \times 0.04 \times 0.08$



$m^3$ . Izrađene su tri mješavine, bez dodatka *PP* vlakana te s dodatkom jednog i dva kilograma istih. Provedeno je njegovanje niskotlačnom parom na  $90^\circ\text{C}$  u trajanju od 24 sata, a 90 dana nakon izrade uzoraka provedeno je samo ispitivanje. Eksplozivno odlamanje ispitivalo se zagrijavanjem uzoraka na  $600^\circ\text{C}$  različitom brzinom (od  $0.5$  do  $8.0$  stupnjeva po minuti) te održavanjem te temperature sat vremena kako bi se ostvarila njena jednolika raspodjela po cijelom uzorku, nakon čega se računao gubitak mase danog uzorka. Također, mjerene su tlačne čvrstoće i modul elastičnosti uzoraka [113]. Vrijednost tlačne čvrstoće uzorka betona bez *PP* vlakana iznosila je  $220\text{ MPa}$ , a dodatkom jednog i dva  $\text{kg}/\text{m}^3$  *PP* vlakana ta vrijednost spustila se na  $191$ , odnosno  $180\text{ MPa}$  što predstavlja pad od  $14\text{--}18\%$ . Nadalje, rezultati su pokazali kako Young-ov modul elastičnosti ne ovisi o količini *PP* vlakana te je za sve tri mješavine vrlo sličan i približno jednak  $50\text{ GPa}$  [113]. Tablica 12. prikazuje rezultate ispitivanja odlamanja betona te prikazuje temperature na kojima je došlo do odlamanja pri čemu je bitno naglasiti kako je brzina zagrijavanja od  $0.5^\circ\text{C}/\text{min}$  korištena samo za provođenje ispitivanja mehaničkih svojstava, a ne ispitivanja gubitka masa.

Tablica 12. Rezultati ispitivanja odlamanja betona [113]

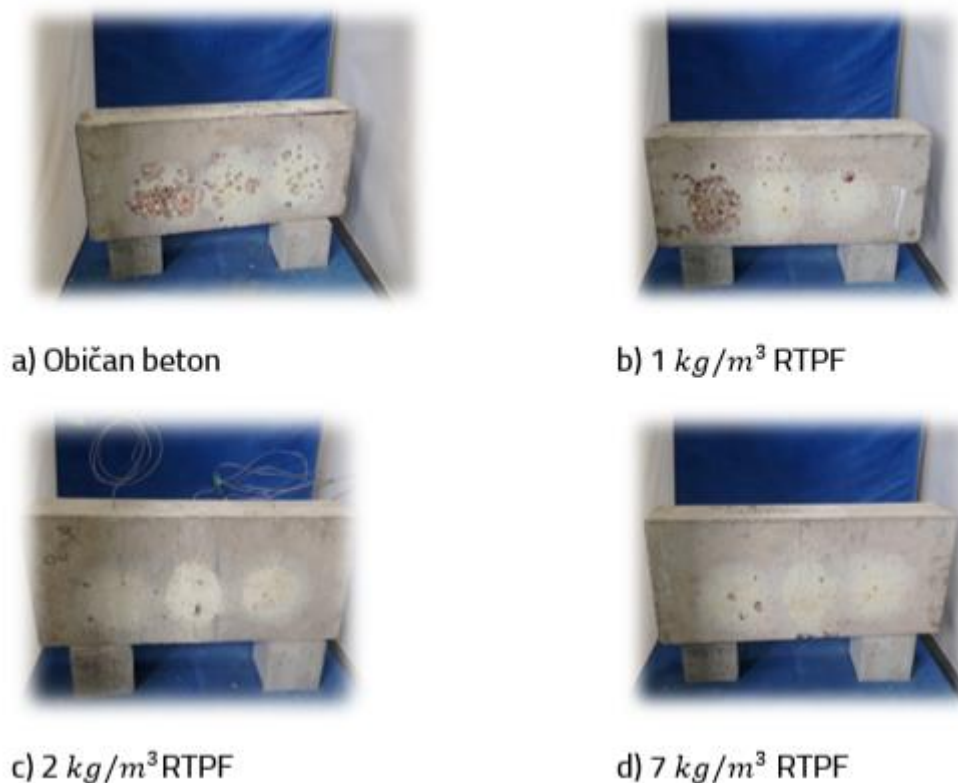
Mješavina	Brzina zagrijavanja				
	$0.5^\circ\text{C}/\text{min}$	$1.0^\circ\text{C}/\text{min}$	$2.0^\circ\text{C}/\text{min}$	$4.0^\circ\text{C}/\text{min}$	$8.0^\circ\text{C}/\text{min}$
	Odlamanje betona: Da/Ne [ispitani uzorci/uzorci s odlamanjem] (Temperatura odlamanja)				
Bez <i>PP</i> vlakana	Ne [10/0]	Da [4/4] (241, 261, 254, 241 $^\circ\text{C}$ )	Da [4/4] (253, 262, 253, 261 $^\circ\text{C}$ )	-	-
$1.0\text{ kg}/\text{m}^3$ <i>PP</i> vlakana	Ne [10/0]	Ne [2/0]	Ne [2/0]	Da [2/1] (331 $^\circ\text{C}$ )	Da [2/2] (354, 348 $^\circ\text{C}$ )
$2.0\text{ kg}/\text{m}^3$ <i>PP</i> vlakana	Ne [10/0]	Ne [2/0]	Ne [2/0]	Ne [2/0]	Ne [2/0]

Zaključak ovog ispitivanja je kako dodatak  $2.0 \text{ kg/m}^3$  *PP* vlakana uvelike smanjuje rizik eksplozivnog odlamanja betona čak i za relativno naglo zagrijavanje u iznosu od  $8^\circ\text{C/min}$  [113].

Iako je dokazana učinkovitost *PP* vlakana u svrhu zaštite tunelskih obloga od eksplozivnog odlamanja betona, bitno je istaknuti kako postoji pitanje degradacije svojstava betona, s dodatkom *PP* vlakana, nakon djelovanja požara [114]. Rezultati istraživanja koje su proveli Bošnjak et al. [114] pokazali su kako dodatak *PP* ne utječe na smanjenje modula elastičnosti ili tlačne čvrstoće betona pri povišenim temperaturama. Dodatno, rezultati istraživanja koje su proveli Rukavina et al. [115] također potvrđuju kako se dodatkom *PP* ne utječe na smanjenje modula elastičnosti ili tlačne čvrstoće betona.

Nadalje, samo u Europskoj uniji godišnje se potroši 75 000 tona *PP* vlakana [116]. U skladu s politikama recikliranja i očuvanja okoliša autori Huang et al. [116] proveli su istraživanje mogućnosti korištenja polimernih vlakana dobivenih iz otpadnih guma (u nastavku „*RTPF*“) kao zamjenu *PP* vlaknima. Godišnja količina polimernih vlakana koja se mogu dobiti iz otpadnih guma iznosi 63 000 tona što bi gotovo u potpunosti nadomjestilo sve potrebe *PP* vlakana [116]. Bitno je izdvojiti kako trenutno ne postoji tehnika kojom bi se s velikom učinkovitošću uklonila vlakna od gume koja ih okružuje. Ipak, određena laboratorijska ispitivanja pokazuju kako se uporabom vibrirajućih sita dobivaju zadovoljavajući rezultati. Neovisno o tome, ručno odvajanje osigurava dovoljnu čistoću vlakana za provođenje ispitivanja njihovog utjecaja na smanjenje eksplozivnog odlamanja betona [116]. Ispitivanje uzoraka izvršeno je na po tri uzorka betonskih ploča, svake od četiri mješavine betona: kontrolna mješavina bez dodatka vlakana te mješavine s dodatkom jednog, dva ili sedam  $\text{kg/m}^3$  *RTPF* vlakana. Dimenzije ploča bile su  $500 \times 220 \times 100$  mm, a zagrijavanje se provodilo uređajem za zavarivanje s tri glave čime se nastojao ostvariti porast temperature što sličniji hidrokarbonskoj krivulji, pri čemu je maksimalna ostvarena površinska temperatura iznosila oko  $950^\circ\text{C}$  [116]. Rezultati ispitivanja, prikazani na slici 42, pokazali su kako su uzorci bez dodatka ili s jednim kilogramom dodatka *RTPF* vlakana znatno mehanički oštećeni te kako je došlo do odlamanja betona. S druge strane, uzorci s dodatkom

s dva ili više  $kg/m^3$  RTPF vlakana pokazali su iznimno dobro ponašanje prilikom izlaganja ekstremno visokim temperaturama; ni kod jednog uzorka nije došlo do odlamanja betona [116]. Zaključak ispitivanja je kako postoji veliki potencijal korištenja RTPF vlakana u pogledu smanjenja rizika eksplozivnog odlamanja betona te očuvanja okoliša.



Slika 42. Izgled uzoraka bez dodatka RTPF vlakana (a) te s dodatkom jednog (b), dva (c) i sedam (d)  $kg/m^3$  RTPF vlakana [116]

## 5. Zaključak

U današnjem dobu, tuneli predstavljaju jedan od ključnih dijelova prometne infrastrukture zbog mogućnosti povezivanja udaljenih i nepristupačnih lokacija čime uvelike skraćuju vrijeme putovanja. Uslijed povećanja broja vozila te razvoja prometne infrastrukture, povećava se i broj tunela. Požari u tunelima mogu uzrokovati značajne gubitke. Velike požarne katastrofe, poput požara u tunelima Channel, St. Gotthard, Mont Blanc, Tauern i sl., osim enormne materijalne štete uslijed zapaljenja vozila i tereta te oštećenja same konstrukcije tunela, dovele su do velikog broja ljudskih žrtvi. Kako bi se minimalizirao broj požara te ograničio razvoj i širenje nastalih, potrebno je obratiti pažnju na sve ulazne parametre pri projektiranju, a ovaj rad stavlja naglasak na različite pasivne mjere zaštite u obliku sustava za zaštitu tunelskih obloga od djelovanja požara.

Iako su procesi nastanka, razvoja i širenja požara i dima u tunelima relativno istražena tematika mnoštvom velikih ispitivanja, poput ispitivanja u sklopu projekta Eureka 499 FIRETUN i tunela Memorial, razvojem tehnologije javljaju se novi rizici pojave požara poput električnih baterija kao pogonskih sustava električnih vozila. Gorenjem vozila i tereta nastaju velike količine dima koje onemogućuju jednostavnu evakuaciju ljudi iz tunela te uzrokuju 80% svih žrtava uslijed nastanka požara u tunelima. Kako bi se umanjile posljedice požara, u tunelima se primjenjuju različite aktivne i pasivne mjere zaštite. Pasivne mjere odnose se na zaštitu sekundarne tunelske obloge od posljedica djelovanja visokih temperatura, koje se u slučaju pojave požara razvijaju brže u odnosu na druge vrste konstrukcija (npr. zgrade). Budući da su sekundarne obloge u većini slučajeva izvedene od betona (bilo kao in-situ izvedenog, mlaznog ili u obliku predgotovljenih elemenata) podložne su pojavi eksplozivnog odlamanja betona. Naime, uslijed izrazito brzog zagrijavanja tunelske obloge, karakterističnog za tunele, dolazi do odlamanja dijelova betona s tunelske obloge što može dovesti do znatnog smanjenja poprečnog presjeka iste, te posljedično do gubitka nosivosti tunelske konstrukcije i urušavanja. Postoje različiti faktori koji utječu na povećanje ili smanjenje rizika od odlamanja betona. Bitno je istaknuti kako sadržaj vlage na ukupnu

težinu elementa predstavlja jedan od glavnih utjecajnih čimbenika. Naime, ukoliko isti iznosi manje od 3%, rizik od nastanka eksplozivnog odlamanja je minimalan ako se radi o betonima relativno niske čvrstoće. Budući da je u tunelima relativna vlažnost zraka često vrlo visoka, posljedično i sadržaj vlage u elementima tunelske obloge može biti visok. Upravo zbog dane činjenice te vrlo brzog razvoja visokih temperatura, fenomen odlamanja betona u tunelima posebno je opasan. Nadalje, ukoliko se zahtijeva korištenje betona visokih ili vrlo visokih čvrstoća, fenomen odlamanja betona postaje još izraženiji. Kako bi se ostvarile visoke čvrstoće, znatno se snižava v/c omjer što rezultira smanjenjem propusnosti i poroznosti betona. Time se smanjuje i mogućnost isparavanja vode iz betona što dovodi do viših vrijednosti pronađenog tlaka te ranijom pojavom odlamanja betona. Iako temperatura na kojoj dolazi do odlamanja betona nije precizno određena, različita istraživanja pokazala su kako kod betona uobičajene čvrstoće dolazi do odlamanja pri temperaturama u rasponu od 250 i 600°C. S druge strane, kod betona visoke čvrstoće isti raspon ima puno nižu gornju granicu od 360°C.

Dva ključna standarda, NFPA 502 i NFPA 130, definiraju zahtjeve kojima se osigurava određena razina sigurnosti tunela u slučaju djelovanja požara. Zahtjevi iz NFPA 502 preneseni su u mnoge druge preporuke, poput preporuka prema RWS-u i EFACTIS-u. Sukladno danim preporukama daju se četiri glavna zahtjeva koji se najčešće nastoje zadovoljiti prilikom ispitivanja različitih zaštitnih sustava čija je svrha zaštita tunelskih obloga prilikom djelovanja požara. Temperatura na površini betona, dakle na sučelju zaštitnog sustava i sekundarne tunelske obloge, ne smije prijeći 380°C. Također, temperatura na razini armature u betonu sekundarne tunelske obloge, uz pretpostavku minimalnog zaštitnog sloja debljine 25 mm, ne smije prijeći 250°C. Sami materijal od kojega se izrađuje zaštitni sustav mora biti klasificiran kao nezapaljiv te mu temperatura taljenja mora biti veća od 1350°C. Naposljetku, spomenuti zahtjevi moraju biti zadovoljeni za raspon saturacije vlagom danog sustava od 5 do 100%. Dodatno, bitno je istaknuti kako se u Hrvatskoj koristi Pravilnik o minimalnim sigurnosnim zahtjevima za tunele (NN 96/13) kojim se zahtijeva otpornost tunelske obloge na požar u trajanju od najmanje 60 minuta.

Postoje dva načina na koja se rizik od pojave odlamanja betona može znatno smanjiti, sprječavanjem prekomjernog porasta temperature betonskih elemenata ili mijenjanjem termo-mehaničkih svojstava samog betona. Sukladno tome, vanjski zaštitni sustavi koji se izvode kao obloge ili mortovi (žbuke, premazi) imaju funkciju ograničenja porasta temperature. S druge strane, unutarnji zaštitni sustavi odnose se na dodatak vlakana, najčešće polipropilenskih, samome sastavu betona te se na taj način smanjuje rizik od nastanka odlamanja betona, neovisno o povećanju temperature. U ovome radu dan je pregled istraživanja koja su potvrdila mogućnost upotrebe različitih sustava sa svrhom zaštite tunelskih obloga u slučaju djelovanja požara. Sustavi koji se izvode u obliku mortova imaju dvije glavne prednosti: mogućnost jednostavnog nanošenja čak i na površine komplicirane geometrije te mogućnost korištenja dostupnih i ekonomski isplativih materijala poput vermikulita i perlita. Ipak, zabilježeno je kako mortovi na bazi vermikulita, u slučaju visoke relativne vlažnosti zraka u tunelu, pokazuju granične rezultate zaštite od djelovanja požara. Sustavi koji se izvode u obliku obloga znatno su skuplji te postoji problem njihovog znatnog oštećenja nakon izlaganja djelovanju požara. Alkalno aktivirani i geopolimerni sustavi, u obliku morta ili obloga, predstavljaju iznimno dobra rješenja u pogledu korištenja otpadnih materijala (leteći pepeo, FeNi zgura) i očuvanja okoliša, dok pritom zadovoljavaju sve postavljene zahtjeve zaštite tunelskih obloga od djelovanja požara. Bitno je istaknuti kako je metakaolin jedan od materijala koji se najčešće koristi za izradu sustava zaštite na bazi geopolimera. Iako ispitivanja potvrđuju mogućnost upotrebe zaštitnih sustava na bazi metakaolina u svrhu zaštite tunelskih obloga, zabilježeno je izrazito pucanje površine takvih sustava uslijed isparavanja geopolimerne vode. Naposljetku, dodatkom polipropilenskih vlakana u sastav betona reducira se rizik od nastanka eksplozivnog odlamanja betona. Naime, pri temperaturi od 170°C, polipropilenska vlakna počinju se otapati pri čemu se stvara mreža otvora na mjestima gdje su bila vlakna. Time se povećava propusnost betona što posljedično reducira tlakove vodene pare pri zagrijavanju betona i reducira rizik eksplozivnog odlamanja betona. Bitno je istaknuti kako geometrija istih znatno utječe na smanjenje rizika odlamanja betona.

Ispitivanjima je potvrđeno kako kraća vlakna, manjeg promjera ostvaruju veće povećanje propusnosti betona tj. manji rizik od nastanka odlamanja betona. Također, različitim istraživanjima potvrđeno je kako se dodatkom  $2.0 \text{ kg/m}^3$  polipropilenskih vlakana u sastav betona znatno smanjuje rizik od odlamanja. Iako su polipropilenska vlakna jeftina, budući da se troše velike količine istih, kako u svrhu smanjenja rizika od odlamanja betona tako i u ostale, posljednjih godina istražuje se mogućnost njihove zamjene s polimernim vlaknima koja se mogu dobiti iz otpadnih guma. Također, iako postoji pitanje degradacije svojstava betona s dodatkom polipropilenskih vlakana, različitim istraživanjima potvrđeno je kako ne dolazi do smanjenja modula elastičnosti ili tlačne čvrstoće pri izlaganju betona visokim temperaturama.

Nakon velikih požarnih katastrofa krajem 20. stoljeća, sigurnost u tunelima u slučaju požara postala je vrlo bitna tema te je u razvoj iste uloženo mnogo resursa. Napredak u području očituje se u izrazito smanjenom broju poginulih i ozlijeđenih ljudi. Iako je sigurnost tunela u slučaju požara znatno povećana, preostaje još velik broj fenomena koji nisu u potpunosti razjašnjeni te mogućnosti za razvojem novih materijala i metoda kojima bi se mogla povećati zaštita u slučaju požara.

---

## POPIS LITERATURE

- [1] Fehérvári S: „Characteristics of tunnel fires“, 2008.
- [2] Beard A., Carvel R: „The handbook of tunnel fire safety“, 2005.
- [3] Maraveas C., Vrakas A: „Design of concrete tunnel linings for fire safety“, Structural Engineering International, Vol. 24, 3, 319-329, 2014.
- [4] Ifa-swiss: „Tunnel fires from 2012 to 2023: Statistics from media reports“ (2023), dostupno na: <https://www.ifa-swiss.ch/en/magazine/detail/tunnel-fires-from-2012-to-2023-statistics-from-media-reports> [14. srpnja 2024.]
- [5] Carvel R., Marlair G: „Real Tunnel Fires: A History of Fire Incidents in Tunnels“, 2005.
- [6] Hrvatska udruga koncesionara za autoceste s naplatom cestarine: „Ključne brojke“ 2022.
- [7] Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture: „Autoceste“, dostupno na: <https://mmpi.gov.hr/infrastruktura/prometna-infrastruktura-137/autoceste/8272> [16. srpnja 2024.]
- [8] Osobne korespondencija: „Tablica požara u tunelima HAC-a 2016. - 2024.“
- [9] Osobna korespondencija: „Požari: Tunel Učka“
- [10] Hrvatske željeznice: „Statistika HŽ infrastrukture“, 2019.
- [11] Naevestad T., Blom J., „Vehicle fires in Norwegian road tunnels 2008-2021“, TØI Report 1948, 2023.
- [12] Xiao K., Ji Y: „The Effect of Longitudinal Ventilation System on Smoke Movement and People’s Evacuation in Tunnel Fire“, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 687, 2021.
- [13] The World Road Association (PIARC): „Design fire characteristics for road tunnels“, 2017.
- [14] Dorsz A., Lewandowski M: „Analysis of fire hazards associated with the operation of electric vehicles in enclosed structures“, Energies 2022, Vol. 15, 11, 2022.
- [15] Thomas Long Jr R., Andrew Blum C. F., Thomas Bress C. J., Benjamin Cotts C. R: „Best Practices for Emergency Response to Incidents Involving Electric Vehicles Battery Hazards: A Report on Full-Scale Testing Results Final Report“, The Fire Protection Research Foundation, 2013.



- 
- [16] Heffels P., Marquardt H. J., Staub L: „Improving of fire safety in mass transit tunnels“, 1984.
- [17] Haack A: „2002 ITA Open Session: Fire and Life Safety Current safety issues in traffic tunnels“, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 17, 117-127, 2002.
- [18] Haukur I: „Fire Development in Large Tunnel Fires“, *Fire safety science—proceedings of the eighth international symposium*, 1497-1508, 2005.
- [19] „Fires in Transport Tunnels: Report on Full-Scale Tests“, *uredio Studiengesellschaft Stahlanwendung e. V., EUREKA-Project EU499: FIRETUN*, 1995.
- [20] French S.E: „EUREKA 499—HGV Fire Test (Nov. 1992)—Summary Report“, *Proceedings of the International Conference on Fires in Tunnels*, SP Swedish National Testing and Research Institute, 63-85, 1994.
- [21] “Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program - Test Report“, *Massachusetts Highway Department and Federal Highway Administration*, 1995.
- [22] Lönnermark A., Ingason H: „Fire spread and flame length in large-scale tunnel fires“, *Fire Technology*, Vol. 42, 4, 283–302, 2006.
- [23] Newman J.S., Tewarson A: „Flame Propagation in Ducts“, *Combustion and flame*, Vol. 51, 347-355, 1983.
- [24] Beard A.N., Drysdale D.D., Bishop S.R., Az A: „A Non-linear Model of Major Fire Spread in a Tunnel“, *Fire Safety Journal*, Vol. 24, 333-357, 1995.
- [25] Zhang J., Ji W., Yuan Z., Yuan Y: „Pyrolysis, combustion, and fire spread characteristics of the railway train carriages: A review of development“, *Energy and Built Environment*, Vol. 4, 743-759, 2023.
- [26] Li Y.Z., Ingason H., Lönnermark A: „Correlations between different scales of metro carriage fire tests“, *SP Technical Research Institute of Sweden Report 13*, *Fire Technology*, 2013.
- [27] He H: „Analysis of common problems in smoke prevention and exhaust design of high-rise buildings“, *The Development Orientation of Architecture*, 2018.
- [28] Chen F., Leong J.C: „Smoke flow phenomena and turbulence characteristics of tunnel fires“, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 35, 9, 4554–4566, 2011.
- [29] Kashef A: „International tunnel fire-safety design practices“, *ASHRAE Journal*, Vol. 49, 8, 50-60, 2007.

- [30] Technical Committee on Road Tunnel and Highway Fire Protection (NFPA 502): „Standard for road tunnels, bridges, and other limited access highways“, 2010.
- [31] Technical Committee on Road Tunnel and Highway Fire Protection (NFPA 130): „Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems“, 2007.
- [32] Economic and Social Council (United Nations): „Recommendations of the group of experts on safety in road tunnels - final report“, 2001.
- [33] „Directive 2004/54/EC Of The European Parliament And Of The Council“, Official Journal of the European Union, 2004.
- [34] Rijkswaterstaat, Efectis Nederland: „Fire Testing Procedure for Concrete Tunnel Linings and Other Tunnel Components“, 2020.
- [35] EFNARC: „Specification and Guidelines for Testing of Passive Fire Protection for Concrete Tunnels Linings“ 2006.
- [36] Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture: „Pravilnik o minimalnim sigurnosnim zahtjevima za tunele“, Narodne Novine, NN 96/2013, 2013.
- [37] Federal Ministry of Transport, Innovation and Technology: „Structural Fire Protection in Road Tunnel (RVS 09.01.45)“, 2015.
- [38] Technical Committee on Signaling Systems for the Protection of Life and Property (NFPA 72): „National Fire Alarm and Signaling Code“, 2010.
- [39] Wetzig V: „Destruction mechanisms in concrete material in case of fire, and protection systems“, Proceedings of 4th International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels, 281-290, 2001.
- [40] Bjegović D., Planinc R., Carević M., Planinc M., Betonidd T., Žuljević M: „Composite fire-resistant tunnel segments“, Proceedings of 3rd International Conference on Tunnel Fires and Escape From Tunnels, 177-185, 2001.
- [41] Planinc R. et al: „Tunnel for safe traffic“, Proceedings of the International Conference Tunnel Safety and Ventilation - New Developments in Fire Safety, 303-310, 2002.
- [42] Mouritz A.P., Gibson A.G: „Fire Properties of Polymer Composite Materials: Chapter 3 Fire Reaction Properties of Composites“, 2006.
- [43] Barry I: „Fire resistance of tunnel linings“, Proceedings of the International Conference on Reducing Risk in Tunnel Design and Construction, Basel, 99-111, 1998.
- [44] Chapman D., Metje N., Stärk A: „Introduction to tunnel construction“, Spon Press, 2004.
- [45] Hemphill G.B: „Practical Tunnel Construction“, 2013.

- [46] Holtz R.D: „Stress Distribution and Settlement of Shallow Foundations“, Foundation Engineering Handbook, 166-222, 1991.
- [47] ITA Working Group 2: „Guidelines for the Design of Segmental Tunnel Linings“, ITA Report no. 22, 2019.
- [48] Research Design and Standards Organisation (RDSO): „Guidelines for Design and Construction of tunnels“, 2012.
- [49] Bickel J.O., Kuesel T.R., King E.H: „Tunnel Engineering Handbook“, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [50] Legge N.B., Macdonald M: „Tunnel Lining Design-Hard Ground“, 2001.
- [51] Tunnel - Official Journal of the STUVA: „Potentials for Optimisation of In-Situ Concrete Tunnel Construction“ (2019), dostupno na: [https://www.tunnelonline.info/en/artikel/tunnel\\_Potentials\\_for\\_Optimisation\\_of\\_In-Situ\\_Concrete\\_Tunnel\\_Construction-3413925.html](https://www.tunnelonline.info/en/artikel/tunnel_Potentials_for_Optimisation_of_In-Situ_Concrete_Tunnel_Construction-3413925.html) [30. srpnja 2024.]
- [52] American Concrete Institute (ACI): „Building Code Requirements for Structural Concrete: ACI 318M-11“, 2011.
- [53] EN 1992-1-2: „Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design“, 1992.
- [54] Bakhshi M., Nasri V: „New ACI 533 guide on general design and construction aspects of precast concrete tunnel segments“, Geomechanics and Tunneling, Vol. 12, 5, 478-483, 2019.
- [55] Deutsches Institut für Normung (DIN): „Sprayed Concrete: Production and Inspection (DIN 18551)“, 2005.
- [56] King M: „Segmental lining design“, 2006.
- [57] The British Tunnelling Society (BTS) and The Institution of Civil Engineers (ICE): „Tunnel lining design guide“, Thomas Telford Publishing, 2000.
- [58] Mott MacDonald: „Sprayed concrete lining: best method for the job“, dostupno na: <https://www.mottmac.com/article/74007/sprayed-concrete-lining-best-method-for-the-job> [30. srpnja 2024.]
- [59] Thomas A: „Sprayed Concrete Lined Tunnels, Second Edition“, CRC Press, 2020.
- [60] Brennan E: „Quality and Shotcrete“, Shotcrete Magazine, Vol. 7, 1, 8-9, 2005.

- [61] Stone G: „Update: Tunnel Repair Continues 'Round the Clock'” (2019), dostupno na <https://cropwatch.unl.edu/2019-CW-News/2019-images/Irrigation/Tunnel-work.jpg> [30. srpnja 2024.]
- [62] Shutterstock: „Reinforced lattice girder”, dostupno na: <https://www.shutterstock.com/image-illustration/reinforced-lattice-girder-isolated-on-white-2267153609> [14. rujna 2024.]
- [63] Yazicioğlu S., Tuğla R., Ay S., Demirel B: „Effect of high temperature on compressive strength of concrete prepared using different types of aggregates”, Springer International Publishing, Proceedings of 3rd International Sustainable Buildings Symposium (ISBS 2017), Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 6, 425-434, 2018.
- [64] Zhang Y., Zeiml M., Pichler C., Lackner R: „Model-based risk assessment of concrete spalling in tunnel linings under fire loading”, Engineering Structures, Vol. 77, 207-215, 2014.
- [65] Hertz K.D: „Limits of spalling of fire-exposed concrete”, Fire Safety Journal, Vol. 38, 103-116, 2003.
- [66] Mcnamee R.J: „Fire Spalling of Concrete: Theoretical and Experimental Studies”, Doctoral thesis in Concrete structures, Stockholm, Sweden, 2013.
- [67] Tenachev R., Purnell P: „An application of a damage constitutive model to concrete at high temperature and prediction of spalling”, International Journal of Solids and Structures, Vol. 43, 6550-6565, 2005.
- [68] Khoury G.A: „Effect of fire on concrete and concrete structures”, Progress in Structural Engineering and Materials, Vol. 2, 429-447, 2000.
- [69] Qiao R., Guo Y., Zhou H., Xi H: „Explosive Spalling Mechanism and Modeling of Concrete Lining Exposed to Fire”, Materials, Vol. 15, 9, 2022.
- [70] Amran M., Huang S.S., Onaizi A.M. et al: „Fire spalling behavior of high-strength concrete: A critical review”, Construction and Building Materials, Vol. 341, 2022.
- [71] Deeny S., Stratford T., Dhakal R.P. et al: “Spalling of Concrete: Implications for Structural Performance in Fire”, Australasian Conference on Mechanics of Structure and Materials, 2008.
- [72] Bažant Z.P: „Analysis of Pore Pressure, Thermal Stress and Fracture in Rapidly Heated Concrete”, International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete, NIST, 155-164, 1997.
- [73] Ulm F.-J., Coussy O., Bažant Z.P: „The 'Chunnel' Fire, I: Chemoplastic Softening in Rapidly Heated Concrete”, Journal Of Engineering Mechanics, Vol. 125, 272-282, 1999.

- [74] Luhar S., Nicolaidis D., Luhar I: „Fire Resistance Behaviour Of Geopolymer Concrete: An Overview”, Buildings, Vol. 11, 82, 2021.
- [75] Kalifa P., Menneteau É.-D., Quenard D: „Spalling and Pore Pressure in HPC at High Temperatures”, Cement and Concrete Research, Vol. 30, 1915–1927, 2000.
- [76] Hua N., Tessari A., Elhami-Khorasani N: „Quantifying Uncertainties in the Temperature – Time Evolution of Railway Tunnel Fires”, Fire Technology, Vol. 57, 1, 361–392, 2021.
- [77] EN 1363-1: „Fire resistance tests - Part 1: General requirements”, 2020
- [78] PROMAT: „International fire curves – useful tool for designing fire safety” (2020), dostupno na: <https://www.promat.com/en/tunnels/your-project/expert-area/159981/international-fire-curves-fire-safety/> [17. srpnja 2024.]
- [79] Kashef A., Viegas J., Mos A., Harvey N: „Proposed idealized design fire curves for road tunnels”, Proceedings of 14th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Tunnels, 1-14, 2011.
- [80] Technical Committee 5 Road Tunnels (PIARC): „Fire and smoke control in road tunnels”, 1999.
- [81] Lönnermark A., Ingason H: „Gas temperatures in heavy goods vehicle fires in tunnels”, Fire Safety Journal, vol. 40, 6, 506-527, 2005.
- [82] Khorasani N.E., Billittier J., Stavridis A: „Structural performance of a railway tunnel under different fire scenarios”, Proceedings of the 2018 Joint Rail Conference, 2018.
- [83] Qiao R., Shao Z., Liu F., Wei W: „Damage evolution and safety assessment of tunnel lining subjected to long-duration fire”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 83, 354-363, 2019.
- [84] Kounadis A., Nomikos P., Benardos A: „Using a vermiculite-based fire protection mortar to increase the fire resistance of reinforced concrete tunnels”, Expanding Underground - Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World, Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress, CRC Press/Balkema, 687–694, 2023.
- [85] Kiran T., Yadav S.K., Anand N. et al: „Performance evaluation of lightweight insulating plaster for enhancing the fire endurance of high strength structural concrete”, Journal of Building Engineering, Vol. 57, 2022.
- [86] Caetano H., Laím L., Santiago A. et al: „Development of Passive Fire Protection Mortars”, Applied Sciences, Vol. 12, 4, 2022.

- [87] Sika: „Sikacrete-213 F“, dostupno na:  
<https://gcc.sika.com/en/construction/refurbishment/concrete-repair/sikacrete-213-f.html>  
[16. rujna 2024.]
- [88] IS 1608: „Mechanical testing of metals - Tensile Testing“, 2005.
- [89] IS 2770-1: „Methods of testing bond in reinforced concrete, Part 1: Pull-out test“, 1967.
- [90] Koksal F., Gencil O., Kaya M: „Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures“, Construction and Building Materials, Vol. 88, 175-187, 2015.
- [91] Duan J., Dong Y., Xiao J. et al: „A large-scale fire test of an immersed tunnel under the protection of fire resistive coating“, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 111, 2021.
- [92] Davidovits J: „Geopolymer Chemistry and Applications, 5th edition“, Institut Géopolymère, 2008.
- [93] Sakkas K., Nomikos P., Sofianos A., Panias D: „Utilisation of FeNi-Slag for the production of inorganic polymeric materials for construction or for passive fire protection“, Waste and Biomass Valorization, Kluwer Academic Publishers, 403-410, 2014.
- [94] Hammer A.-L., Rhein C., Rengshausen T. et al: „Alkali-activated sprayed concrete as a fire protection coating for tunnels inner lining: proof-of-concept study on the heat transfer“, The 11th International Conference on Structures in Fire, University of Queensland Library, 2020.
- [95] Krivenko P., Guzii S., Rudenko I., Konstantynovskyi O: „Intumescent Fireproof Coatings Based on Zeolite-Like Cement Matrices“, Proceedings in Civil Engineering (CE/papers), Vol. 6, 5, 923-929, 2023.
- [96] Morgan Advanced Materials: „FireMaster: FireBarrier 135“ (2019), dostupno na:  
[https://www.morganthermalceramics.com/media/eitnptf0/fm-firebarrier-135\\_eng.pdf](https://www.morganthermalceramics.com/media/eitnptf0/fm-firebarrier-135_eng.pdf)  
[16. rujna 2024.]
- [97] BASF: „MEYCO Fireshield 1350“ (2010), dostupno na:  
<https://www.petrolinetech.com/wp-content/uploads/2021/12/Meyco-Fireshield-1350-TDS.pdf> [16. rujna 2024.]
- [98] Sakkas K., Nomikos P., Sofianos A, Panias D: „Sodium-based fire resistant geopolymer for passive fire protection“, Fire and Materials, Vol. 39, 3, 259-270, 2015.

- [99] Davidson M.T., Harik I.E., Davis D.B.: „Fire Impact and Passive Fire Protection of Infrastructure: State of the Art”, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 27, 2, 135-143, 2013.
- [100] Hu X., Jiang S., Zhang D., Wang J.: „Experimental study on fireproof board insulation technique for steel-concrete-steel immersed tunnel”, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 49, 2023.
- [101] Tomar M., Khurana S., Singh R.: „Behaviour of tunnel lining material in road tunnel fire”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Vol. 346, 2018.
- [102] Promat: „PROMATECT-T: Matrix Engineered Mineral Board”, 2016.
- [103] Laím L., Rodrigues J.P.C.: „Fire Protection Of Reinforced-Concrete Tunnel Linings With Expanded-Clay Concrete Boards”, 2012.
- [104] Provis J.: „Fire Resistance of Geopolymer Concretes”, University of Melbourne, 2009.
- [105] The Zeobond Group: „E-crete”, dostupno na: <http://www.zeobond.com/products-e-crete.html> [16. rujna 2024.]
- [106] American Society for Testing and Materials (ASTM): „Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials (ASTM E 119)”, 2020.
- [107] Learn Everything: „Polypropylene fiber reinforced concrete”, dostupno na: <https://www.learneverything.in/2020/07/polypropylene-fiber-reinforced-concrete.html> [16. rujna 2024.]
- [108] Khoury G.A.: „Passive Fire Protection of Concrete Structures”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, Vol. 161, 3, 135-145, 2008.
- [109] Mróz K., Hager I., Korniejenko K.: „Material Solutions for Passive Fire Protection of Buildings and Structures and Their Performances Testing”, in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 284-291, 2016.
- [110] Hager I., Mróz K.: „Role of polypropylene fibres in concrete spalling risk mitigation in fire and test methods of fibres effectiveness evaluation”, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, 2019.
- [111] Sultangaliyeva F., Fernandes B., Carré H., La Borderie C.: „Optimizing choice of polypropylene fiber geometry for preventing spalling of high performance concrete due to fire”, *Fire safety Journal*, Vol. 136, 2023.

- [112] Connolly R.J: „The Spalling of Concrete in Fires“, College of Engineering and Physical Sciences (UK), 1995.
- [113] Hager I., Zdeb T., Krzemień K: „The Impact of The Amount of Polypropylene Fibres on Spalling Behaviour and Residual Mechanical Properties of Reactive Powder Concretes“, MATEC Web of Conferences 6, EDP Sciences, 2013.
- [114] Bošnjak J., Sharma A., Grauf K: „Mechanical Properties of Concrete with Steel and Polypropylene Fibres at Elevated Temperatures“, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), *Fibers*, Vol. 7, 9, 2019.
- [115] Rukavina J.M., Baričević A., Serdar M., Grubor M: „Study on the post-fire properties of concrete with recycled tyre polymer fibres“, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 123, 2021.
- [116] Huang S.S., Angelakopoulos H., Pilakoutas K., Burgess I: „Reused Tyre Polymer Fibre for Fire-Spalling Mitigation“, *Applications of Structural Fire Engineering*, Czech Technical University in Prague, 2017.



## POPIS SLIKA

Slika 1. Statistički podaci o broju požara u tunelima u Švicarskoj, Njemačkoj i Austriji [4] ...	2
Slika 2. Broj požara u a) željezničkim tunelima i b) cestovnim tunelima po godinama [4] ....	3
Slika 3. Uzroci nastanka požara u tunelima pod HAC-om .....	5
Slika 4. Statistički podaci požara u tunelima na dionicama HAC-a .....	5
Slika 5. Statistički podaci požara u tunelu Učka .....	6
Slika 6. Presjek konstrukcije tunela .....	7
Slika 7. Mehanizam udara plamena u tunelima s uzdužnim strujanjem zraka [17] .....	13
Slika 8. Pozicije i vrste maketa [21] .....	15
Slika 9. Geometrija modela tunela [27] .....	19
Slika 10. Stratifikacija dima [27] .....	20
Slika 11. Profili uzdužne brzine strujanja zraka [27] .....	20
Slika 12. Uzajamno djelovanje temperaturnog gradijenta i ventilacijskog sustava nakon a) 10 sekundi i b) 30 sekundi [27] .....	21
Slika 13. Izgled tunela a) prije izvođenja in situ betonske tunelske obloge i b) nakon izvođenja iste [51] .....	35
Slika 14. Različiti sustavi prstenova segmentne obloge [47] .....	38
Slika 15. Načini slaganja različitih geometrijskih oblika segmentne tunelske obloge [47].	38
Slika 16. Strojno izvođenje tunelske obloge od mlaznog betona [58] .....	40
Slika 17. Rebrasti potporni sustav s čeličnim rebrima [61] .....	42
Slika 18. Rešetkasti nosači za izvođenje rebrastih sustava [62] .....	43
Slika 19. Element Great Belt tunela nakon požara – posljedice eksplozivnog odlamanja betona sekundarne obloge [66] .....	44
Slika 20. Termo-mehanički mehanizam odlamanja betona [74] .....	46
Slika 21. Termo-hidraulički mehanizam odlamanja betona [74] .....	47
Slika 22. Pozicije termočlanaka u uzorku [34] .....	52
Slika 23. Sheme oslanjanja i opterećivanja uzoraka [34] .....	53
Slika 24. Hidrokarbonska krivulja [78] .....	54
Slika 25. Modificirana hidrokarbonska krivulja [78] .....	55
Slika 26. RWS krivulja [78] .....	56
Slika 27. RABT-ZTV krivulje [78] .....	56
Slika 28. ISO 834 požarna krivulja [78] .....	57
Slika 29. Rezultati laboratorijskih ispitivanja pod RWS krivuljom za uzorak s a) 20 mm zaštitnog morta i b) 26 mm zaštitnog morta [84] .....	64

---

Slika 30. Pozicija nanošenja morta te mjerenja temperature termočlancima [84].....	65
Slika 31. Izgled površine uzoraka različitih mješavina nakon zagrijavanja i hlađenja [85]..	66
Slika 32. Razvijene temperature kroz uzorak s aluminosilikatnim premazom [95].....	70
Slika 33. Razvijene temperature pri ispitivanju uzoraka geopolimera na bazi a) metakaolina i b) FeNi zgure prema RWS krivulji [93].....	73
Slika 34. Izgled površine geopolimera na bazi a) metakaolina i b) FeNi zgure nakon izlaganja djelovanju požara [93] .....	74
Slika 35. Rezultati ispitivanja geopolimera na bazi FeNi zgure prilikom izlaganja temperaturnom režimu definiranom prema ISO 834 krivulji [98].....	76
Slika 36. Rezultati ispitivanja geopolimera na bazi FeNi zgure prilikom izlaganja temperaturnom režimu definiranom prema RWS krivulji [98].....	77
Slika 37. Različiti načini povezivanja obloga za zaštitu od djelovanja požara [100] .....	78
Slika 38. Uzorci za ispitivanje svojstava zaštitnih ploča na bazi kalcijevog silikata i vermikulita pri izlaganju djelovanja visokih temperatura [100].....	79
Slika 39. Izgled zaštitnih ploča na bazi vermikulita nakon izlaganja djelovanju visokih temperatura s označenim pukotinama [100].....	81
Slika 40. Postignute temperature na različitim dubinama uzoraka u ovisnosti o duljini njegovanja uzoraka [104] .....	83
Slika 41. Polipropilenska vlakna [107] .....	84
Slika 42. Izgled uzoraka bez dodatka RTPF vlakana (a) te s dodatkom jednog (b), dva (c) i sedam (d) kg/m <sup>3</sup> RTPF vlakana [116].....	88

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Statistički podaci najvećih požarnih katastrofa u tunelima [5] .....	4
Tablica 2. Uobičajene vršne HRR vrijednosti različitih vozila [12].....	10
Tablica 3. Rezultati istraživanja organizacije Stuva [15], [16].....	11
Tablica 4. Ulazni parametri sadržaja makete teretnog vozila [21].....	14
Tablica 5. Kategorizacija tunela po NFPA 502 [43] .....	24
Tablica 6. Podjela tunela s obzirom na tehnologiju izvedbe tunela i vrstu tunelske obloge [47-50] .....	32
Tablica 7. Podjela sustava zaštite tunelskih obloga od djelovanja požara [87-119].....	61
Tablica 8. Usporedba svojstava geopolimernih i komercijalnih zaštitnih sustava [93] .....	71
Tablica 9. Usporedba mehaničkih svojstava betona uobičajene čvrstoće i geopolimera na bazi FeNi zture [98].....	75
Tablica 10. Maksimalne postignute temperature donje (izložena strana) čelične ploče [100] .....	80
Tablica 11. Sastav betona na bazi ekspanzirane gline [103] .....	82
Tablica 12. Rezultati ispitivanja odlamanja betona [113] .....	86