

POŽARNA ZAŠČITA BETONSKIH KONSTRUKCIJ

Povzetek:

Mnenje da je beton neomejeno požarno odporen, je precej razširjeno. Vendar ni povsem tako. V referatu bi rad prikazal:

- različne vrste požarov, ki različno obremenjujejo armirano betonske konstrukcije,
- potek dviga temperature s časom (požar celuloze, požar ogljikovodikov, požar v predoru),
- kaj se dogaja v betonu ob teh temperaturah tako na površini kot v globini konstrukcije,
- dvig temperature in procese v notranjosti armirano betonske konstrukcije,
- razpadanje betona in padec trdnosti,
- vpliv vlage na obnašanje AB konstrukcije in poškodbe, ki nastanejo ob prehitrem segrevanju,
- požarno odpornost standardnih armirano betonskih konstrukcij (primeri iz DIN 4102 del 4 in možnosti poboljšanja požarne odpornosti),
- ščitenje armirano betonskih konstrukcij pred požarom in s tem poboljšanje njihove požarne odpornosti s ploščami iz kalcijevega silikata (s poudarkom na uporabo plošč v predorih in poboljšanju požarne odpornosti obstoječih konstrukcij).

Summary

Opinion, that reinforced concrete structure are unlimited fire-resistant is widespread. But unfortunately is not true. Here I would like to subscribe the fire performance of reinforced concrete structure will vary depending on the heating conditions it is exposed to. (cellulosic, hydrocarbon, tunnels curve). What happened in the concrete at exposing to high temperature? Increase of temperature inside of concrete structure. Decay of concrete and lost of steel reinforcement strength. Concrete moisture content can destroy reinforced concrete structure at increased temperature. Fire resistance of standard reinforced concrete structure. Examples from DIN 4102 part 4. Fire protection of reinforced concrete structure and upgrading of fire rating with calcium silicate fire protection boards, special in tunnels and upgrading von existing constructions.

Različne vrste požarnih obremenitev armirano betonskih konstrukcij

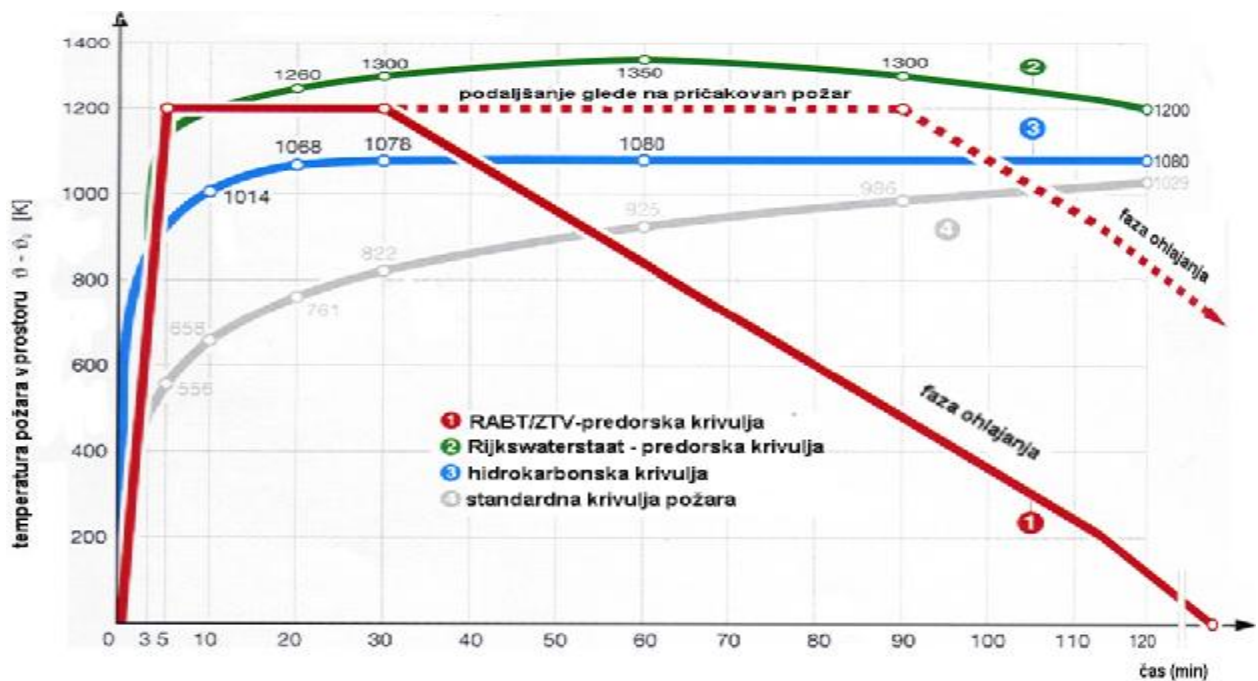
Lastnosti materialov se spreminjajo s povišanjem temperature. Vendar pa do porušitve konstrukcije ne pride samo zaradi povišane temperature. Zelo pomemben faktor je tudi čas, v katerem je ta temperatura dosežena. Povezava teh dveh parametrov je predvsem odvisna od vrste goriva (požara) in od prostora, kjer do požara pride. Kot posledica teh dejstev so različne nacionalne in mednarodne ustanove definirale različne požarne krivulje. Najpomembnejše krivulje, ki so v uporabi za preskušanje obnašanja armiranobetonskih konstrukcij, so:

Standardna požarna krivulja je simulacija naravnega požar v stavbah. Po 30 minutah se temperatura zviša za 822 °C. Krivulja se uporablja v večini testnih metod po svetu, kot so DIN 4102, BS 476, AS 1530, ASTM. Upoštevat jo tudi nova evropska norma EN 1363-1 in slovenska SIST EN 1363-1.

Hidrokarbonska požarna krivulja ponazarja požar ogljikovodikov (motornega bencina, nafte). Porast temperature po 30 minutah je 1078 °C.

RABT krivulja je nastala v Nemčiji kot rezultat številnih preskusov, kot so bili preskusi Eureka projekta. Temperatura naraste v prvih petih minutah na 1200 °C. Požar naj ne bi trajal dlje kot 30 minut. Seveda pa se glede na pričakovan požar lahko podaljša. Pomemben del te krivulje oz. postopka preskušanja je tudi faza ohlajevanja, ki traja 110 minut. V tej fazi pride zelo pogosto do porušitve konstrukcije kot posledica ponovnega krčenja materiala.

RWS (Rijkwaterstaat) krivulja temelji na domnevi 300 MW požara v omejenem prostoru, na primer v predoru. Krivulja je nastala na Nizozemskem in je bila tudi mednarodno dobro sprejeta. Porast temperature po 30 minutah znaša 1300 °C.



slika 1: požarne krivulje

Kaj se dogaja na površini in v notranjosti armirano betonske konstrukcije ob povišanju temperature

Termomehanski procesi v betonu povzročijo tri načine poškodbe konstrukcije:

- Napetosti kot posledica različnih temperatur konstrukcije

Zaradi različnih termičnih raztezanj, ki so posledica različnih temperatur konstrukcije, pride v požaru ob povišanih temperaturah do tlačnih in nateznih obremenitev. Ko je ta sila višja od trdnosti betona, nastanejo v konstrukciji razpoke. Posebno nevarne so razlike v temperaturi površine in notranjosti, kar pripelje do razpok v notranjosti betonske konstrukcije. Zaradi sorazmerno slabe prevodnosti in vsebnosti vode, ki za izhlapevanje porablja energijo in s tem hladi notranjost konstrukcije, so te razlike še večje. Navedene so v naslednji tabeli.

vrsta požara	čas (min)	temperatura na površini(°C)	temperatura v globini 25 mm(°C)
Standardi požar	0	20	20
	30	760	280
	60	900	420
	90	980	560
	120	1010	635
požar ogljikovodikov	0	20	20
	30	1080	400
požar v predoru (RWS-krivulja)	0	20	20
	30	1280	240

Tabela 1: Povišanja temperatur na površini in v notranjosti betonske konstrukcije

- Napetosti kot posledica različnih temperaturnih koeficientov dolžinskega raztezka

Razlike v razteznostnih koeficientih sestavnih delov betonske konstrukcije povzročijo dodatne napetosti v betonski konstrukciji. Sestavni deli betonske konstrukcije imajo različne temperaturne koeficiente dolžinskega raztezka. Dodatki imajo koeficiente od $5 \cdot 10^{-6}/K$ pa do $12 \cdot 10^{-6}/K$, medtem ko se cement zaradi sušenja in dehidracije krči s koeficientom od $\alpha T = 8 \cdot 10^{-6}/K$ pa do $\alpha T = 23 \cdot 10^{-6}/K$. Na velikost koeficienta vpliva vlažnost konstrukcije pred požarom.

- Napetosti kot posledica spremembe sestave dodatkov zaradi povišanja temperature

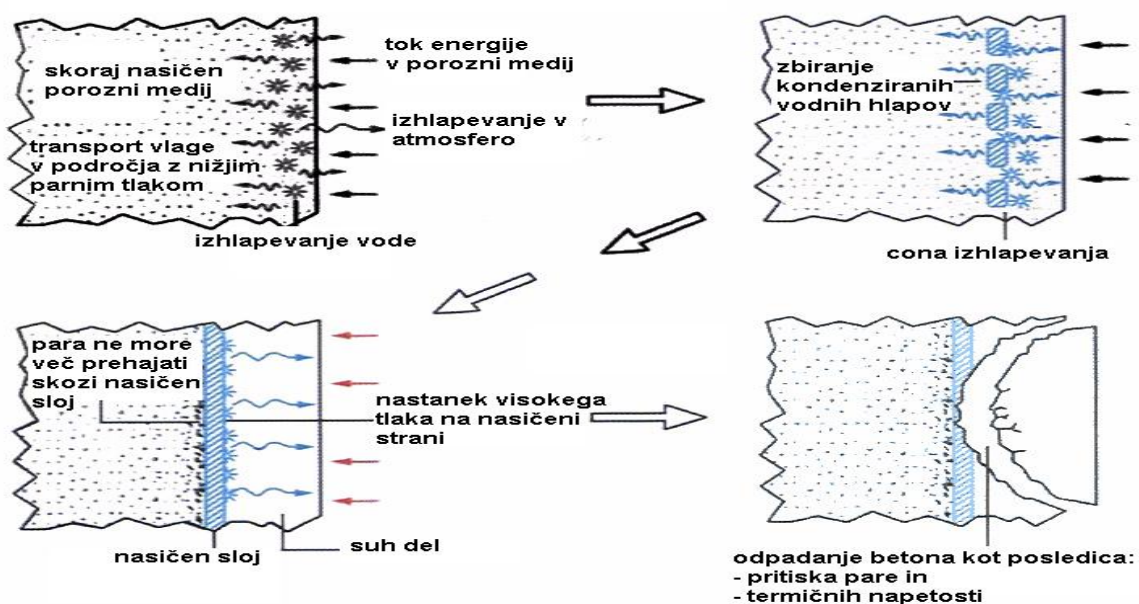
Pri povišanih temperaturah oddajajo nekateri sestavni deli betona vezano vodo. Pri nekaterih elementih prihaja do spremembe kristalne strukture (npr. pri granitu ali kremenu). Pri apnencu prihaja celo do kemičnih razpadov kalcijevega karbonata v kalcijev oksid in ogljikov dioksid. Nad $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ prihaja že do taljenja nekaterih sestavin. Ob taljenju sproščajo nekatere sestavine (npr. nekatere vrste bazalta) pline, ki povzročajo celo napihovanje. Vsi ti procesi zelo negativno vplivajo na trdnost betonske konstrukcije.

Temperaturno območje (°C)	sprememba
30 - 120	Izhlapevanje proste in fizikalno vezane vode
100 - 300	Začetek dehidracije
250 - 600	Oddajanje kemično vezane vode
450 - 550	Razpad portlandita $\text{Ca(OH)}_2 \Rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
573	$\text{SiO}_2 \alpha \Rightarrow \beta$ (samo pri kvarcu)
600 - 700	Začetek razpada CSH vezi,; nastanek $\beta - \text{C}_2\text{S}$
600 - 900	$\text{CaCO}_3 \Rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ (samo pri apnencu)
1200 - 1300	Začetek taljenja
≥ 1400	Beton je talina

Tabela 2: Spremembe v betonu ob povišanju temperature

Termohidravlični procesi zaradi opisanih napetosti povzročijo eksplozijsko odpadanja betona. Glavni povzročitelj tega je voda oz. vodna para.

Pri obremenitvi površine s povišano temperaturo prične fizično in kemično vezana voda, ki se nahaja v betonu, izhlapevati. Molekule vodne pare se gibljejo v smeri nižjega parnega tlaka proti višjemu, torej tudi v notranjost betonske konstrukcije. V notranjosti zaradi nižje temperature kondenzirajo. S tem se količina vode v notranjosti konstrukcije poveča. Prej ali slej pride v notranjosti do zapolnitve por betona z vodo. S tem je nadaljnja pot vodne pare v notranjost konstrukcije preprečena. Ob nadaljevanju dovoda energije narašča pritisk vodne pare do te stopnje, da je vsota sil vseh parcialnih tlakov (vode, zraka in sproščenih plinov) in napetosti kot posledica termomehanskih procesov višja kot trdnost betona. V tem trenutku odpade del konstrukcije, kar je na videz podobno eksploziji betona.



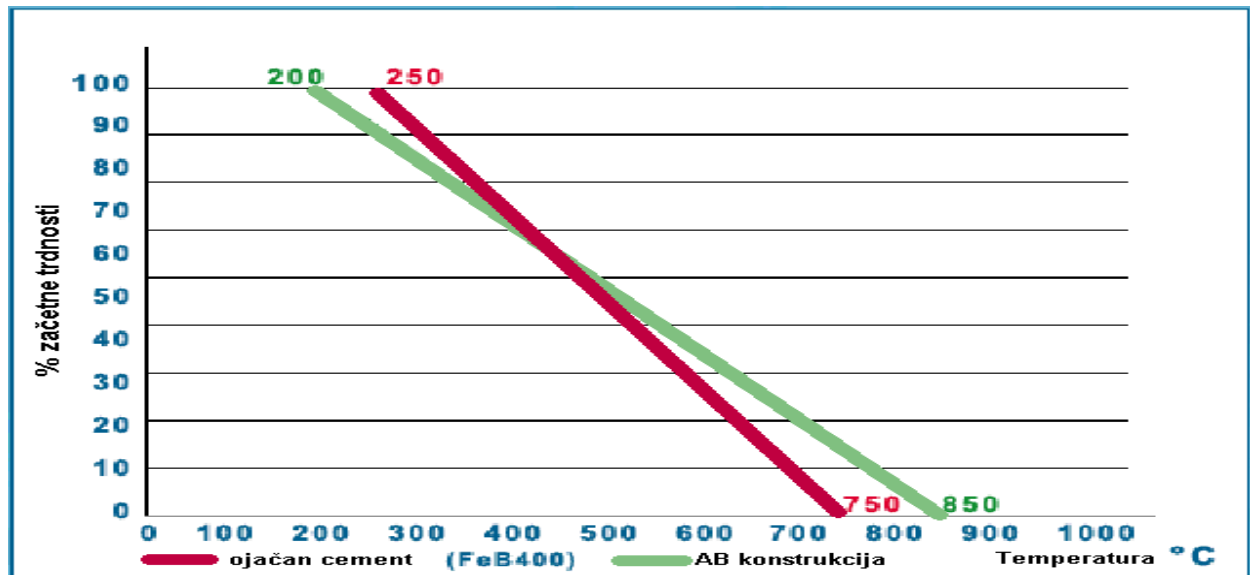
Slika 2: Shematski prikaz nastanka eksplozijskega odpadanja delov betonske konstrukcije

Kdaj bo začetek eksplozijskega odpadanja, je odvisno še od več dejavnikov:

- Vrsta požara oz. hitrost segrevanja
- Temperatura betona
- Količina vlage v betonu (vsaj 2%)
- Trdnost betona
- Količina por in njihova povprečna velikost
- Natezne sile v betonskem elementu
- Mineralna in kemična sestava betona
- Položaj armature
- Oblika elementa

Ob neugodni kombinaciji teh dejavnikov je to že pri temperaturi ca. 250°C, ki je dosežena po 10-15 minutah. Proces se ponavlja in nadaljuje. Do porušitve konstrukcij navadno pride, ko

armatura ni več zaščitena in njena temperatura preseže kritično temperaturo, ki je odvisna od vrste jekla, in navadno ne presega 500°C.



Slika 3: Izguba trdnosti armirano betonske konstrukcije s povišanjem temperature



Slika 4: Po požaru; odpadanje betona tudi do 40 cm globoko.

Požarna odpornost standardiziranih armiranobetonskih konstrukcij

Pri suhih in primerno projektiranih armirano betonskih konstrukcijah ob krajših požarih z manjšo količino goriva navadno res ne pride do porušitve. Veliko konstrukcij je bilo že tolikokrat preskušanih, da bi bilo ponovno preskušanje nesmiselno. Natančno opisane in zbrane so v DIN 4102 del 4. Požarna odpornost je odvisna od:

- oddaljenosti med armaturo in s požarom obremenjene površine,
- dimenzij oz. debeline armirano betonskega elementa,
- površine elementa, ki je obremenjena s požarom,

- samih statičnih obremenitev elementa.

Bauteilart			Mindestdicken d bzw. Mindestbreiten b und zugehörige Achsabstände u in mm für die Feuerwiderstandsklassen							
			F 30-A		F 90-A		F 180-A			
			d bzw. b	u	d bzw. b	u	d bzw. b	u		
Decken	Vollplatte ohne Estrich	stat. best. gelagert	60		100		150			
		stat. unbest. gelagert	80		100		150			
	Vollplatte mit Verbundestrich	Dicke der Platte	50		50		75			
		Gesamtdicke von Platte und Estrich	60 80		100 100		150 150			
	Vollplatte mit schwimmendem Estrich	Dicke der Platte	60		60		80			
		Dicke des Estrichs	80 25		80 25		80 40			
	Achsabstand der Feldbewehrung bei freier Auflagerung crit T = 500°C	einachsrig gespannt		10		35		60		
		zweiachsrig gespannt $1,5 \geq l_y/l_x$		10		15		30		
		vierseitig gelagert $l_y/l_x \geq 3,0$		10		35		60		
	Wände	raumabschließend, nichttragend		80	10	100	10	150	35	
raumabschließend, tragend crit T = 500°C		Ausnutzungsfaktor $\alpha_1 = 0,1$	80	10	100	10	150	35		
		$\alpha_1 = 0,5$	100	10	120	20	180	45		
		$\alpha_1 = 1,0$	120	10	140	25	210	55		
Balken	dreiseitig beflammt einlagig bewehrt crit T $\geq 450^\circ\text{C}$	stat. best. gelagert	80 120 160 ≥ 200	25 15 10 10	150 200 250 ≥ 400	55 45 40 35	240 300 400 ≥ 600	80 70 65 60		
		stat. unbest. gelagert min $l \geq 0,8$ max l	80 ≥ 160	10 10	150 250	35 25	400 ≥ 400	60 50		
		Stützen	mehrseitige Brandbeanspruchung	Ausnutzungsfaktor $\alpha_1 = 0,3$	150	1)	180	1)	240	50
			$\alpha_1 = 0,7$	150	1)	210	1)	320	50	
	$\alpha_1 = 1,0$		150	1)	240	1)	360	50		

Tabela3: Požarne odpornosti standardnih armiranobetonskih konstrukcij po DIN 4102 del 4.

Ščitenje armirano betonskih konstrukcij pred požarom

Tako kot je veliko težav s ščitenjem armiranobetonskih konstrukcij pred vplivi požara, je na voljo tudi veliko rešitev. Če ne pričakujemo velikega požara in je prostor suh (beton nima več kot 1% vlage), je brez dvoma najenostavnejše upoštevati DIN 4102 del 4. Paziti je treba na dimenzije in ščitenje armature. Če je to pravilno izvedeno, do porušitve ne sme priti. Čas trajanja požarne odpornosti je omejen. Seveda tudi v tem primeru lahko uporabimo določene zaščitne ukrepe, ki zmanjšajo stroške sanacij in izpada uporabe objekta.

Težave pa se pojavijo takoj, ko imamo povišano količino vlage v betonu. Najbolj tipičen primer so predori. Ena od možnosti je dodajanje polipropilenskih vlaken v mešanico betona. Navadno zadošča že količina okrog 2 kg za 1m³ betona. Ta vlakna se pod vplivom povišanja temperature stalijo, omogočajo prehod vodne pare in preprečujejo eksplozijsko odpadanje. Vendar pa je po požaru sanacija konstrukcije precej zamudna in draga.

Druga težava se pojavi, ko ugotovimo, da obstoječi objekti nimajo ustrezne požarne odpornosti, pa naj bo to zaradi premajhnih dimenzij ali premajhnih odmikov armature od površine.

Ena od možnosti so dodatni požarni ometi, ki pa so se sčasoma pokazali kot zelo problematični glede oprijema na konstrukcijo. Ta problem je možno reševati z dodatnim sidranjem, kar pa je zelo zamudna rešitev.

Trenutno je najprimernejša rešitev za oba problema oblačenje armirano betonske konstrukcije s ploščami. Najprimernejše so plošče kalcijevega silikata, ki so odporne na temperature do 1350 °C in neobčutljive na vlago.

Ščitenje armirano betonskih konstrukcij s ploščami iz kalcijevega silikata v predorih

Ta način omogoča učinkovito zaščito armirano betonske konstrukcije pred povišano temperaturo in emisijo plinov. Plošče imajo nekatere pozitivne mehanske lastnosti. Elastičnost znaša 420 kN/cm^2 , upogibna trdnost pa je približno 760 N/cm^2 . Ti dve lastnosti omogočata mehansko pritrjevanje v obstoječo konstrukcijo ali pa gradnjo predora ob uporabi plošč Promatect T kot izgubljen opaž. Zagotavljata tudi, da te ne bodo odpadle zaradi posledic vlekov (ti v železniških predorih niso tako majhni), pritiskov in vibracij kot posledice prometa.

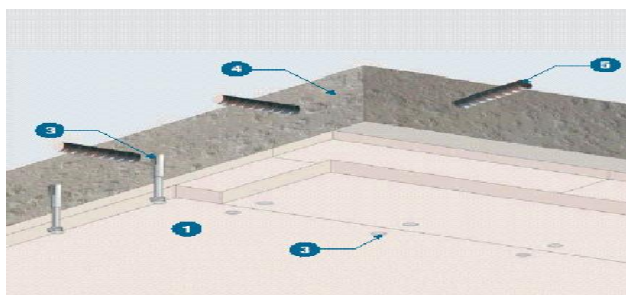
Plošče so odporne tudi na druge kemične vplive, do katerih pride v predorih (agresivni izpušni plini, sol, voda...), saj betonsko konstrukcijo ščitijo pred njimi. Odporne so tudi na povišane temperature (po RABT krivulji na $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ in celo $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ pri preskusih po RWS krivulji).

Preskusi so pokazali, da požar ne bi povzročil konstrukciji nobene škode (simulacija požara po RWS krivulji) pri zaščiti oboka predora s ploščami Promatect T debeline 27 mm . Pri simulaciji požara po RABT krivulji po treh urah zadošča že debelina plošč 20 mm . Ta debelina nam zagotavlja, da temperatura na površini konstrukcije ne preseže $380 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura armature pa ne $250 \text{ }^\circ\text{C}$.

Nekaj plošč bi po požaru res morali zamenjati, vendar pa to ne predstavlja posebnega stroška in izgube časa. Vsekakor so stroški neprimerno manjši, kot pa so bili stroški požara v Eurotunelu. Sama dela in sanacije so znašali $56 \text{ mio. } \text{€}$. Če pa prištejemo še izpad dohodka, presežemo vrednost $256 \text{ mio. } \text{€}$. Popravila so trajala 6 mesecev. Podobna slika je tudi pri drugih velikih predorskih požarih.



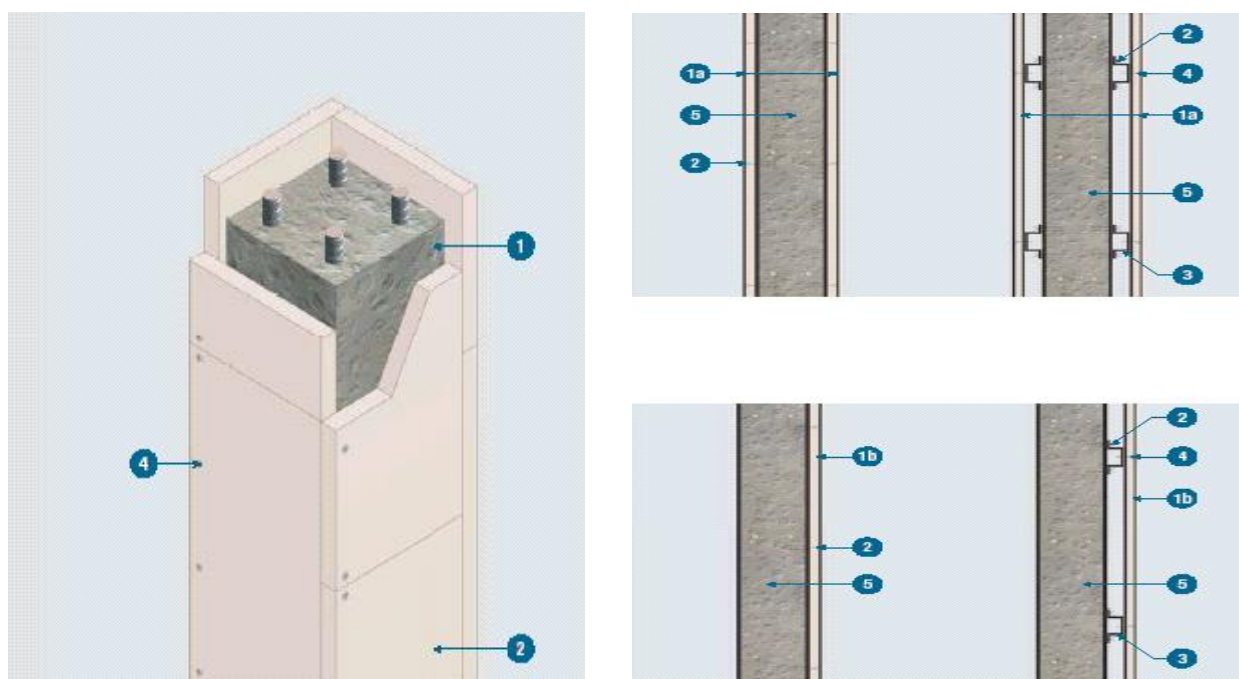
Slika 5: Predor pod Elbo v Hamburgu je eden izmed mnogih, ki so zaščiteni s Promatect T ploščami



Slika 6: Različni načini pritrjevanja plošč Promatecta T v armirano betonsko konstrukcijo

Ščitenje armirano betonskih konstrukcij s ploščami iz kalcijevega silikata v drugih gradbenih konstrukcijah

Načini za izboljšanje požarne odpornosti obstoječe konstrukcije so prav tako različni. Eden izmed najzanesljivejših in dokazano učinkovit je oblačenje obstoječih armirano betonskih konstrukcij s ploščami iz kalcijevega silikat. Glavne prednosti so neobčutljivost na vlago in zelo tanke obloge. Že z 9 mm ploščo je možno izboljšati požarno odpornost armirano betonske konstrukcije iz EI 60 na EI 120. Ker ima vsaka konstrukcija svoje posebnosti, ki vplivajo na požarno odpornost elementa kot celote, je treba upoštevati dosedanje rezultate požarnih preskusov. Če pa je sistem tako specifičen, da bi napačna ocena lahko pripeljala do porušitve sistema prej, kot je predvideno in zahtevano, je treba opraviti nove požarne preskuse in z njimi dokazati požarno odpornost obstoječe ali dodatno zaščitene konstrukcije.



slika 7: načini ščitenja armirano betonskih stebrov ali nosilcev in sten ali plošč.

Požar je zelo kompleksen pojem in tako tudi deluje. Na kratko je skoraj nemogoče opisati vse parametre, na katere je potrebno ob projektiranju konstrukcije z vidika požarne varnosti paziti. Armirano betonske konstrukcij so res negorljive in k požaru res ne prispevajo, vendar pa je njihova nosilnost v požaru povsem drugačna kot pri normalnih temperaturah. Če sem bralcu tega članka vzbudil dvom v neomejeno požarno odpornost armirano betonskih konstrukcij, je ta članek dosegel svoj cilj. Točne ocene in izračune pa raje prepustite strokovnjakom na požarnem področju

Literatura:

Priročnik elementarne fizike, N. I. Koškin , M.G. Širkevič
Baulicher Brandschutz mit Beton, Dipl. ing. Ulrich Neck
Promat bautechnischer Brandschutz in Tunnelbauwerk
ProActive Fire Protection Systems Applications & Technical Manual
Beton Zement 1/02