

OTPORNOST BETONA NA PRODOR VODE POD PRITISKOM – MEHANIZMI PROPDORA VODE, ISPITIVANJA, PRAKTIČNA ISKUSTVA

Uzunov Nikola¹

¹ADING AD Skopje,
Novoselski Pat bb. 1000Skopje, R. Macedonia
e-mail: uzunov@ading.com.mk

SAŽETAK: Tema rada je ispitivanje otpornosti na prodor vode pod pritisak kod različitih tipova betona, sa različitom klasom črstoće, izrađenih primenom različitih tipova aditiva za beton. Za taj cilj, izvršeno je uporedno ispitivanje četiri različitih tipova betona klase čvrstoće C25/30 i C30/37, proizvedenih korišćenjem aditiva iz grupe Plastifikatora ili Suplastifikatora. Dodatno, kod betona klase C25/30 upotrebjeni su i specijalizovani aditivi za vodonepropusnost na bazi sulfata i silana-siloksana. Svi su betoni proizvedeni industrijski na fabrici betona, sa ciljem da se sagleda učinkovitost aditiva u realnim uvjetima. Testiranje je izvršeno u saglasnosti sa evropskim standardima, a testirana je propustljivost betona na prodor vode pod pritiskom *EN 12390-8 Depth of penetration of water under pressure*, kako i prodor kapilarne vlage *EN 480-5 Determination of capillary absorption*. Dodatno, prezentirano je iskustvo od izvođenja betonske lučne brane "Sv. Petka" na teci Treski, u blizini Skopja. Primer ilustrira kako se pravilnom primenom adekvatne tehnologije za proizvodnju, transport i negu betona mogu postići vrhunski rezultati.

KLJUČNE RIJEČI: Vodonepropusni beton, EN 12390-8, Betonska brana, Masivni beton

SUMMARY: Main topic of these article is testing the resistance of concrete with different strength class, produced using different admixtures, to penetration of water under pressure. For these reason, comparative testing is conducted with four different types of concrete with strength class C25/30 and C30/37, produced using different admixtures – Plasticizers and Superplaticizers. Furthermore, for concrete with strength class C25/30, different water-resisting admixtures were used – based on sulfate and silane siloxane. All concretes are produced at industrial batching plant, in order to demonstrate admixtures effect in real conditions. Testing is conducted according to European standards *EN 12390-8 Depth of penetration of water under pressure*, as well as *EN 480-5 Determination of capillary absorption*. Finally, review is given to the construction of the concrete arch dam „Sv.Petka“ build at the Treska river, near Skopje, as a positive example how adequate technology for production, transportation and curing of concrete can provide excellent results.

KEY WORDS: Waterproofed concrete, EN 12390-8, Concrete dam, Massive concrete sections

1 UVOD – MEHANIZMI PRODORA VODE U BETONU I METODE ISPITIVANJA

Po svojoj prirodi, beton je *hidrofilni* materijal i ne može da bude 100% otporan na prodor vode. Struktura cementnog maltera (a time i samog betona) je porozna – u malteru neminovno postoje mikro prsline i pore kroz koje voda može da prodre u beton. Prodiranje vode može da bude posledica hidrostatskog pritiska, ili kapilarnih pojava.

Prodor vode u strukturu betona kako posledica aktivnog hidrostatskog pritiska je slučaj na koji su izloženi hidrotehnički objekti (brane, prelivnici, pristanišni objekti), bazeni i rezervari, temelji i drugi ukopani delovi konstrukcije koji se stalno ili povremeno nalaze ispod nivoa podzemne vode. Otpornost betona na prodor vode pod pritiskom (VDP betona), zavisi prvenstveno od čvrstoće betona i načina njegovog ugrađivanja i nege. Beton visoke čvrstoće, koji je homogen, dobro ugrađen, vibriran i negovan, ima zatvoreniju strukturu i monogo manju mogućnost za prodor vode. Evropski standard *EN 12390-8 Depth of penetration of water under pressure* [1] definiše način ispitivanja nepropusnosti betona na prodor vode pod priskom. Standard predviđa izlaganje betona na konstantni vodeni pritisak od 5,0 Bar, u trajanju od 72 sata (Slika1). Projektantima ostaje da sami odrede koja otpornost na prodiranje vode zadovoljava uslove na određenom projektu – naravno, uzimajući u obzir stepen izloženosti betona u datoj konstrukciji.



Slika1: Ispitivanje otpornosti betona na prodor vode pod pritiskom

Drugi način na koji voda može da uđe u beton je kapilarno upijanje – prenos vode kroz sistem kapilarnih prslina prisutnih u betonu. Da bi došlo do pojave kapilarnog upijanja nije potrebno da postoji značajan hidrostatski pritisak - dovoljno je da beton bude u kontaktu sa vodom ili vlagom. Kapilarna vlaga u betonu često se “penje” i prodire u delove konstrukcije koji nisu direktno u kontakt sa vodom (Slika 2).



Slika 2: Efekt kapilane apsorpcije vode u betonu

Smanjenje mogućnosti za pojavu kapilarne apsorpcije vode u betonu postiže se na način što se proizvede beton visokih performansi, koji je pravilno ugrađen i ima zatvoreniju strukturu. Dodatno, primenom specijalizovanih aditiva za beton (Hidrofob-T) postiže se formiranje vodo-nerastvorljivih kristala koji (delimično) zatvaraju strukturu betona.

Najefikasniji način za sprečavanje kapilarnog upijanja vode u betonu je upotreba aditiva na bazi *silana-siloksana* (Hidrofob-21), koji utiču na površinski napon betona, praveći da betonska površina odbija molekule vode koji ne mogu da prođu u kapilare u betonu. Na taj način postiže se da površina betona postane visoko hidrofobna, odnosno *Vodorepelentna* (Slika 3). Isti materijali (najčešće prilikom sanacija) mogu da se koriste i kao premazi za površinsku impregnaciju betona (*EN1504-2, metoda 1- hidrofobna impregnacija*).



Slika 3: Vodo-repelentna betonska površina

Evropski standardi predviđaju više metoda kako da se utvrdi stepen otpornosti na kapilarnu apsorpciju vode kod betona i drugih građevinskih materijala koji imaju otvorenu strukturu. Prema standardu *EN480-5 Determination of capillary absorption* [2], ispituje se količina apsorbirane vode nakon 7 dana (ispitivanje se vrši na standardni malter, i ispituje se u odnosu na etalon). Uzorci se čuvaju u zatvorenoj komori, postavljeni na rešetku, konstantno potopljeni u vodi visine 2-4mm (Slika 4). Nakon 7 dana meri se masa uzoraka i određuje količina apsorbirane vode. Naša su laboratoriska ispitivanja pokazala smanjenje kapilarne apsorpcije vode kod uzorka maltera sa dodatkom Hidrofob-21 (dozaža 0,7%) za oko 75% u odnosu na etalon (po standardu mora da bude više od 50%). Drugi deo ispitivanja vrši se testiranjem kapilarne apsorpcije na 90 dana star uzorak, tretiran u vodi 28 dana. Naša su laboratoriska ispitivanja pokazala smanjenje kapilarne apsorpcije vode kod uzorka maltera sa dodatkom Hidrofob-21 (dozaža 0,7%) za oko 70% u odnosu na etalon (po standardu mora da bude više od 40%). Ova se ispitivanja vrše se redovno, a rezultati su objavljeni i dostupni u Izveštaju za kontrolno ispitivanje gotovog proizvoda br.KI-08/16 materijala HIDROFOB-21, Ading AD Skopje [6], kao i u Izjavi za svojstva materijala HIDROFOB-21, Ading Ad Skopje [7]).



Slika 4: Ispitivanje otpornosti betona na kapilarnu apsorpciju

Druga metoda za određivanje kapilarne apsorpcije koju smo primenili je *Karsten tubes* metoda. Prema ovoj metodi ispituje se volumen vode koji se apsorbovao - "upio" u neki medium za određeno vreme. Aplikacija vode vrši se preko cevi - *Karsten tube* (Slika 5), koja se fiksira na površinu poroznog materijala. Ovim metodom se ispituju i različiti materijali koji su površinski impregnirani (beton, malter, prirodni kamen, opeka).



Slika 5: Karsten tube metoda

2 EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE OTPORNOSTI BETONA NA PRODOR VODE POD PRITISKOM

Sa ciljem da se utvrdi kako različiti performansi betona i aditivi utiču na otpornost betona na prodiranje vode pod pritiskom (EN 12390-8), sproveli smo uporedno ispitivanje vodo-nepropusnosti na tri klase betona. Beton je proizveden na fabrici betona koristeći standardne recepture za proizvodnju – samo je dodatak za vodonepropusnost bio dodat naknadno u mikser. Korišćen je cement TITAN "Usje" – Skopje, CEM II/A-V 42.5 R. Agregat je krečnjačkog porekla, drobljeni, osim frakcije 0-4mm koja je mešana sa 20% peska rečnog porekla. Betoni su 4-frakciski, sa maksimalnom frakcijom do 32mm. Konzistencija betona je visoke klase S3 i S4. Ispitivanja su izvršena u nezavisnoj akreditovanoj laboratoriji GIM – Skopje [4].

Tablica 1: Uporedno istraživanje otpornosti betona na prodor vode pod pritiskom

Klasa betona	Količina cementa [kg/m ³]	Plastifikaor / Superplastifikator	Aditiv za vodonep.	Konz. Slump	Zapreminska masa betona [kg/m ³]	Čvrsoća betona [MPa]	Prodor vode [mm]
C25/30	360	Fluiding-M	/	S3	2364	43,6	35

C25/30	360	Fluiding-M	Hidrofob-T (1%)	S3	2353	46,8	21
C30/37	390	Superfluid-21M EKO	/	S4	2413	58,2	19

Rezultati pokazuju da na otpornost betona na prodiranje vode pod pritiskom utiču čvrstoća betona, kvalitet ugradnje, zbijenost i homogenost betona. Svi ovi činioci doprinose da struktura betona bude zatvorenija i da smanji procenat mikroprslina kroz koje voda može da prode u beton. Postižu se upotrebom aditiva za beton od grupe Superplastifikatora, koji omogućuju redukciju vode u betonu, veće čvrstoće i kvalitetniju ugradnju betona. Dodatno, upotrebom specijalizovanih aditiva za VDP beton, postiže se zatvaranje pora u betonu i dodatno smanjuje se mogućnost za prodiranje vode (Tablica 1).

Ispitivanja kapilarne apsorpcije *Karsten tubes* metodom obuhvatila je dve klase betona sa različitom čvrstoćom koji su tretirani materijalom za hidrofobnu impregnaciju na bazi Slana-siloksana Hidrofob-21. Ispitivanje se vrši u odnosu na etalon - beton koji nije tretiran materijalom za hidrofobnu impregnaciju. Prvo je testiranje izvršeno na 4-frazciski beton, proizveden u laboratoriji, klase C30/37, $d_{max}=32mm$, proizveden sa $350kg/m^3$ CEM I (Cementara TITAN "Usje" – Skopje). Konzistencija betona je klase S4. Ova klasa betona je izabrana je jer se taj beton najčešće upotrebljava za izvođenje objekta u okruženju gde je visok stupanj izloženosti (Tablica 2).

Tablica 2: Uporedno istraživanje kapilarne absorpcije vode u betonu klase C30/37

Etalon	t (min)	0	10	25	100	160	225	245
	V(ml)	0	0,5	1	2,3	3,1	3,7	4
Beton tertian Hidrofob-21	t (min)	0	36	113	153	240	/	/
	V(ml)	0	1	2	2,3	3	/	/

Drugo testiranje izvršeno je na Beton klase C 0.70 (EN 1766) sa $275kg/m^3$ CEM I i čvrstoćom na pritisak od 25-35MPa. Ova klasa betona je izabrana zbog relativno niske količine cementa (i relativno niskih čvrstoća na pritisak), tako da su ovi betoni više podložni na kapilarnu absorpciju u odnosu na beton klase C30/37 (Tablica 3).

Tablica 3: Uporedno istraživanje kapilarne absorpcije vode u betonu klase C 0,70 (EN 1766)

Etalon	t (min)	0	12	26	42	62
	V(ml)	0	1	2	3	4
Beton tertian Hidrofob-21	t (min)	0	60	120	240	480
	V(ml)	0	0	0	0	0

Velika razlika u efektu površinske impregnacije betona je posledica različitog kvaliteta, odnosno različite otvorenosti strukture i poroznosti materijala za dve klase betona. Slabiji beton klase C 0.7 ima otvoreniju strukturu i u njemu lakše prodire aditiv Hidrofob-21. Zbog toga je i efekat površinske hidrofobne impregnaciji bolji – dobijena je kompletno vodo-repelentna površina betona.

3 ISKUSTVO – TEHNOLOGIJA IZVOĐENJA LUČNE BRANE “SV. PETKA”

Veliki hidrotehnički objekti - pre svega betonske brane, zahtevaju beton koji ima izuzetne performace u pogledu otpornosti na prodor vode. Dodatno, vakvi objekti se po pravilu izvode u masivne betonske kampade gde su od prvenstvenog značaja temperaturni efekti koji se javljaju kao posledica hidratacije cementa.

Jedan takav primer je brana u okviru Hidrosistema “Sv. Petka” na reci Treska, u blizini Skopja. *Sv.Petka* [5] je tanka lučna brana sa dvojnomo zakrivenošću – po horizontalnom i vertikalnom pravcu (Slika 6). Visina brane je 64m, a debljina u osnovi 10m, koja se postepeno umanjuje da bi na kruni brane dostigla 2m širine. Dužina luka u kruni brane je 115m, dok je u osnovi 25m. Na desnom bregu izveden je gravitacioni blok za premoščivanje slabijih zona u stenskom masivu. Po vertikali, brana ja podeljena na 10 lamela, sa 9 vertikalnih radijalnih dilatacija (fuga), koje se injektiraju cementnim materijalom nakon maksimalnog otvaranja (završenog procesa skupjanja betona i hlađenja konstrukcije u zimskom periodu). Injektiranje vertikalnih dilatacija se vrši pomoću dva nezavisna sistema čeličnih cevi i zatvarača. Sama kontaktna površina je nazubljena sa ciljem da se obezbedi bolji kontakt i monolitizacija betonskih blokova. Širina otvorenih radijalnih fuga je 2-4mm, a pritisak u toku injektiranja dostiže do 5Bar. Kroz telo brane prolaze dve čelične cevi – povezane sa dve zahvatne konstrukcije – kojima se voda iz akumulacije uvodi u hidro-elekttranu koja je postavljena neposredno uz nizvodnu stranu brane. Sama akumulacija je dužine 11km, i ukupnog volumena vode $9,1 \times 10^6 \text{ m}^3$.

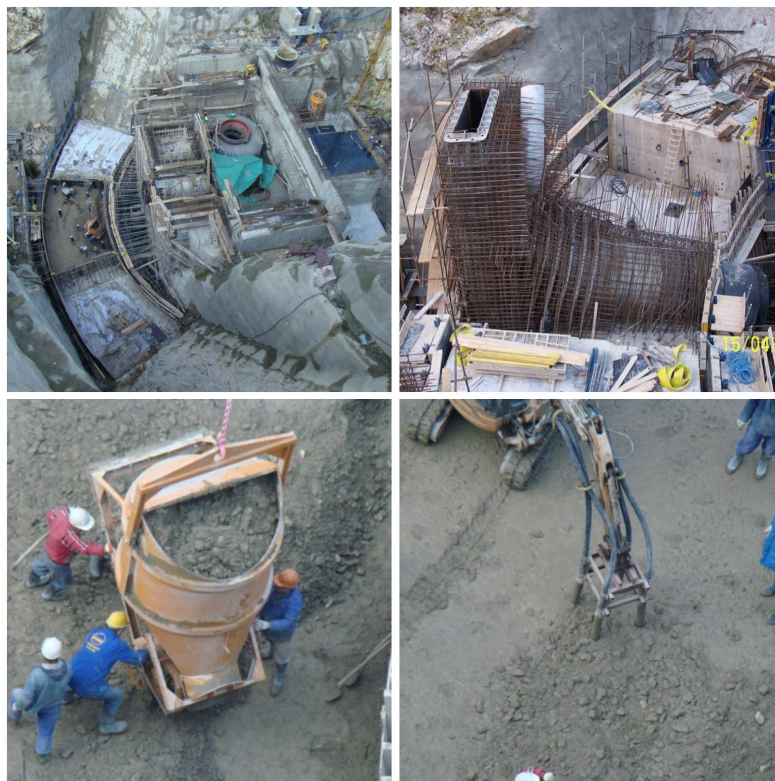


Slika 6: Brana “Sv.Petka”

Tehnologija betona je predviđala je ipunjivanje više uvjeta sa ciljem da se obezbedi monolitnost i vodonepropusnost konstrukcije. Sam je beton dizajniran da bude 6-frakciski, sa maksimalnom granulacijom agregata do 100mm. Sa ciljem da se što više umanjii oslobođena hidrataciona toplota, korišćen je specijalno proizveden nisko-kalorični cement TITAN “Usje” Np35p 35 – količina maksimalno 280 kg/m^3 . Zahtevana marka betona je bila MB30, ali je tražena i čvrstoća na savijanje od 4-4,5MPa (da bi se samnjila mogućnost pojave pukotina u betonu), zbog čega je proizvedeni beton imao približno $W/C=0,465$ i čvrstoće na pritisak mnogo veće od zahtevanih (iznad 50MPa). Zbog krupnoće adregata (100mm), čvrstoće betona su ispitivane na uzorcima dimenzija 300x300x300mm i grede 300x300x900mm. Proizvedeni beton je u potpunosti ispunio i zahtevane performace u pogledu vodonepropusnosti V-8 i otpornost na mraz M-100.

Konzistencij betona bila je S1, a transport i ugrađivanje vršeni su kiblama. Vibriranje ja vršeno paketom od 4 “boca” – pervibratora. Tehnologija ugrađivanja betona u telo brane predviđala je betoniranje u blokovima

visine 2m, u slojevima debljine ~50cm (Slika 7). Svaki je novi sloj morao da bude ugrađen na predhodni sloj kd kog još nije počelo vezivanje cementa (u roku od 2-3 sata) tako da su dva sloja mogli da budu zajedno revibrirani i homogenizirani.



Slika 7: Brana "Sv.Patka", Ugradnja betona

Da bi mogao da se proizvede i pravilno ugradi beton traženih performansi korišćen je SUPERFLUID-M1 (proizvodnja ADING AD Skopje) - Aditiv Superplastifikator-Retarder vezivanja betona, u saglasnosti sa EN 934-2 T11.1 i T11.2, proizveden na bazi naftalin-lignosulfonata. Dozaža aditiva je iznosila od 1,2-1,6% u odnosu na masu cementa u zavisnosti od pozicije i ambientalnih uvjeta (temperature). Temperatura betona je bila ogrničena na +40°C i praćena je u toku vezivanja betona preko ugrađene opreme za monitoring gradnje i eksploatacije.

Veza između horizontalnih blokova ostvorena je direktnom ugradnjom starog na novi beton, pri čemu površina starog betona-bloka je obrađivana u roku od 5-6 sati nakon ugradnje pranjem cementnog mleka vodom pod pritisak dok se ne izloži krupni agregat. Pre ugrađivanja novog betonskog bloka, podloga se još jednom pere vodom, pri čemu se i stari beton način "zasiti" vodom i obespraši. Na kontaktu, kao prvi sloj novog betona predvedeno je ugrađivanje sitnozrnog betona (Slika 8).



Slika 8: Brana "Sv.Patka", Veza između horizontalnih i vertikalnih betonskih blokova

Glavni izvođač hidrosistema "Sv.Petka" je kompanija RIKO Inženjering, Slovenija, podizvođač za konstrukciju brane je kompanija GRANIT Skopje, podizvođač za mašinska postrojenja je BETON Skopje, dok je injektiranje izvršio Građevinski Institut MAKEDONIJA, Skopje. Korišćeni aditivi za beton su iz proizvodnog programa kompanije ADING AD Skopje.

4 ZAKLJUČAK: ADEKVATNA TEHNOLOGIJA PROIZVODNJE I UGRAĐIVANJA BETONA - KLJUČNI FAKTOR VISOKE OTPORNOSTI NA PRODOR VODE

Sva izvršena ispitivanja, kao i praktična iskustva ukazuju da je kvalitet betona ključni factor za obezbeđivanje visoke otpornosti betona na prodor vode. Beton visoke klase čvrstoće, koji je kvalitetno ugrađen i negovan ima zatvoreniju strukturu i visoku otpornost na prodiranje vode. Dodatno, upotrebom specijalizovanih aditiva za vodonepropusnost betona može da se postigne dodatno smanjenje propustljivosti betona na prodor vode pod pritiskom i kapilarne absorpcije. Kod već izvedenih betonskih konstrukcija, sa ciljem da se smanji-spreči kapilarna absorpcija vode, može da se primeni hidrofobna impregnacija materijalom na bazi Silana-Siloksana koji obezbeđuje vodorepelentnost površine betona.

LITERATURA

- [1] Evropski standard *EN 12390-8 Depth of penetration of water under pressure*
- [2] Evropski standard *EN480-5 Determination of capillary absorbtion*
- [3] Uzunov, N. Jancev, D: *Trajnost betona izloženog na dejstvo vode,atmosferskih uticaja i hemisku koroziju*, Simpozium DGKS, Zlatibor, R.Srbija, Septembar 2016
- [4] Gradežen Institut Makedonija – Skopje, Izveštaj za ispitivanje Br. ABK-06/15/370 – 1/2/3 Juni 2015
- [5] Slavevski, M. *Izgradba na branata "SV.Petka"*, 16 Megunaroden Simpozium DGKM Ohrid, R,Makedonija, Oktobar 2015
- [6] Izveštaju za kontrolno ispitivanje gotovog proizvoda br.KI-08/16 materijala HIDROFOB-21, Ading AD Skopje
- [7] Izjava svojstva materijala HIDROFOB-21, Ading Ad Skopje