

Gradbeni vestnik • GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN

TEHNIKOV SLOVENIJE in MATIČNE SEKCIJE GRADBENIH

INŽENIRJEV PRI INŽENIRSKI ZBORNICI SLOVENIJE

UDK-JDC 05 : 625; ISSN 0017-2774

Ljubljana, februar 2004, letnik 53, str. 17-44

Izdajatelj:

Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS), Karlovska 3, 1000 Ljubljana, telefon/faks 01 422 4622 v sodelovanju z **Matično sekcijo gradbenih inženirjev pri Inženirski zbornici Slovenije (MSG IZS)**, ob podpori **Ministrstva RS za šolstvo, znanost in šport, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani in Zavoda za gradbeništvo Slovenije**

Izdajateljski svet:

ZDGITS: **mag. Andrej Kerin**

izr. prof. dr. **Matjaž Mikoš**

Jakob Presečnik

MSG IZS: **Gorazd Humar**

mag. Črtomir Remec

doc. dr. Branko Zadnik

FGG Ljubljana: **doc. dr. Marijan Žura**

FG Maribor: **Milan Kuhta**

ZAG: **prof. dr. Miha Tomaževič**

Glavni in odgovorni urednik:

prof. dr. Janez Duhovnik

Sodelavec pri MSG IZS:

Jan Kristjan Juteršek

Lektorica:

Alenka Raič Blažič

Lektorica angleških povzetkov:

Darja Okorn

Tajnica:

Anka Holobar

Oblikovalska zasnova:

Mateja Goršič

Tehnično urejanje, prelom in tisk:

Kočevski tisk

Naklada:

2750 izvodov

Podatki o objavah v reviji so navedeni v bibliografskih bazah COBISS in ICONDA (The Int. Construction Database) ter na <http://www.zveza-dgits.si>.

Letno izide 12 števk. Letna naročnina za individualne naročnike znaša 5500 SIT; za študente in upokojene 2200 SIT; za družbe, ustanove in samostojne podjetnike 40.687,50 SIT za en izvod revije; za naročnike iz tujine 100 USD. V ceni je vštete DDV.

Poslovni račun ZDGITS pri NLB Ljubljana:
02017-0015398955

Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

- Uredništvo sprejema v objavo znanstvene in strokovne članke s področja gradbeništva in druge prispevke, pomembne in zanimive za gradbeno stroko.
- Znanstvene in strokovne članke pred objavo pregleda najmanj en anonimen recenzent, ki ga določi glavni in odgovorni urednik.
- Besedilo prispevkov mora biti napisano v slovenščini.
- Besedilo mora biti izpisano z znaki velikosti 12 pik z dvojnimi presledkom med vrsticami.
- Prispevki morajo imeti naslov, imena in priimke avtorjev ter besedilo prispevka.
- Besedilo člankov mora obvezno imeti: naslov članka v slovenščini (velike črke); naslov članka v angleščini (velike črke); oznako ali je članek strokoven ali znanstven; nazive, imena in priimke avtorjev ter njihove naslove; naslov POVZETEK in povzetek v slovenščini; naslov SUMMARY, in povzetek v angleščini; naslov UVOD in besedilo uvoda; naslov naslednjega poglavja (velike črke) in besedilo poglavja; naslov razdelka in besedilo razdelka (neobvezno); ..., naslov SKLEP in besedilo sklepa; naslov ZAHVALA in besedilo zahvale (neobvezno); naslov LITERATURA in seznam literature; naslov DODATEK in besedilo dodatka (neobvezno). Če je dodatkov več, so dodatki označeni še z A, B, C, itn.
- Poglavja in razdelki so lahko oštevilčeni.
- Slike, preglednice in fotografije morajo biti omenjene v besedilu prispevka, oštevilčene in opremljene s podnapisi, ki pojasnjujejo njihovo vsebino. Vse slike in fotografije v elektronski obliki (slike v običajnih vektorskih grafičnih formatih, fotografije v formatih .tif ali .jpg visoke ločljivosti) morajo biti v posebnih datotekah, običajne fotografije pa priložene.
- Enačbe morajo biti na desnem robu označene z zaporedno številko v okroglem oklepaju.
- Kot decimalno ločilo je treba uporabiti vejico.
- Uporabljena in citirana dela morajo biti navedena med besedilom prispevka z oznako v obliki: (priimek prvega avtorja, leto objave). V istem letu objavljena dela istega avtorja morajo biti označena še z oznakami a, b, c, itn.
- V poglavju LITERATURA so uporabljena in citirana dela opisana z naslednjimi podatki: priimek, ime prvega avtorja (lahko okrajšano), priimki in imena drugih avtorjev, naslov dela, način objave, leto objave.
- Način objave je opisan s podatki: knjige: založba; revije: ime revije, založba, letnik, številka, strani od do; zborniki: naziv sestanka, organizator, kraj in datum sestanka, strani od do; raziskovalna poročila: vrsta poročila, naročnik, oznaka pogodbe; za druge vrste virov: kratek opis, npr. v zasebnem pogovoru.
- Prispevke je treba poslati glavnemu in odgovornemu uredniku prof. dr. Janezu Duhovniku na naslov: FGG, Jamova 2, 1000 LJUBLJANA oz. janez.duhovnik@fgg.uni-lj.si. V spremnem dopisu mora avtor članka napisati, kakšna je po njegovem mnenju vsebina članka (pretežno znanstvena, pretežno strokovna) oziroma za katero rubriko je po njegovem mnenju prispevek primeren. Prispevke je treba poslati v enem izvodu na papirju in v elektronski obliki v formatu MS WORD in v 8. točki določenih grafičnih formatih.

Uredništvo

Vsebina • Contents

Članki • Papers

stran **18**

mag. Tanja Mahne, univ. dipl. inž. grad.

GRADNJA CILINDRIČNH OBJEKTOV CENTRALNE ČISTILNE NAPRAVE LJUBLJANA

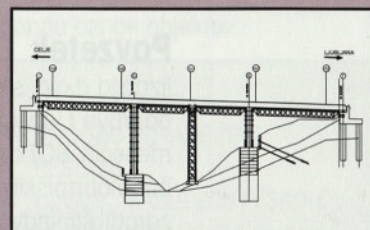
CONSTRUCTION OF CYLINDRICAL STRUCTURES AT THE LJUBLJANA CENTRAL TREATMENT FACILITY



stran **29**

Aleš Perhavec, univ. dipl. inž. grad.

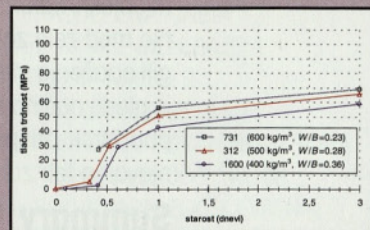
GRADNJA VIADUKTA VRANKE NA AVTOCESTI MARIBOR – KOPER CONSTRUCTION OF VRANKE BRIDGE ON MARIBOR – KOPER HIGHWAY



stran **37**

dr. Drago Saje, univ. dipl. inž. grad.

ČASOVNI RAZVOJ TLAČNE TRDNOSTI BETONOV Z VISOKO TRDNOSTJO V ODVISNOSTI OD VRSTE IN KOLIČINE VEZIVA TIME DEVELOPMENT OF COMPRESSIVE STRENGTH OF HIGH STRENGTH CONCRETE IN DEPENDENCE OF BINDER TYPE AND QUANTITY



stran **44**

ZDGITS – izdajateljica GRADBENEGA VESTNIKA
VABILO ZA OBJAVO OGLASOV

Novi diplomanti gradbeništva

stran **44**

J. K. Juteršek, univ. dipl. inž. grad.

Koledar prireditev

J. K. Juteršek, univ. dipl. inž. grad.

Slika na naslovnici: Gradnja objektov CČN Ljubljana – poseg v širši prostor Zaloga, foto Oskar Dolenc, SCT

GRADNJA CILINDRIČNH OBJEKTOV CENTRALNE ČISTILNE NAPRAVE LJUBLJANA

CONSTRUCTION OF CYLINDRICAL STRUCTURES AT THE LJUBLJANA CENTRAL TREATMENT FACILITY

mag. Tanja Mahne, univ. dipl. inž. grad.

SCT d.d., Tehnični sektor, Slovenčeva 22, Ljubljana
tanja.mahne@sct.si

Strokovni članek UDK 628.32:69.05

Povzetek | Mednarodni konzorcij štirih partnerjev in javno podjetje Vodovod-Kanalizacija d.o.o. sta aprila 2002 podpisala pogodbo za izvedbo II. faze centralne čistilne naprave Ljubljana. Konzorcij se je obvezal, da bo pogodbeni obseg del izvedel v 36 mesecih. SCT d.d. je edini slovenski predstavnik konzorcija. Zadolžen je za izvedbo gradbeno-obrtniških del ter manjši del strojnih in elektro inštalacij. V okviru pogodbe bo zgradil štiriindvajset in obnovil štiri obstoječe objekte. Objekti se med seboj razlikujejo po namembnosti, velikosti in obliki, kar v veliki meri vpliva na tehnologijo gradnje. Cilindrični objekti, katerih gradnja je predstavljena v članku, spadajo s stališča tehnologije gradnje med zelo zahtevne objekte. Vpliv cilindrične oblike se je najbolj pokazal pri tehnologiji opaženja sten, pri kateri je bilo treba poleg oblike upoštevati tudi projektantske pogoje glede načina in zaporedja gradnje. Poleg opisa uporabljene tehnologije opaževanja je poudarek prispevka tudi na zahtevah glede kakovosti gradnje in dokazovanju izpolnjevanja teh zahtev.

Summary | An international consortium of four partners and the public company Vodovod - Kanalizacija d.o.o. signed a contract in April 2002 for the execution of the phase II of the Ljubljana central treatment facility. The consortium undertook to execute the contracted work in 36 months. SCT d.d. is the sole Slovenian representative in the consortium. It is responsible for the execution of construction-tradesman works and a small part of machinery and electrical installations. Under the contract, it will build twenty-four new and renovate four existing structures. Structures have different purposes, sizes and forms, what, to a large extent, influences the technology of construction. In terms of construction technology, the construction of the cylindrical structures described in the paper is very demanding. The influence of the cylindrical shape was most marked in formwork for walls, where the project-planning conditions regarding the manner and order of construction in addition to the shape itself should be taken into account. Besides the description of the technology used for formwork, the paper also emphasises construction quality requirements and demonstration of their implementation.

1 • UVOD

Izgradnja centralne čistilne naprave Ljubljana poteka v več fazah. I. faza, ki obsega primarno oz. mehansko čiščenje

odpadnih voda, je bila zgrajena in predana v uporabo 1991. leta. Aprila 2002 je bila podpisana pogodba za iz-

gradnjo II. faze. Izvajalec omenjene faze je mednarodni konzorcij, ki ga sestavljajo AQUA Engineering GmbH, SCT d.d. Ljubljana, ABB A. G. in Andritz A. G. II. faza CČN predstavlja z biološko stopnjo in obdelavo blata ter bioplina kot stran-

skima produktoma čiščenja odpadne vode nadgradnjo I. faze. Rok za izgradnjo II. faze, ki obsega izgradnjo štiriindvajsetih objektov, je tri leta. Po uspešno opravljenem tehničnem pregledu, ki bo spomladi 2005, sledi še enoletno poskusno obratovanje.

Izgradnja II. faze CČN Ljubljana je zaradi obsega, tehnološke raznolikosti objektov, velikih količin poglavitnih materialov, nehomogenih tal ter ne nazadnje sodelovanja štirih različnih partnerjev zelo zahteven projekt. Z gradbenega stališča so najbolj zahtevni deli CČN cilindrični objekti (slika 1).



Slika 1 • Cilindrični objekti CČN Ljubljana

2 • OBSEG CČN LJUBLJANA

Podjetje SCT d.d. bo po pogodbi za izgradnjo II. faze CČN Ljubljana izvedlo gradbeno obrtniška dela na vseh novozgrajenih objektih (slika 2). Ti se med seboj ločijo po geometriji, velikosti, namembnosti in ne nazadnje tudi tehnologiji gradnje. Načrte gradbenih konstrukcij projekta PZI s spremembami je izdelalo podjetje SPIT d.o.o. iz Nove

Gorice. Odgovorni projektant za načrt gradbenih konstrukcij je mag. Miran Lozej.

Namembnost objektov definirajo tehnološki procesi čistilne naprave, ki prek tega vplivajo na konstrukcijsko zasnovo objektov in posledično tudi na tehnologijo gradnje. Objekti od 01 do 04 so namenjeni mehanskemu čišče-

Legenda oznak objektov:

- 01 LOVILEC KAMENJA
- 02 VHODNO ČRPALIŠČE
- 03 REŠETKE
- 04 LOVILEC MAŠČOB IN PESKOLOV
- 07 VEZNA KINETA 1
- 08 RAZDELILNA KINETA 1
- 11 RAZDELILNA KINETA 2
- 12 ODZRAČEVALNI BAZENI
- 13 VEZNA KINETA 2
- 14 NAKNADNI USEDALNIKI
- 15 ČRPALIŠČE POVRATNEGA BLATA
- 17 PRIMARNI ZGOŠČEVALNIK
- 18 SEKUNDARNI ZGOŠČEVALNIK
- 19 OBJEKT ZA SPREJEM VSEBINE SEPTIČNIH JAM
- 20 GNILIŠČE
- 21 STROJNO ODVODNJAVANJE IN SUŠENJE BLATA
- 22 STROJNICA, KOTLOVNICA IN ENERGETSKA POSTAJA
- 23 STOLP GNILIŠČ
- 25 PLINOHRAJ
- 26 PLINSKA BAKLJA
- 27 BIOFILTER 1
- 34 TRAFI POSTAJA 2
- 41 MERILNIK PRETOKA
- 42 PRIKLJUČNI JAŠEK NAKNADNIH USEDALNIKOV
- 43 JUŽNI IZTOČNI JAŠEK NAKNADNIH USEDALNIKOV
- 45 JAŠEK IZLOČEVALCA KONDENZA
- 46 ČISTILNI JAŠEK ODVEČNEGA BLATA
- 47 JAŠEK MERILCA PRETOKA POVRATNEGA BLATA



Slika 2 • Razpored objektov CČN Ljubljana

nju odpadnih voda. Zaradi razvoja tehnologije mehanskega čiščenja je treba te objekte v okviru II. faze tehnološko in gradbeno obnoviti. Biološkemu čiščenju vode so namenjeni objekti na desni polovici slike 2, obdelavi blata kot stranskemu produktu te faze pa objekti na levi polovici slike 2.

S stališča načina gradnje se novozgrajeni objekti delijo na monolitne in montažne armiranobetonske objekte. Slednja sta le dva, in sicer objekt strojnega odvodnjavanja in sušenja blata (objekt 21) ter objekt s strojnico, kotlovnico in

energetsko postajo (objekt 22). Vsi ostali objekti bodo zgrajeni kot monolitni armiranobetonski objekti različnih geometrijskih oblik, kar tudi vpliva na tehnologijo gradnje. Večina objektov ima pravokotno obliko, objektov s cilindrično obliko je dobra petina. Ti objekti so:

- objekt 17: primarni zgoščevalnik blata,
- objekt 18: sekundarni zgoščevalnik blata,
- objekt 20: gnilišče.

V okviru II. faze smo zgradili po dva objekta primarnega zgoščevalnika blata in

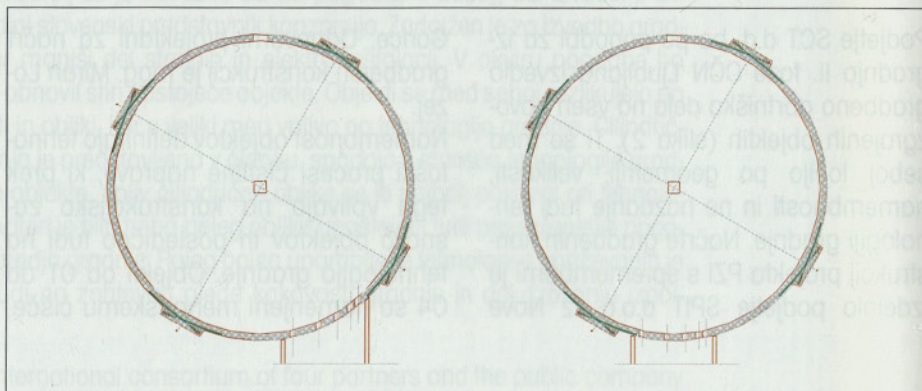
gnilišča. Podvajanje navedenih objektov je posledica načrtovane širitve CČN Ljubljana v prihodnosti. Taka zasnova pozitivno vpliva na ekonomiko gradnje cilindričnih objektov, saj je možno tehnologijo opaževanja večkrat uporabiti na istem projektu.

Kljub dokaj majhnemu deležu cilindričnih objektov se je bilo treba zaradi specifičnosti zasnove v tehnologijo gradnje te vrste objektov zelo poglobiti. Temu so botrovale tudi zelo stroge zahteve glede kakovosti gradnje ter pomanjkanje lastne tehnologije opaževanja.

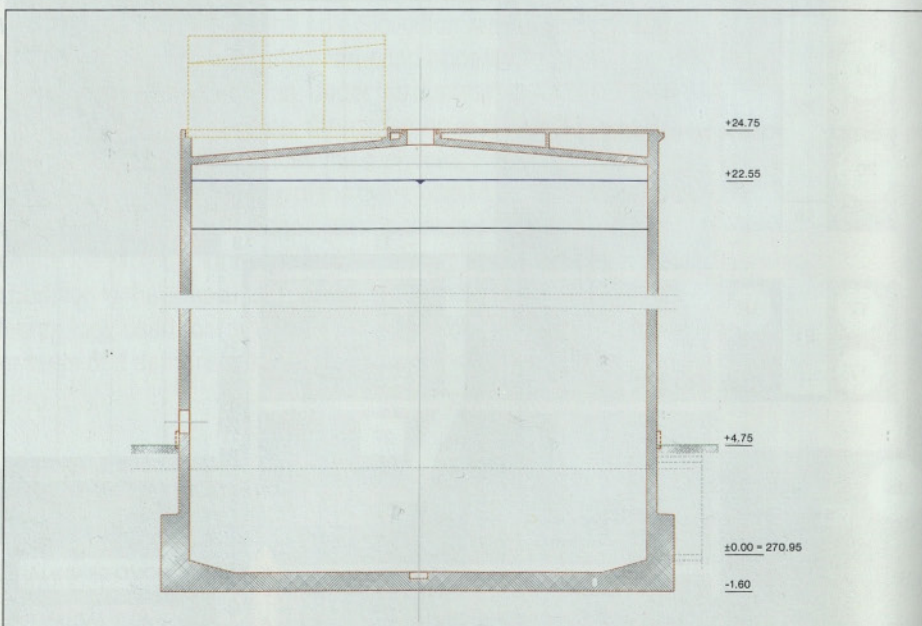
3 • KARAKTERISTIKE CILINDRIČNIH OBJEKTOV

Cilindrični objekti so zasnovani kot zaprte cilindrične lupine. Skupaj z ostalimi objekti zahodne polovice kompleksa CČN so namenjeni obdelavi blata. Zunanji premer zgoščevalnikov (17, 18) je konstanten po celi višini objekta. Obe gnilišči (20) sta v primerjavi z zgoščevalniki bistveno višji, zato je stabilnost AB konstrukcije teh objektov zagotovljena z ojačitvijo spodnjega dela cilindrične stene. Premer objektov 17 in 18 znaša 16,70 m, premer objekta 20 pa 22,40 m oziroma 20,90 m (sliki 3 in 4). Vsi cilindrični objekti so temeljeni na AB plošči in pokriti s streho. Temeljna plošča zgoščevalnikov (slika 5) je dvojna. Spodnja talna plošča je tako kot pri gnilišču (20) ravna, zgornja pa zaradi tehnološke opreme oblikovana lijakasto (slika 6).

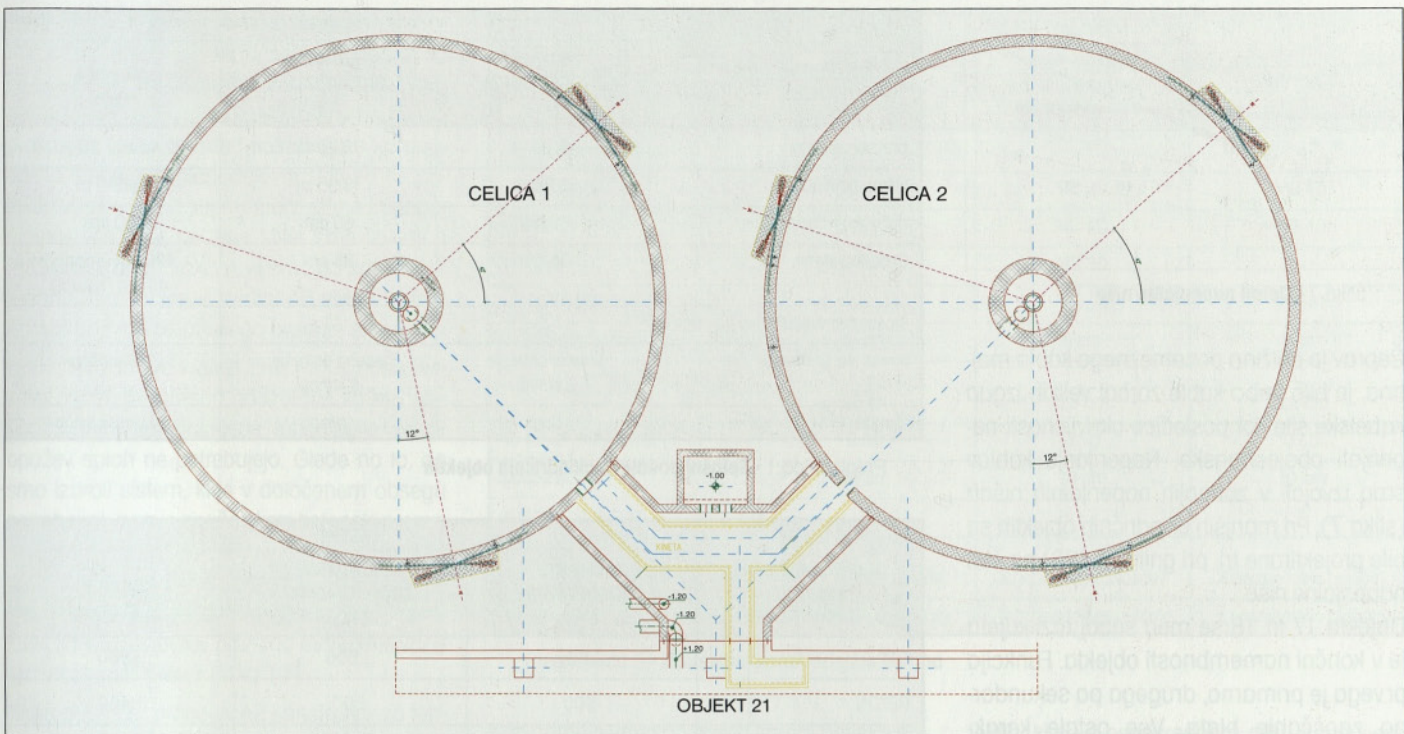
Poleg oblike je skupna značilnost cilindričnih objektov tudi vodoravno prednapenjanje sten. Uporabljen je bil sistem BBR Cona Compact, tj. sistem hkratnega napenjanja večjega števila vrvi v enem kablju. Za napetje cilindrične stene objektov 17 in 18 sta bila uporabljena dva tipa kablov, in sicer kabli s sedmimi oziroma štirimi vrvmi premera 0,6". Napenjanje objekta gnilišča pa se je izvajalo z enotnim tipom kablov, in sicer 7 ϕ 0,6". Kable smo vgradili v zaščitne cevi in jih napeli šele potem, ko je beton dosegel tlačno trdnost MB 30. Vrsten red napenjanja kablov smo izbrali tako, da smo zagotovili enakomeren vnos sile v cilindrično steno.



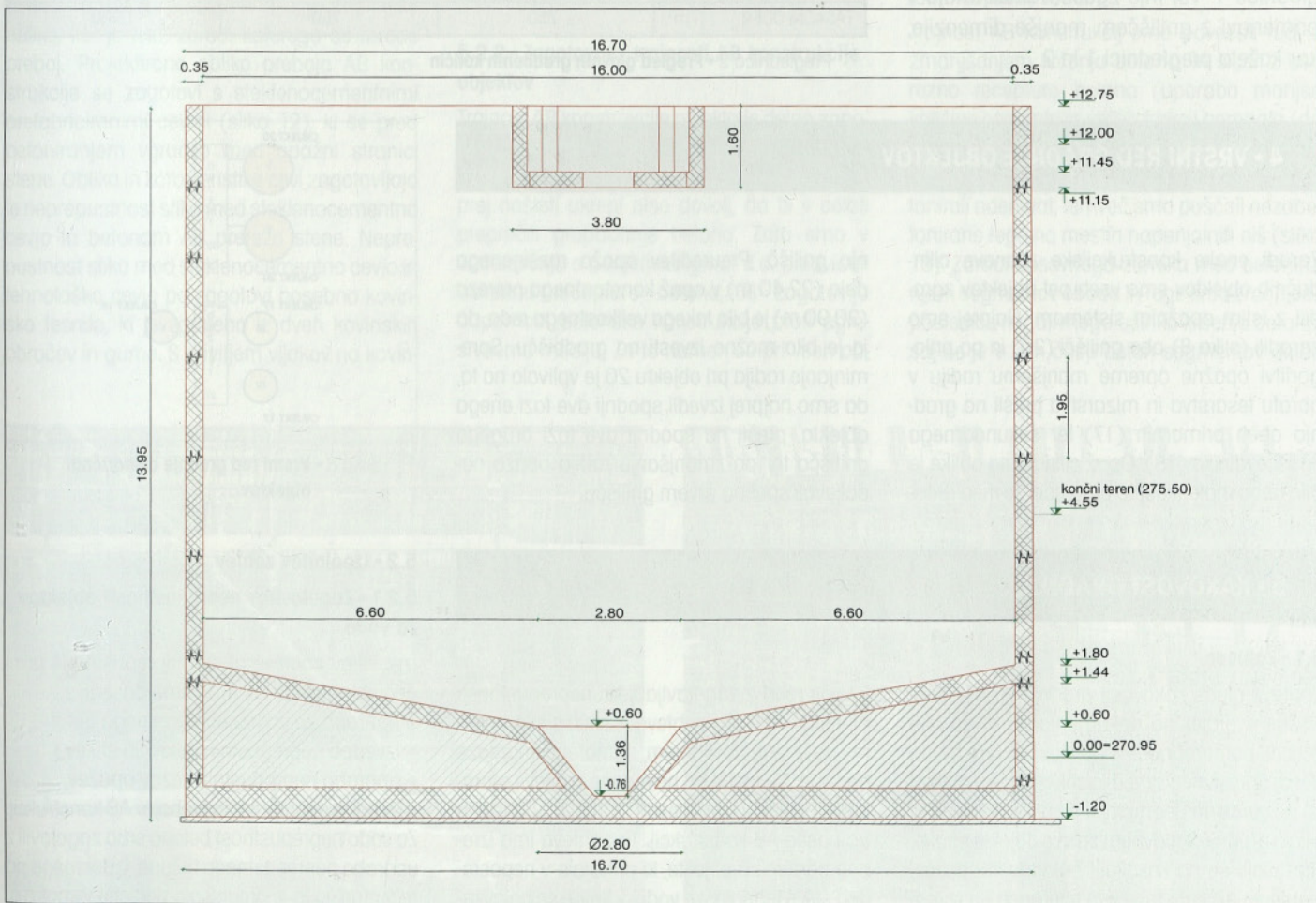
Slika 3 • Tloris obeh objektov gnilišča (objekt 20)



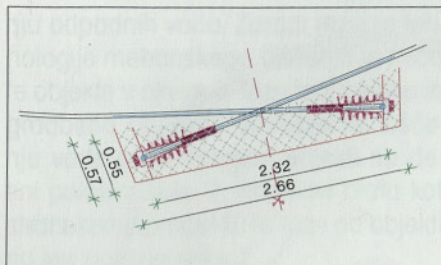
Slika 4 • Prerez gnilišča (objekt 20)



Slika 5 • Tloris primarnih zgoščevalnikov (objekt 17)



Slika 6 • Prezrez primarnega (objekt 17) oz. sekundarnega zgoščevalnika (objekt 18)



Slika 7 • Detalj napenjalne niše

Čeprav je dolžina posameznega kabla majhna, je bilo treba kable zaradi velikih izgub kabske sile kot posledice ukrivljenosti napenjati obojestransko. Napenjanje kablov smo izvajali v zunanjih napenjalnih nišah (slika 7). Pri manjših cilindričnih objektih so bile projektirane tri, pri gniliščih (20) pa štiri napenjalne niše.

Objekta 17 in 18 se med seboj razlikujeta le v končni namembnosti objekta. Funkcija prvega je primarno, drugega pa sekundarno zgoščanje blata. Vse ostale karakteristike so enake, kar je razvidno iz preglednice 1. Vsi trije zgoščevalniki imajo v primerjavi z gniliščem manjše dimenzije, kar kažeta preglednici 1 in 2.

SPLOŠNI PODATKI	OBJEKT		
	PRIMARNI ZGOŠČEVALNIK (17)	SEKUNDARNI ZGOŠČEVALNIK (18)	GNILIŠČE (20)
premer objekta	16,70 m	16,70 m	22,40 m / 20,90 m
višina objekta	13,95 m	13,95 m	24,75 m
debelina talne plošče	60 cm	60 cm	80 cm
debelina stene	35 cm	35 cm	120 cm (spodaj) 45 cm (zgoraj)
število napenjalnih niš po obodu	3	3	4
konstrukcija strehe	leseno ostrešje s kritino	leseno ostrešje s kritino	AB plošča
fasada	brez	brez	ALU ploščevina

Preglednica 1 • Splošni podatki o cilindričnih objektih

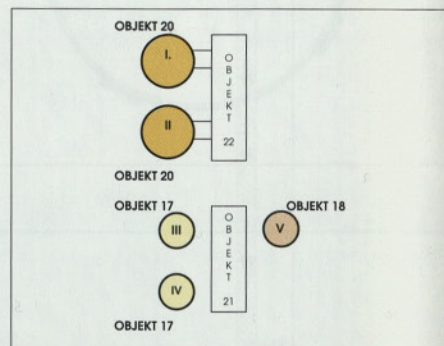
GLAVNE GRADBENE KOLIČINE		OBJEKT		
		PRIMARNI ZGOŠČEVALNIK (17)	SEKUNDARNI ZGOŠČEVALNIK (18)	GNILIŠČE (20)
OPAŽ	m ²	1.600	1.600	3.850
BETON	m ³	500	500	1.400
ARMATURA	kg	79.000	78.000	218.900
KABLI	kg	5.100	5.100	21.000
FASADNI ODER	m ²	750	750	1.900

Preglednica 2 • Pregled glavnih gradbenih količin

4 • VRSTNI RED GRADNJE OBJEKTOV

Zaradi enake konstrukcijske zasnove cilindričnih objektov smo vseh pet objektov zgradili iz istim opaznim sistemom. Najprej smo zgradili (slika 8) obe gnilišči (20) in po prilagoditvi opazne opreme manjšemu radiju v obratu tesarstva in mizarstva prešli na gradnjo obeh primarnih (17) ter sekundarnega zgoščevalnika (18). Opaž cilindrične oblike je bilo treba malenkostno preurediti že med grad-

njo gnilišč. Preureditev opaža razširjenega dela (22,40 m) v opaž konstantnega prereza (20,90 m) je bila takega velikostnega reda, da jo je bilo možno izvesti na gradbišču. Spreminjanje radija pri objektu 20 je vplivalo na to, da smo najprej izvedli spodnji dve fazi enega objekta, prešli na spodnji dve fazi drugega gnilišča ter po zmanjšanju radija opaža nadaljevali spet na prvem gnilišču.



Slika 8 • Vrstni red gradnje cilindričnih objektov

5 • KAKOVOST GRADNJE

5.1 • Zahteve

Zahteve glede kakovosti gradnje so bile definirane s projektno dokumentacijo in so bile zaradi pomembnosti objektov ter za beton dokaj agresivnega medija zelo stroge. Zahteve so ne glede na geometrijsko obliko objektov in način gradnje v glavnem za vse objekte enake. Nanašajo se na kakovost betonov in opažev, tesnjenje AB konstrukcij in toleranco pri izvedbi gradbenih del. Prvi dve zahtevi sta povezani

v večji meri z zagotavljanjem neprepustnosti objektov za vodo, zahteva v zvezi s toleranca mi pa z zagotavljanjem nemotene montaže opreme. Ne glede na navedene zahteve morajo vsi objekti izpolnjevati zahtevo v zvezi s trajnostjo AB konstrukcij. Ta zahteva ima izreden pomen za objekte, ki prihajajo v neposreden stik s tehnološko vodo, v kateri se pojavlja jo za beton agresivne kemijske spojine.

5.2 • Izpolnitev zahtev

5.2.1 • Zagotovitev neprepustnosti objektov za vodo

Izpolnitev zahteve glede neprepustnosti cilindričnih objektov za vodo smo dosegli z:

- uporabo za vodo neprepustnega betona,
- izvedbo neprepustnih delovnih stikov,
- uporabo nepropustnih vezav opažev,
- izvedbo neprepustnih prebojev AB konstrukcij.

Za vodo neprepustnost betona smo zagotovili z uporabo neprepustnega betona, izdelanega po recepturi, ki jo je predpisalo podjetje Igmat d.d. iz Ljubljane.

Delovni stik je vsak stik, ki se pojavi med dveh fazama betoniranja in je lahko vodoraven ali navpičen. Pri objekih cilindrične oblike so se vodoravni stiki (slika 9) pojavljali med talno ploščo in steno ter med sosednjima kampa-dama stene. Navpični delovni stiki so se pojavili na stiku med segmentom stene in nape-njalno nišo. Vse delovne stike smo izvedli s PVC profiliranim trakom, ki smo ga zaradi po-zicioniranja kablov v sredini AB stene locirali na notranji rob betonskega prereza stene.

Izpolnitev zahteve v zvezi z neprepustnostjo ve-zave opaža je odvisna od izbrane tehnologije opaževanja, saj določene tehnologije vezav opažev sploh ne potrebujejo. Glede na to, da smo izbrali sistem, ki je v določenem obsegu potreboval vezavo opaža skozi betonski prerez, smo ga morali izvesti neprepustno. Za to smo uporabili že uveljavljen sistem z navarjeno je-kleno ploščico na sredini veznega vijaka, katere funkcija je zaustavitev prehoda morebitne vode skozi betonski prerez (slika 10).

Neprepustnost prebojev AB konstrukcij za teh-nološke cevi smo zagotovili z uporabo v svetu uveljavljenega sistema DOYMA (slika 11). Ta temelji na izvedbi preboja enake geometrijske oblike, kot je telo, zaradi katerega se izvede preboj. Projektirano obliko preboja AB kon-strukcije se zagotovi s steklenocementnimi prefabriciranimi cevmi (slika 12), ki se pred betoniranjem vgradijo med opažni stranici stene. Oblika in karakteristike cevi zagotavljajo le neprepustnost stika med steklenocementno cevjo in betonom AB prereza stene. Nepre-pustnost stika med steklenocementno cevjo in tehnološko cevjo pa zagotovi posebno kovin-sko tesnilo, ki je zgrajeno iz dveh kovinskih obročev in gume. S pritvjenjem vijakov na kovin-

KARAKTERISTIKE BETONA	OBJEKT		
	PRIMARNI ZGOŠČEVALNIK (17)	SEKUNDARNI ZGOŠČEVALNIK (18)	GNILIŠČE (20)
marka betona (MB):			
TALNA PLOŠČA	MB 30	MB 30	MB 40
STENA	MB 40	MB 40	MB 40
MOST	MB 30	MB 30	–
STREŠNA PLOŠČA	–	–	MB 40
zaščitna plast betona	5 cm	5 cm	5 cm
globina omočenja betonskega prereza	3,5 cm	3,5 cm	3,5 cm
vodocementni faktor (v/c)	0,50	0,50	0,50
posed stožca	10 cm	10 cm	10 cm
sulfatna odpornost	X	X	X
zmrzilska odpornost (OMO 100)	X (razen talne plošče)	X (razen talne plošče)	X (razen talne plošče)
aeriran beton	X (razen talne plošče)	X (razen talne plošče)	X (razen talne plošče)

Preglednica 3 • Zahtevane karakteristike betona

skih obročih vmesna guma zaradi pritiska na-brečne v radialni smeri in zatesni stik med be-tonskim prerezom in tehnološko cevjo.

5.2.2 • Zagotovitev trajnosti AB konstrukcije objektov

Trajnost AB konstrukcije objekta je delno zago-tovljena z izvedbo neprepustnosti, opisano v poglavju 5.2.1. Zaradi agresivnosti medija pa prej naštetih ukrepi niso dovolj, da bi v celoti preprečili propadanje betona. Zato smo v sodelovanju s podjetjem Igmat d.d. predvideli ustrezno recepturo betona, ki zagotavlja odpornost betonske konstrukcije proti agre-sivnemu mediju. Za ta namen se pri vseh ob-

jektih, ki so v neposrednem stiku z medijem, namesto običajnega cementa uporablja sul-fatno odporen cement.

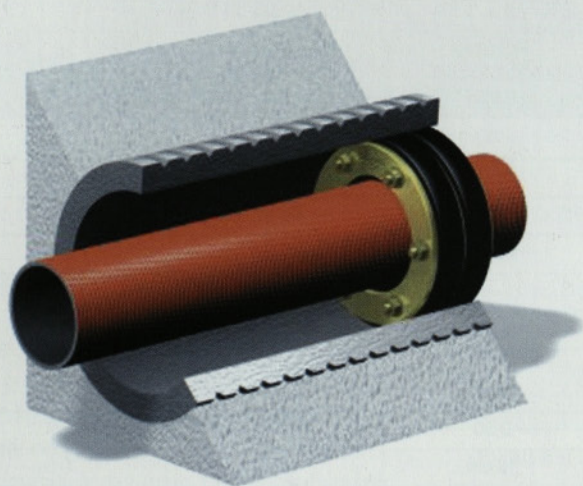
Trajnost AB konstrukcij smo povečali tudi z zmanjšanjem krčenja betona, in sicer z ust-rezno recepturo betona (uporaba manjše količine cementa in večjih frakcij agregata (do ϕ 32 mm) ter z načinom gradnje. Posamezne kampade oboda cilindrične stene nismo be-tonirali naenkrat, temveč smo puščali nezabe-tonirane rege na mestih napejalnih niš (slika 13). Zaradi časovnega zamika med betonira-njem segmentov oboda in rege smo zmanjšali posledice negativnega učinka krčenja betona, saj se je v tem času beton segmentov delno



Slika 9 • Detajl vodoravnega delovnega stika



Slika 10 • Detajl neprepustne vezave opaža cilindrične stene



Slika 11 • Detajl sistema DOYMA za tesnitev prebojev betonske konstrukcije



Slika 12 • Vgradnja stekleno cementnih cevi med opažni stranici cilindrične stene

skrčil. Za rege smo uporabili ekspanzijski beton, zaradi česar so na stiku med starim in novim betonom nastale tlačne napetosti.

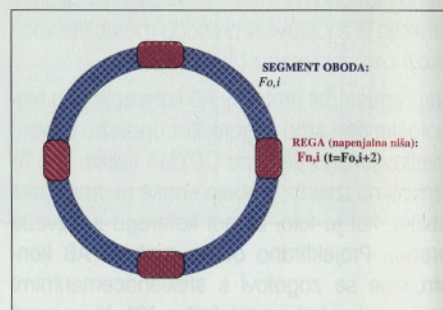
5.3 • Dokazovanje kakovosti gradnje

Za dokazovanje kakovosti gradnje sta bila predpisana dva postopka, in sicer preskus neprepustnosti za vodo ter preskus neprepustnosti za plin. Preskus neprepustnosti za vodo je bilo treba izvesti pri vseh cilindričnih objektih. Pri gniliščih, v katerih nastaja kot stranski produkt gnitja blata bioplina, pa je bilo treba dokazovati tudi plinotesnost betonske konstrukcije.

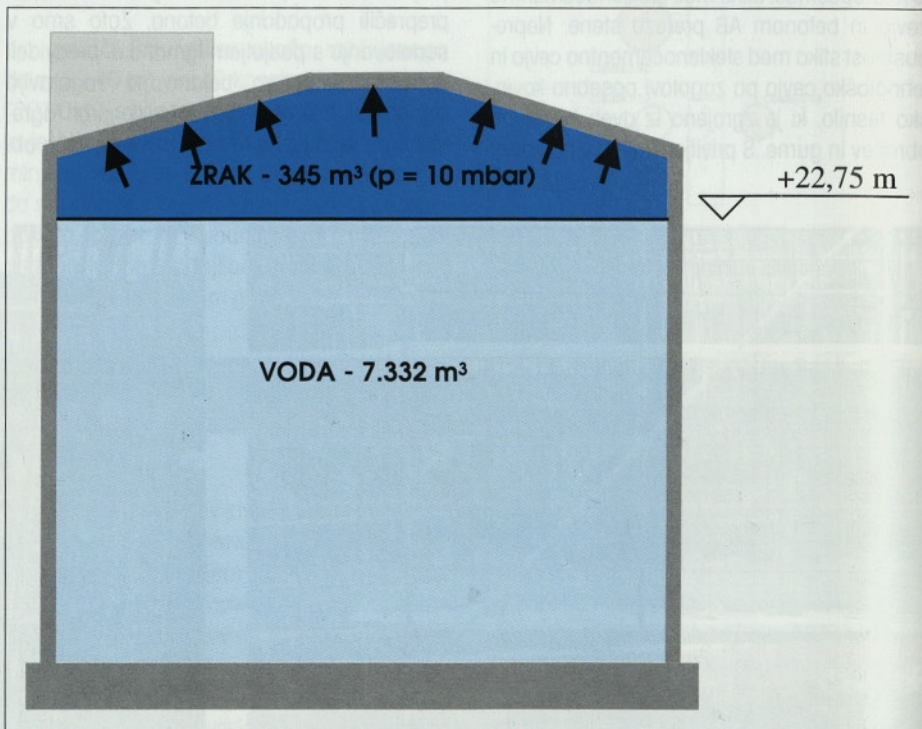
Preskus neprepustnosti obravnavanih objektov je opravilo podjetje Igmata d.d. po zahtevah standarda SIST EN 1610, ki obravnava gradnjo in preskušanje vodov in kanalov za odpadno vodo. Ta standard opredeljuje le postopke preskušanja, ne pa tudi kriterijev neprepustnosti. Ker ustreznega slovenskega standarda za kriterije neprepustnosti ni, smo ob navedenem standardu upoštevali avstrijski standard ÖNORM B 2503.

Preskus neprepustnosti za vodo je potekal zaporedno po objektih. S prečrpavanjem vode iz objekta v objekt smo racionalizirali strošek za vodo in posledično tudi strošek preskusa neprepustnosti. Preskus se je pričel s polnjenjem objekta z vodo do projektiranega nivoja. Objekt 20 je bil tako napolnjen s 7.332 m³ vode, objekti 17 in 18 pa s 1.900 m³ vode. Polnjenje večjih objektov je trajalo 7 dni, manjših pa 3 dni. Po ustavitvi gladine vode se je pričelo merjenje padca gladine vode (ΔH) in je trajalo 10 dni. S standardom določen maksimalni dovoljeni padec nivoja vode po 48 urah, t.j. 3 mm, ni bil pri nobenem objektu prekoračen.

Pri objektu 20 je bilo treba dokazati, da je betonska konstrukcija tudi neprepustna za plin. Ker se bo med obratovanjem gnilišča bioplina zadrževal nad nivojem blata, smo preskus neprepustnosti za plin izvedli za preskusom neprepustnosti za vodo in pred izpraznitvijo vode iz objekta. Za preskušanje neprepustnosti za plin smo uporabili zrak, s katerim smo napolnili gnilišče nad nivojem vode do nadtlaka 100 mbarov (slika 14). Preskusni tlak je dosegel okoli 1,5-kratno vrednost delovnega tlaka gnilišča, ki znaša 60 mbar.



Slika 13 • Prikaz postopnega vgrajevanja betona v obod cilindrične stene



Slika 14 • Shematični prikaz preskušanja plinotesnosti gnilišča (objekt 20)

Po stabilizaciji tlaka v objektu smo pričeli z merjenjem padca tlaka (Δp). Ker standarda za preskušanje neprepustnosti za plin take vrste objektov ni, so bili kriteriji za neprepustnost preračunani na podlagi volumna zraka. Pri tem je bila upoštevana predpostavka, da je volumen zraka v gnilišču enakovreden

volumnu zraka cevne voda dolžine 120 m in premera 2 m. Za cevovod izbranih dimenzij dovoljuje izbrani standard največjo izgubo tlaka 10 mbarov v predpisanem času, t.j. v 47 minutah. Tudi ta preskus je bil uspešno opravljen, saj je končna meritev pokazala izgubo tlaka $\Delta p = 0,0$ mbar.

Rezultati opisanih preskusov dokazujejo, da je bila za izvedbo cilindričnih objektov izbrana ustrezna tehnologija gradnje, ki je omogočala kakovostno gradnjo objektov. Pri tem imajo pomembne zasluge izvajalci, ki so z natančnostjo in predanostjo delu v veliki meri prispevali h kakovostni izvedbi.

6 • POSTOPNOST GRADNJE OBJEKTOV

Zaradi velikosti in različnih konstrukcijskih elementov, ki tvorijo objekt, je bilo treba vsak cilindrični objekt graditi večfazno. Z

izbranim načinom gradnje smo AB konstrukcijo gnilišča zgradili v 15, konstrukcijo zgoščevalnikov pa v 11 fazah (slika 15).

Zaradi velikosti objektov smo predvsem cilindrične stene gradili kampadno. Z izbrano višino kampade 1,95 m smo optimizirali opaž in zagotovili kakovostno vgradnjo betona. Enako višino kampade smo uporabili tudi pri talni plošči in razširjenemu delu stene objekta 20, saj smo vsak objekt zaradi možnosti spreminjanja radija opaža izvajali v celoti z isto opažno opremo.

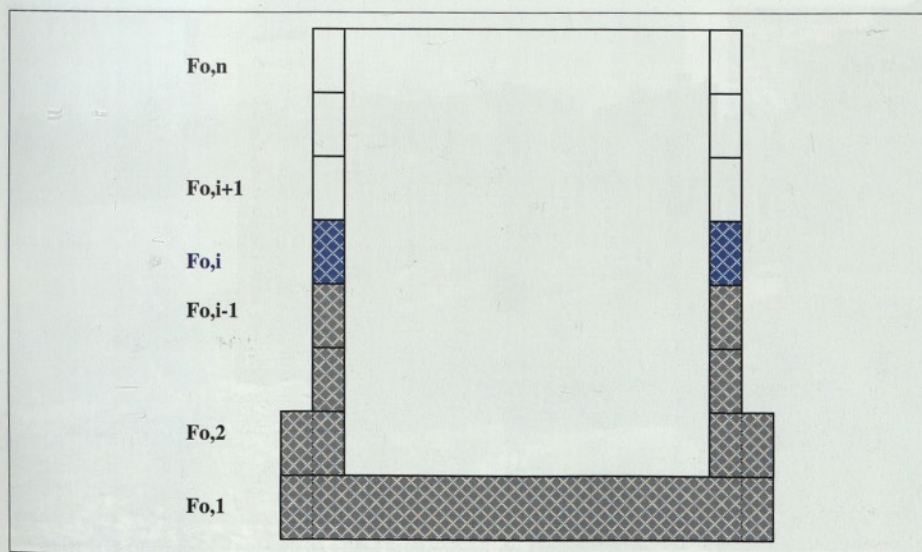
Talno ploščo objekta 20 ter zgornjo in spodnjo talno ploščo objektov 17 in 18 smo zgradili v eni fazi. Gradnja je potekala od sredine proti robu plošče. Tako smo pri zgornji talni plošči zgoščevalnikov najprej izvedli lijak in nato preostali del plošče. S talno ploščo smo zabetonirali tudi 10 cm cilindrične stene kot oporo za opaž stene naslednje faze.

V vsaki kampadi cilindrične stene smo zaradi zmanjšanja negativnega vpliva krčenja betona na neprepustnost objekta izvedli hkrati tri (objekt 17, 18) oziroma štiri (objekt 20) segmente oboda stene. Naknadno smo med temi segmenti zabetonirali rege, ki so na mestih sidrskih niš in imajo dimenzije $2,7 \times 0,85$ m. Rege smo zabetonirali po delnem krčenju betona in ne prej kot 7 dni po betoniranju segmentov kampade. V vsako kampado smo hkrati z mehko armaturo vgradili tudi cevi za kable, v katere smo pred napenjanjem vstavili projektirane kable.

Strešno ploščo objekta 20 in kontrolni most objektov 17 in 18 smo izvedli po izgradnji zadnje kampade cilindrične stene in po naknadnem zabetoniranju reg. Po izvedbi strešne plošče gnilišča (20) smo zaključili AB konstrukcijo objekta še s strešnim parapetom. Izdelali smo ga na enak način kot ostale kampade cilindrične stene (4 segmenti + 4 rege).

FAZE	OBJEKT		
	PRIMARNI ZGOŠČEVALNIK (17)	SEKUNDARNI ZGOŠČEVALNIK (18)	GNILIŠČE (20)
1.	spodnja talna plošča	spodnja talna plošča	talna plošča
2.	cilindrična stena – KAMPADA 1	cilindrična stena – KAMPADA 1	razširjeni del cilindrične stene – KAMPADA 1
3.	pusti beton	pusti beton	cilindrična stena – KAMPADA 2
4.	zgornja talna plošča	zgornja talna plošča	cilindrična stena – KAMPADA 3
5.	cilindrična stena – KAMPADA 2	cilindrična stena – KAMPADA 2	cilindrična stena – KAMPADA 4
6.	cilindrična stena – KAMPADA 3	cilindrična stena – KAMPADA 3	cilindrična stena – KAMPADA 5
7.	cilindrična stena – KAMPADA 4	cilindrična stena – KAMPADA 4	cilindrična stena – KAMPADA 6
8.	cilindrična stena – KAMPADA 5	cilindrična stena – KAMPADA 5	cilindrična stena – KAMPADA 7
9.	cilindrična stena – KAMPADA 6	cilindrična stena – KAMPADA 6	cilindrična stena – KAMPADA 8
10.	cilindrična stena – KAMPADA 7	cilindrična stena – KAMPADA 7	cilindrična stena – KAMPADA 9
11.	kontrolni most	kontrolni most	cilindrična stena – KAMPADA 10
12.	–	–	cilindrična stena – KAMPADA 11
13.	–	–	cilindrična stena – KAMPADA 12
14.	–	–	strešna plošča
15.	–	–	strešni parapet

Preglednica 4 • Postopnost gradnje cilindričnih objektov



Slika 15 • Postopnost gradnje cilindričnih objektov – shematično

7 • OPAŽNI SISTEMI ZA IZVEDBO OBJEKTOV CILINDRIČNE OBLIKE

Za večino betonskih objektov velja, da je kakovost gradnje v veliki meri odvisna od uporabljenih opažnih tehnologij. Za obravnavane cilindrične objekte je ta trditve še toliko bolj izrazita, saj je zagotovitev zahtev po kakovosti gradnje možno izpolniti le ob uporabi optimalnega sistema opaževanja sten.

V svetu so poznane različne tehnologije, od katerih velja omeniti dva med seboj različna si-

stema, in sicer segmentni opaž (slika 16) ter sistem sklenjenega kroga (slika 17). Prednost prvega je v enostavnosti spreminjanja radija opaža, potrebuje pa vezavo skozi beton. Sistem sklenjenega kroga zaradi enakomerne razporeditve obtežbe po obodu opaža ne potrebuje vezanja opaža skozi beton, s čimer prispeva k zmanjšanju kritičnih mest za zagotovitev neprepustnosti objekta.

Glede na montažo in demontažo se opažne sisteme deli na plezajoče in neplezajoče. Medtem ko prvi ne potrebujejo dodatnih odrov za premik v naslednjo kampado, ker se dvigujejo s pomočjo hidravlike, pa je pri neplezajočih opažih oder obvezen. Tako je drugi sistem zaradi dodatnega odra na eni ali obeh straneh stene finančno manj ugoden. Poleg tega je tudi časovno neugoden, saj je treba k montaži in demontaži opaža prišteti tudi montažo in demontažo odra.



Slika 16 • Detajl segmentnega opažnega sistema



Slika 17 • Detajl opažnega sistema sklenjenega kroga s hidravliko

8 • IZBIRA OPAŽNE TEHNOLOGIJE ZA CILINDRIČNE STENE

Zaradi specifičnosti oblike obravnavanih cilindričnih objektov, ti imajo namreč zunanje napenjalne niše, in zahteve projektanta, da se stene ne betonira po celem obodu naenkrat, je bila izbira ustreznega sistema opaženja stene zelo zahtevna naloga. Izbor ustreznega opažnega sistema smo naredili na podlagi tehnične, tehnološke in finančne analize karakteristik treh sistemov:

- I. segmentni sistem,
 - II. sistem sklenjenega kroga s hidravliko,
 - III. sistem sklenjenega kroga brez hidravlike.
- Vsak izmed analiziranih sistemov ima določene prednosti in pomanjkljivosti. Segmentni sistem opaža ima to prednost, da je spreminjanje polmera in obsega opaža zelo enostavno in hitro. Njegova pomanjkljivost pa se kaže pri dvigovanju opaža iz kampade v kampado. Dvigovanje opaža je zamudno, saj je treba opaž razstaviti na manjše segmente in



Slika 18 • Deponija izbrane opažne opreme

z žerjavom dvigniti v naslednjo kampado. Sistem ne potrebuje posebnega odra, ker so konzolni odri del opažnega sistema.

Sistem sklenjenega kroga s hidravliko je v celoti izdelan iz toge jeklene pločevine. Prednost sistema je nedvomno hitrost dvigovanja opaža iz kampade v kampado, saj se dvigovanje izvaja s posebno hidravliko. Delovni oder ima ta sistem rešen podobno kot segmentni sistem, zato dodaten oder ni potreben. Prednost uporabljenega materiala je zelo visoka kakovost betonske površine, pomanjkljivost pa zamudno spreminjanje obsega opaža. Zaradi osnovnega materiala in hidravlike je najem tega opažnega sistema finančno manj ugoden.

Sistem sklenjenega kroga brez hidravlike je predstavnik starejše tehnologije. Opaž je izdelan iz lesene vezane plošče, lesenih nosilcev ter jeklenih napenjalnikov. Vse ostale prednosti in pomanjkljivosti so enake kot pri segmentnem sistemu s to razliko, da opaž sklenjenega kroga brez hidravlike nima sistemsko rešenih delovnih odrov in zato potrebuje dodaten fasadni oder.

Pri izboru opažnega sistema smo postavili dve merili:

1. strošek materiala in dela,
2. možnost hitrega spreminjanja obsega opaža.

Medtem ko je prvo merilo samoumevno, pa je drugo merilo pomembno zato, ker smo

želeli z isto opremo zgraditi vse cilindrične objekte. Obema meriloma sta ustrezala sistema I. in III., sistem II. pa je kljub zelo dobrim karakteristikam ravno pri teh dveh merilih najbolj odstopal. Podrobnejša analiza in pogovori z najemodajalcem tega sistema so stanje bistveno izboljšali, vendar je bila končna odločitev v prid III. sistema (slike 18 do 20). Vzrokov za to je več. Sistem sklenjenega kroga brez hidravlike smo pred davnimi leti v podjetju že uporabili in z njim imeli že kar nekaj izkušenj. Del te opreme smo še vedno imeli na zalogi, kar je bil dodatni razlog za tako odločitev. Dodatni oder se ni izkazal kot pomanjkljivost, ker smo ga potrebovali tudi za izvedbo fasade (slika 21).



Slika 19 • Opaževanje talne plošče primarnega zgoščevalnika (objekt 17)



Slika 21 • Fasadni oder gnilišč (objekt 20)



Slika 20 • Opaževanje cilindrične stene primarnega zgoščevalnika (objekt 17)



Slika 22 • Gradnja gnilišč (objekt 20) in primarnih zgoščevalnikov (objekt 17)

9 • SKLEP

Gradnja II. faze CČN Ljubljana je projekt, ki je zaradi obsega, raznolikosti objektov in s tem povezanimi tehnologijami gradnje zelo zahteven. S tem člankom sem poskušala osvetliti problematiko gradnje objektov cilindrične oblike (slika 22). Zaradi oblike in strogih zahtev

glede zagotavljanja neprepustnosti in trajnosti betonskih konstrukcij je bil izbor ustrezne tehnologije opaževanja zelo težak. Za izbor sta bili postavljeni dve merili, in sicer ekonomski vidik ter možnost spreminjanja obsega opaža. Poleg tega je bilo pri izboru treba upoštevati tudi

zahtevo projektanta, da se stene ne betonira po celem obodu, temveč s prekinitvami na mestu napenjalnih niš. Po zaključku gradnje cilindričnih objektov ugotavljamo, da je bila izbrana opažna tehnologija s tehničnega stališča ustrezna.

10 • VIRI

Hidroinženiring d.o.o., SPIT d.o.o.: Projekt št. 601 370, PZI s spremembami, september 2002.

Hidroinženiring d.o.o.: Projekt št. 601 370, PGD, PZI, april 1999.

<http://www.gollner.at>

<http://www.noie.de>

<http://www.peri.de>

<http://www.rsb-rountech.com>

Igmat d.d.: Poročilo o preiskavi tesnosti, št. 150-KAN-2003, junij 2003.

Igmat d.d.: Poročilo o preiskavi vodotesnosti objekta 20.2 – gnilišče, št. 117-KAN-2003, junij 2003.

Igmat d.d.: Preskus tesnosti objekta 20 – gnilišča na CČN Ljubljana, št. 8135-BET-2003.

Mahne, Tanja: Tehno-ekonomski elaborat, št. VG-555-2, 7. maj 2002.

Mahne, Tanja: Tehnologija gradnje objektov 17 in 18, št. VG-555-2/TS 07, 17. januar 2003.

Mahne, Tanja: Tehnologija gradnje objektov 20, 22, 23 in 35, št. VG-555-2/TS 03, 3. julij 2002.

Noe Schaltechnik GmbH: Katalog.

Peri GmbH: Katalog.

RSB Schalungstechnik GmbH: Katalog.

Tonin, Jurij: Projekt tehnologije izvedbe vodotesnih in ostalih betonskih konstrukcij v okviru CČN Ljubljana, maj 1996.

GRADNJA VIADUKTA VRANKE NA AVTOCESTI MARIBOR – KOPER CONSTRUCTION OF VRANKE BRIDGE ON MARIBOR - KOPER HIGHWAY

Aleš Perhavec, univ. dipl. inž. grad.
SGP Kraški Zidar d.d. Sežana, Kolodvorska 1

Strokovni članek UDK 624.21 : 625.745.1

Povzetek | V prispevku je opisana tehnična rešitev in opis gradnje viadukta Vranke. Objekt je zgrajen na avtocesti Maribor – Koper na pododseku od Trojan do Blagovice. Prečka ozko in globoko grapo Vranke. Celotna dolžina viadukta presega 100 m. Sestavljen je iz levega in desnega dela z dolžinama prekladne konstrukcije 92 m. Podporno konstrukcijo posameznega dela sestavljata krajna opornika in vmesna stebra. Dolžina krajnih polj je 28 m. Srednje polje meri 34 m. Posebnost gradnje mostu je bila betoniranje posamezne prekladne konstrukcije v enem delu. Plošča levega dela je bila zabetonirana v začetku avgusta 2003, desnega dela pa v zadnjih dneh oktobra istega leta. Objekt je v celoti zgradil SGP Kraški Zidar d.d. iz Sežane po tehnični dokumentaciji, ki jo je izdelal GRADIS BP iz Maribora.

Summary | The paper presents the technical solution and the report of the construction of the viaduct Vranke on the highway Maribor – Koper. The viaduct is situated between Trojan and Blagovica villages and is crossing a narrow and deep valley Vranke. The total length of the bridge is over 100 m. It is made up of a left and a right part. The support construction of each part are the edge pillars and two columns in the middle. The span of edge fields is 28 m. The span of middle field is 34 m. It's plates were made in one piece. The slab of the left part was finished in August 2003. The right one was finished by the end of October 2003. The building contractor was SGP Kraški Zidar d.d. from Sežana. The final executive design project was made by GRADIS BP from Maribor.

1 • UVOD

Družba za avtoceste v Republiki Sloveniji pospešeno gradi manjkajoča odseka na avtocesti Maribor – Koper. To sta zahtevna dela od Trojan do Blagovice in od Klanca do Srmina, kjer se avtocesta priključi na obstoječo avtocesto proti Kopru. Viadukt Vranke je na pododseku 6/2 od Trojan do Blagovice.

Pododsek avtoceste se prične pred Trojanami, kjer trasa poteka preko predora Trojanane. Kmalu po izhodu iz predora v smeri Ljubljane se začne viadukt Šentožbolt, ki prečka magistralno cesto Celje - Ljubljana. V smeri iz Celja proti Ljubljani poteka avtocesta na desni strani doline, visoko v bregu. Brežine nad cesto so na tem delu varovane z visokimi opornimi zidovi.

Po nekaj metrih po koncu viadukta se začne predor Podmilj. Iz predora poteka cesta preko krajšega nasipa, viaduktov Log in Javorje na največji objekt na tem delu avtoceste. To je viadukt Petelinjek, ki poteka visoko nad magistralno cesto. Tu avtocesta preide na levo stran doline. Preko viadukta Suša se nadaljuje v hribovitem območju nad Blagovico. Po nekaj metrih useka se približamo ozki grapi Vranke. Nadalje se trasa preko globokih vkopov, zavarovanih z visokimi opornimi in podpornimi zidovi ter krajšim nasipom in manjšim mostom priključi na viadukt Blagovico. Ljubljanska stran viadukta se priključi na avtocesto, ki je bila predana prometu konec junija 2003.

Opisani avtocestni pododsek naj bi bil po prvotnih načrtih predan v uporabo marca 2005, obstaja pa želja, da bi promet po njem stekel že oktobra 2004, istočasno kot na pododseku Klanec – Srmin. Celotno območje je geografsko razgibano in geološko neugodno. Pojavljajo se strme in nestabilne brežine. Prečno na smer ceste se pojavljajo grape s strmimi brežinami, po katerih tečejo manjši potoki hudourniške narave. Ti se priključijo v reko Radomljo, ki teče iz Trojan proti strugi Kamniške Bistrice. Temeljna tla so v večini sestavljena iz permokarbonskih skrilavcev, ki spadajo med najstarejše kamnine na območju Slovenije. Celotno območje nad Blagovico je plazovito. Pri obsežnih posegih obstaja nevarnost zdrsa brežin. Niveleta avtoceste poteka globoko pod koto obstoječega terena. Strme brežine so varovane z opornimi in podpornimi zidovi.

PODATKI O UDELEŽENCIH PRI GRADITVI VIADUKTA VRANKE

Investitor:	DARS - družba za avtoceste republike Slovenije, d.d.
Glavni projekt:	PNZ - projekt nizke zgradbe, Ljubljana
Izvedbeni projekt:	GRADIS biro za projektiranje Maribor, d.o.o., odgovorni vodja projekta: prof. Vukašin Ačanski, univ. dipl. inž. grad., odgovorni projektant: Diana Zupanc, univ. dipl. inž. grad.
Revizija:	DDC, Ljubljana, prof. dr. Milenko Pržulj, univ. dipl. inž. grad.
Izvajalec del:	SGP Kraški Zidar d.d. Sežana, odgovorni vodja del: Samo Pirjevec, univ. dipl. inž. grad., vodja del: Aleš Perhavec, univ. dipl. inž. grad.
Nadzor:	DDC, družba za državne ceste republike Slovenije, odgovorni nadzornik vseh del: Jože Herga, univ. dipl. inž. grad., odgovorni nadzornik posameznih del: Miljan Senčar, inž. grad., univ. dipl. ekon.
Čas gradnje:	november 2002 - junij 2004

2 • TOPOGRAFIJA TERENA

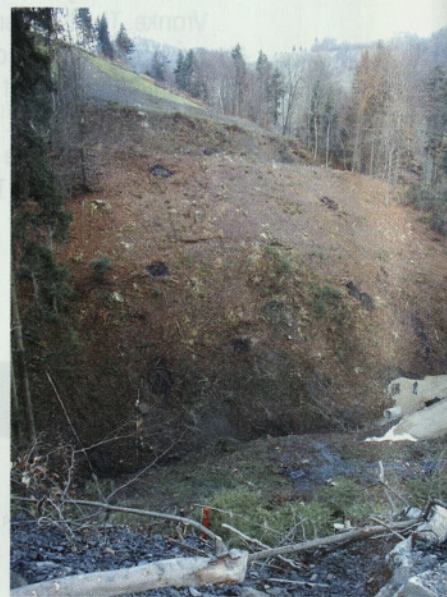
Prostor med opornima zidovima OZ 12 in OZ 13 povezuje skoraj 100 m dolg viadukt Vranke, ki premošča istoimensko grapo. Voda iz bližnjih brežin se po strugi na dnu grape izliva v reko Radomljo. Brežine so izredno strme. Pred posegom so bile poraščene z drevjem in

gosto podrastjo (slika 1). Površinska prepere-la plast je debela do 2 m. Osnova prepere-line je humus z vložki tankih skrilavcev. Pod prepere-lim slojem se pojavlja kompaktnjša osnova, ki vsebuje glinence, globlje pa tudi melje in peščenjak.



Slika 1 • Teren na območju jarka Vranke pred začetkom gradnje

Na območju krajne podpore v osi 4 je v pobočje zarezan jarek širine 5 m in povprečne globine 4 m. Os kanala poteka skoraj pravokotno na os trase. Po več pogovorih z domačini predvidevam, da so ga uporabljali za vleko hlodov iz gozda. Delno se je poglobljal zaradi prometa, odločilno vlogo za njegovo veliko globino pa je imela voda, ki je drla po njem ob večjih nalivih (slika 2).



Slika 2 • Teren po poseku drevja in grmičevja

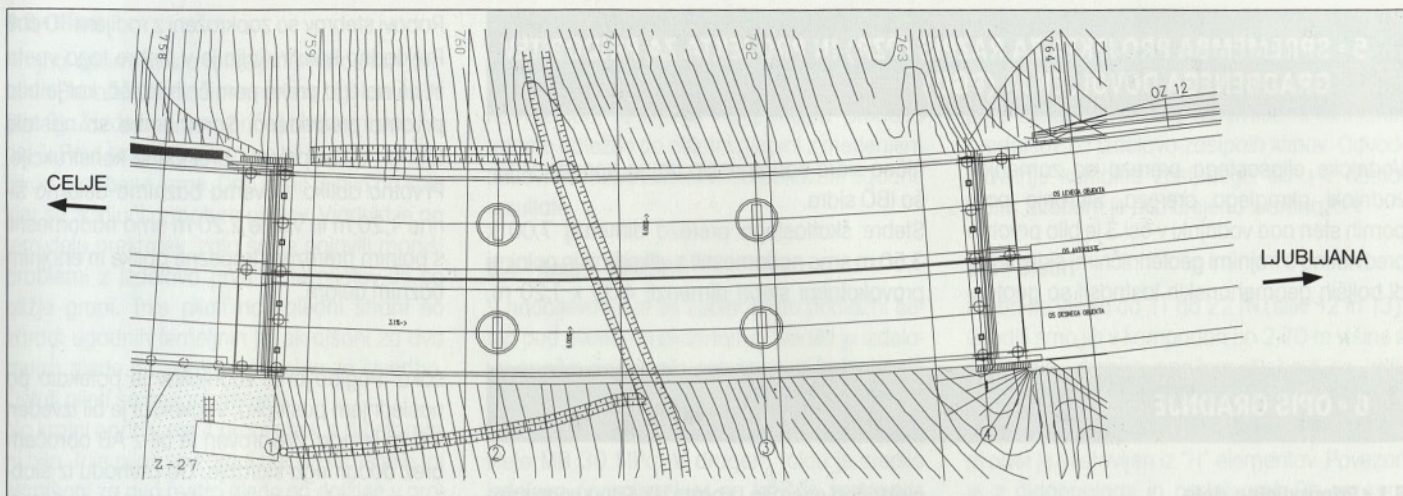
3 • KONSTRUKCIJSKA ZASNOVA

Konstruktivna zasnova viadukta je ploščasti okvir preko treh polj. Sestavljen je iz levega in desnega dela. Podporno konstrukcijo sestavljajo krajni podporni sistem z vmesnimi stebri. Štirje stebri, visoki od 12 do 21 m, imajo enak

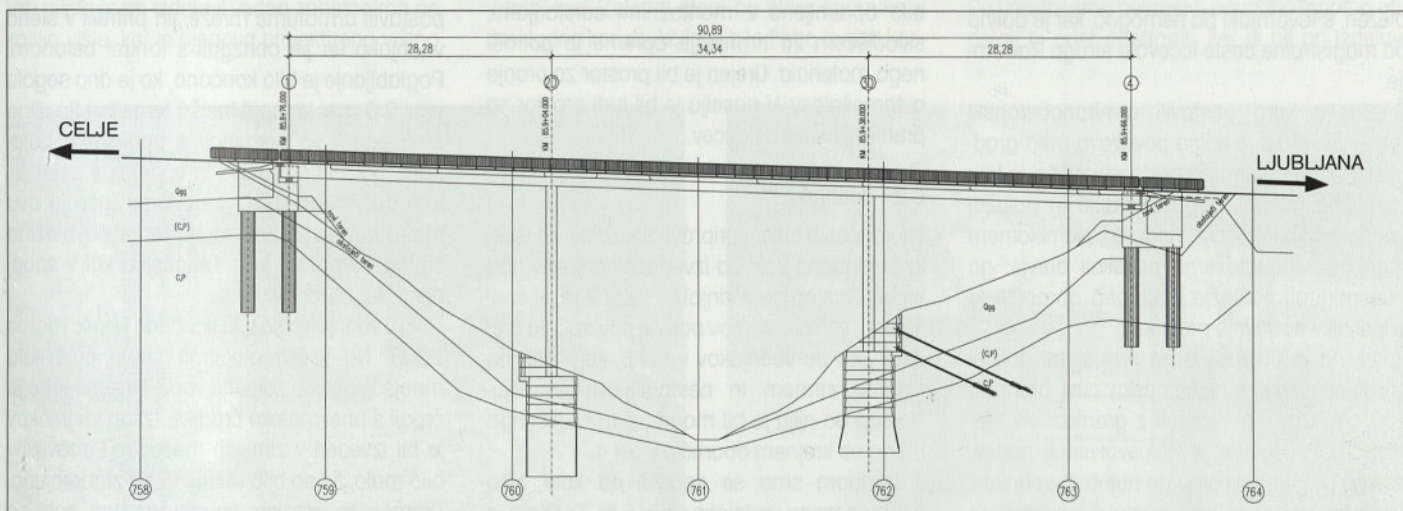
pravokotni presek dimenzij 4,00 x 1,20 m in so temeljeni na vodnjakih premera 5,50 m. Dno najglobljega vodnjaka se konča 14 m pod koto vrha temeljne blazine stebra 3L. Vsi vodnjaki segajo v dobro raščena temeljna tla.

Zaradi zelo strmih brežin je nad vodnjaki predvidena zaščita z delnimi obroči, sidranimi v kompaktnjšo osnovo (slike 3, 4 in 5).

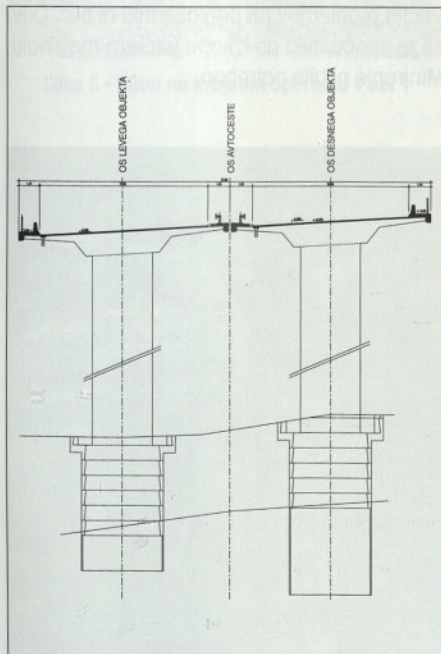
Konstrukciji levega in desnega dela sta večinoma ločeni, skupna sta le krajna opornika. Plošča je v stebre toga vpeta. Na krajno oporo nalega preko dveh neoprenskih dvosmerno pomičnih ležišč. Prerez plošče je poln, v



Slika 3 • Tloris objekta



Slika 4 • Vzdolžni prerez desnega objekta



Slika 5 • Prečni prerez konstrukcije

odebeljen srednji del sta vpeti konzoli dolžine 3,45 m na levem delu in 3,05 m na desnem delu. Debelina srednjega dela znaša 1,50 m. Širina srednjega dela na spodnjem robu je 4,90 m. Debelina na robu konzol je le 22 cm.

Na robovih konzol so predvideni hodniki z robnimi vencji. Razpon stranskih polj meri 28 m, vmesno polje je dolgo 34 m. Višinska razlika med niveleto ceste in dnom grape je skoraj 27 m.

4 • OPREMA VIADUKTA

Odvodnjavanje voziščne površine je predvideno preko cestnih izlivanikov, ki so priključeni v cevi premera 200 in 250 mm. Kanalizacijske cevi potekajo vzdolž objekta pod najnižjo točko prekladne konstrukcije levega in desnega objekta. Meteorna voda z vozišča odteka v cestno kanalizacijo. Telekomunikacijski vodi potekajo pod konzolnim delom na višji strani desnega objekta in so zaščiteni s plastičnimi cevmi premera 125 mm, ki so na konstrukcijo pritrjene s kovinskimi nastavki.

Skupna debelina asfaltnih plasti je 7 cm. Hidrozolacijo prekladne konstrukcije varuje

3 cm debela zaščitna plast asfaltnega betona (AB 11), na kateri je položena 4 cm debela obrabna plast AB 8.

Robna dela vozišča varuje betonska varnostna ograja "New Jersey". Na zunanjih robovih je pritrjena jeklena varnostna ograja za pešče. Notranji del vozišča zaključujejo granitni robniki, povezani z armiranobetonskim hodnikom. Vmesna hodnika sta opremljena z jekleno odbojno varnostno ograjo.

Na stiku prekladne konstrukcije in krajnega opornika je dilatacija, ki dopušča pomike voziščne plošče glede na krajni nepomični podporni sistem.

5 • SPREMEMBA PROJEKTA ZA RAZPIS (PZR) IN PROJEKTA ZA PRIDOBITEV GRADBENEGA DOVOLJENJA (PGD)

Vodnjake elipsastega prereza so zamenjali vodnjaki okroglega prereza. Sidranje podpornih sten nad vodnjaki v osi 3 je bilo prvotno predvideno s trajnimi geotehničnimi sidri. Zaradi boljših geomehanskih lastnosti so geoteh-

nična sidra nadomestila trajna, vendar cenejša IBO sidra.

Stebre škatlastega prereza dimenzij 7,00 x 3,50 m smo nadomestili z vitkejšimi in polnimi pravokotnimi stebri dimenzij 4,00 x 1,20 m.

Robovi stebrov so zaokroženi z radijem 10 cm. Prekladna konstrukcija je v stebre togo vpeta in ne nalega preko pomičnih ležišč, kot je bilo prvotno predvideno. Spremembe so nastale tudi pri obliki prereza prekladne konstrukcije. Prvotno obliko z dvema baznima deloma širine 1,20 m in višine 2,20 m smo nadomestili s polnim prerezom trapezne oblike in enojnim baznim delom.

6 • OPIS GRADNJE

6.1 • Pripravljalna dela

Dostop v grapo s težko mehanizacijo je bil otežen, s tovornjaki pa nemogoč, ker je dolina od magistralne ceste ločevala struga Radomlje.

Čez reko smo postavili armiranobetonski mostiček. Most je edina povezava med gradbiščem in magistralno cesto. Izvedena je bila zakoličba odkupljenega področja in položaj podporne konstrukcije viadukta. Na celotnem območju viadukta smo posekali drevje, ga transportirali na lažje dostopno območje in odpeljali v nadaljnjo predelavo.

Potok na dnu grape smo po celotni dolžini gradbišča speljali v betonske cevi premera 100 cm. Cevi smo zasuli z gramoznim materialom. Poseg nam je prispeval nekaj manevrirnega prostora, ki smo ga nujno potrebovali. Ob vходу v dolino smo postavili gradbiščno naselje, ki je bilo zaradi pomanjkanja prostora majhno in stisnjeno. Električna energija za potrebe gradbiščnih naprav je zagotavljal motorni agregat. Gradbiščno naselje je dobivalo

električno energijo iz omrežja. Pitno vodo smo dovažali in jo hranili v cisterni. Gradbišče je bilo opremljeno z montažnimi sanitarijami, skladiščem za hranjenje opreme in potrošnega materiala. Urejen je bil prostor za pranje avtomešalcev. V naselju je bil tudi prostor za prehranjevanje delavcev.

6.2 • Vodnjaki

Po končanih nujnih pripravljalnih delih so stekla predhodna dela za izvedbo vodnjakov pod stebri. Dostop do vodnjakov v osi 2 je bil enostaven. Več problemov nam je povzročala urediva pot do vodnjakov v osi 3, ker ležita na izredno strmih in nestabilnem območju. Dostop do njiju je bil mogoč z vrha desnega brega ob krajnem oporniku v osi 4.

Z izkopom smo se spustiti do kote vrha posameznega vodnjaka (sliki 6 in 7). Izkop je potekal po fazah globine 1,0 m, ki smo ga varovali z delnimi AB obroči, sidranimi v tršo osnovo z IBO sidri dolžine od 4,0 do 8,0 m. Nad vodnjakom 3D smo ščitili brežino 5 m vi-

soko. Poglobljanje vodnjakov je potekalo po naslednjem postopku: Vsakokrat je bil izveden 1,0 m izkopa. Zavarovan je bil z AB obročem brez dodatnega sidranja. Ob prehodu iz slabšega v boljši material je AB obroče nadomestil torkret beton. Izkopali smo 2,0 m globoko, postavili armaturne mreže, jih pritrdili v steno vodnjaka ter jih obrizgali s torkret betonom. Poglobljanje je bilo končano, ko je dno segalo vsaj 2,0 m v kompaktnjša temeljna tla. Dno smo očistili in poravnali s podložnim betonom, položili armaturo in vodnjak v dveh ali treh taktih napolnili z betonom. Zgornja dva metra vodnjaka zapolnjuje temeljna blazina stebra. Armaturo je tu močnejša kot v spodnjem delu vodnjaka.

Dela v vodnjakih so bila končana konec marca 2003. Na večjih globinah se je pojavljala manjša količina zaledne vode. Dnevno smo jo črpali s pnevmatsko črpalko. Izkop vodnjakov je bil izveden v zimskih mesecih. Padavin je bilo malo, tla so bila večino časa zamrznjena. Vremenske razmere so bile ugodne, zato so bila dela v vodnjakih predčasno končana. Večjih problemov pri poglobljanju ni bilo. Delo se je upočasnilo pri izkopu v tršem materialu. Miniranje ni bilo potrebno.



Slika 6 • Izkop vodnjakov v osi 2



Slika 7 • Izkop vodnjakov v osi 3

6.3 • Piloti

Krajna opornika sta temeljena na osmih uvrstanih Benotto pilotih s premerom 150 cm (sliki 8 in 9). Z izdelavo smo pričeli na krajni opori v osi 1. Pred izdelavo pilotov je bil izveden strojni izkop gradbene jame. Dno jame je bilo na koti, kjer se zaključuje armatura pilotov. Viadukt je na tem delu prekratek, zato so se pojavili manjši problemi z izdelavo prve vrste pilotov, ki so bližje grapi. Trije piloti na zaledni strani so zaradi ugodnih temeljnih tal skrajšani za dva metra glede na zahteve projekta za izvedbo. Ostali piloti so nespremenjeni.

Na krajni opori v osi 4 problemov s prostorom ni bilo. Trije piloti so zaradi boljših temeljnih tal skrajšani za dva metra glede na dolžine v projektu.

Vrh pilota je pri izdelavi vedno zabetoniran nekoliko višje, kot je njegova projektirana višina.

Pred izvedbo meritev zveznosti se odvečni beton odstrani do projektirane kote. Zveznost pilotov je bila preskušena s predpisano neporušno metodo, ki deluje na principu prenosa udarne obtežbe po celotni globini z merjenjem časovnih odzivov. Meritve so pokazale ugodne rezultate.

6.4 • Krajne podpore

V nadaljevanju je bil zabetoniran podložni beton pod pilotnima blazinama. Sledila je izdelava opaža, polaganje armature in betoniranje pilotnih blazin (sliki 10 in 11). Vsaka od njiju je narejena iz 270 m³ armiranega betona kvalitete MB 30 MPa. V drugem taktu je sledila izdelava opornika, kjer so ležišča prekladne konstrukcije. Stene s krili so bile zabetonirane v tretji fazi. Zaledni steni ob stiku opornika s prekladno konstrukcijo je bilo treba izvesti kas-

neje, ker je tu potreben prostor za izvedbo prednapetja. Zaledno stran krajnih opornikov do kote dna betona prekladne konstrukcije smo zasuli v skladu s smernicami tehničnih predpisov za izdelavo zasipnih klinov. Odvodnjavanje kontakta zasipnega klina z obstoječim terenom je bilo urejeno z drenažo.

6.5 • Stebri

Stebri so visoki od 11 do 22 m (sliki 12 in 13). Gradili smo jih v kampadah po 2,70 m višine s prirejenim drsnim opažem. Robovi so zaočkroženi v radiju 10 cm. Sočasno z višanjem stebrov smo gradili delovni oder. Jekleni delovni oder je sestavljen iz "H" elementov. Povezan je z diagonalami in podnicami. Ob vsakem nadvišanju je bil pritrjen v AB steber.

Po izvedbi smo betonsko površino lepотно obdelali in oder odstranili, ker je bil pri izdelavi



Slika 8 • Piloti na krajnem oporniku v osi 1



Slika 9 • Izdelava pilotov za krajni opornik v osi 4



Slika 10 • Betoniranje pilotne blazine krajnega opornika v osi 1



Slika 11 • Montaža opaža pilotne blazine krajnega opornika v osi 4



Slika 12 • Gradnja stebrov levega objekta



Slika 13 • Stebri desnega objekta

podpornega odra prekladne konstrukcije nepotreben.

Premer vzdolžne armature je 28 mm. Armaturene palice se po višini medsebojno prekrivajo. Sidrna dolžina vzdolžne armature na stiku med stebrom in prekladno konstrukcijo je 1,30 m. Armatura zavzema 0,92 % površine prereza. Prečna armatura premera 14 mm je v območju ničelnih momentnih točk šibkejša.

Transport betona do posameznih kampad stebrov je potekal z žerjavom. Stebri so bili zgrajeni v prvi polovici maja 2003.

6.6 • Prekladna konstrukcija

Prekladna konstrukcija je ločena na levi in desni del. Dolžina levega dela je 91,10 m, des-

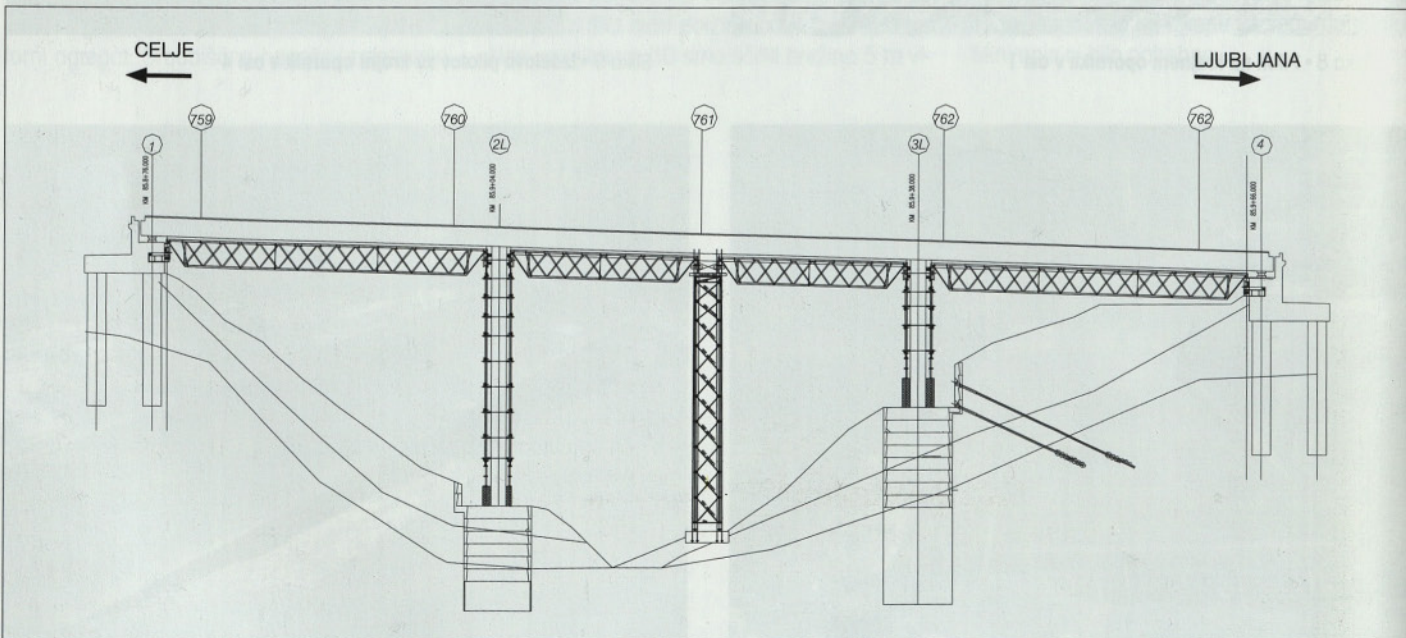
nega pa 92,90 m. Razlika v dolžini se pojavi, ker os objekta poteka v radiju 700 m. Plošča je v stebre vpeta, na opornika pa nalega preko štirih dvosmerno pomičnih neoprenskih ležišč dimenzij 450 x 650 x 175 mm. Skupna širina levega dela je 14,14 m, desnega pa 13,34 m. Prečni nagib je 6,0 %, vzdolžni pa 3,1 %. V vsako ploščo je vgrajeno 110 t navadne in 29 t prednapete armature.

Nosilni opažni oder

Pred izdelavo projekta za izvedbo je bilo odločeno, da bomo opažni oder posameznega dela izdelali naenkrat v celotni dolžini (slika 14). Oder prekladne konstrukcije sestavljajo jekleni stolpi tipa "S50" proizvajalca Thys-

sen – Hunnebeck. Stolpi so postavljeni ob AB stebrih v osi 2 in 3. Po višini so večkrat povezani zaradi preprečitve uklona. Na vrhu jeklenih stolpov so v prečnem naklonu 6,0 % postavljena dva HEA nosilca višine 36 in 30 cm, med katerima so nameščene posebne dvigalke, potrebne pri spuščanju odra med razopazjenjem.

Razpon med stebroma v osi 2 in 3 je 34 m (sliki 15 in 16). Za jeklene palične nosilce tipa "H33" je to prevelika razdalja, zato je bil na polovici razpona postavljen začasen jekleni stolp, sestavljen iz elementov opaža "S50". Stolp stoji na AB temelju dimenzij 13,00 x 3,50 x 0,90 m. Med stolpom in temeljem sta nameščena dva HEA profila višine 50 cm, ki



Slika 14 • Opažni oder



Slika 15 • Nosilni opažni oder prekladne konstrukcije levega dela



Slika 16 • Nosilni opažni oder prekladne konstrukcije desnega dela

nalegata na temelj preko dvigalk. Prostor med dvigalkami in betonom je namenjen za montažo posebnih koles pri transportu iz levega na desni del. Skupna višina stolpa je 22,90 m. Zgornjih 154 cm zapolnjujejo dva HEA profila s prečnim naklonom 6,0 %, vmes nameščene dvigalke za spuščanje, ter naležni del vzdolžnih "H33" nosilcev skupaj z lesenim delom opaža. Ker je desni del prekladne konstrukcije višji, se v opisano strukturo postavi dodaten HEA profil višine 60 cm. Dolžina stolpa je 10,80 m, širina pa 2,00 m.

Težave pri izdelavi opažnega odra

Veliko problemov nam je povzročal majhen manevrirni prostor. Masa celotnega jeklenega opaža je 320 t. Leseni del predstavlja dodatnih 70 t. Transport posameznih delov je potekal sočasno z montažo. S tem smo se izognili veliki količini opaža na gradbišču. Manj problemov je bilo pri izdelavi opaža desnega dela, ker je končan levi del služil kot delovni plato.

Težave nam je povzročala montaža stolpov "S50" predvsem s stališča varnosti. Posamezna vertikalna podporna konstrukcija je sestavljena iz veliko samostojnih delov, zato je pri montaži potrebnih veliko prijemov. Posamezne dele podporne konstrukcije smo sestavili na tleh, ter jih nato s pomočjo žerjava pritrdili na predhodno postavljene elemente. Delo se je izvajalo na višini, ustrezno varnost pa je bilo dokaj težko zagotoviti. Pri delu na višini so bila uporabljena razna osebna zaščitna sredstva (varnostni pasovi ter vrvi za privezovanje).

Jekleni palični nosilci "H33" so na krajnih poljih dolgi 25,50 m. Zaradi velike dolžine so kot samostojni element nestabilni, zato težijo k zvrčanju pravokotno na vzdolžno os. Dodat-

na neugodnost je njihova poševna lega v sklopu podpornega odra. Stabilnejšo lego v prečni smeri dobimo šele, ko jih medsebojno povežemo (zavetrujemo). Pri montaži je bil vsak nameščen nosilec takoj povezan z ostalimi že postavljenimi. S tem je bila opisana nevšečnost omejena.

Betoniranje prekladne konstrukcije

Levi del:

Prekladno konstrukcijo smo zabetonirali v enem delu. Naenkrat smo vgradili 1010 m³ betona. Proces vgrajevanja je trajal brez prekinitve 26 ur. Vgradnja betona je potekala z eno črpalko. Zaradi velike dolžine plošče je črpanje betona potekalo iz treh različnih lokacij. Premik črpalke iz ene na drugo lokacijo zahteva veliko časa, zato sta bili uporabljeni dve črpalki. Prva črpalka je vgrajevala beton iz prve in tretje pozicije (prostor ob krajnem oporniku v osi 4 in 1), druga večja pa iz druge pozicije (dno doline). Pri tem načinu dela je bila ena črpalka vedno v rezervi. Črpalke sta imeli roki dolžine 34 in 42 m. Prva črpalka je imela še dodaten nastavek dolžine 16 m, ki ga je pri betoniranju držal žerjav (sliki 17 in 18).

Betonarna je bila 400 m od mesta vgrajevanja, zato večjih problemov s transportom betona ni bilo. V povprečju smo dosegli 38 m³ vgrajenega betona na uro. Beton se je transportiralo s petimi avtomešalci kapacitete 9 m³. Zaradi strmih dovoznih poti so avtomešalci prevažali po 7 m³ betona. Betonarna ima 3,5 kubični mešalec. Optimalni čas polnjenja avtomešalca je bil dosežen s tremi polnjenji po 2,33 m³ betona.

V celotni plošči je vgrajena 115 t navadne in 29 t prednapete armature. Podporni oder smo gradili od 10. junija do 26. julija 2003. Be-

toniranje je bila zaradi nekaterih pomislekov glede varnosti podpornega odra prestavljena za več kot teden dni. Plošča je bila zabetonirana 6. in 7. avgusta.

Desni del:

Celoten nosilni oder je bil z nekaj spremembami prestavljen na desni del. Delo na desnem delu je potekalo od 10. septembra do 28. oktobra, ko je bila konstrukcija zabetonirana. Betoniranje je potekalo enako kot pri levem delu. Proces vgrajevanja betona je bil enostavnejši, ker nam je levi del služil kot delovni plato.

Prednapenjanje prekladne konstrukcije

V celotnem objektu je vgrajena 60 ton prednapete armature. Polja med stebri in krajnima oporoma so zapolnjena z dvanajstimi 19-žilnimi kablji, ki so v območju stebrov zgoščeni z dodatnimi šestimi kablji. Sila prednapetja v vsakem kablju je 3600 kN.

Zanimiva lastnost pri tem objektu je, da vsi kablji ne potekajo od enega do drugega konca plošče. Kablji se v pahljačah zaklinjajo s prirejenimi kovinskimi ploščami v notranjosti prekladne konstrukcije. Na robovih plošče je nameščenih dvanajst sidrskih glav. Šest kablov je daljših in potekajo od roba ter preko obeh stebrov. Drugih šest kablov je krajših in potekajo le preko bližjega stebra. V pahljači se zaključijo 6,0 m preko stebra, kjer je ničelna točka momentne linije. Enak razpored je na drugi strani plošče.

Vsa prednapeta armatura je bila vgrajena pred izvedbo betoniranja. Celotna plošča je bila zabetonirana v enem delu, zato se je pojavila nevarnost nastanka razpok zaradi krčenja betona. Nastanek razpok je bil delno odpravljen z izvedbo predhodnega prednapetja. Polovica kablov



Slika 17 • Betoniranje prekladne konstrukcije levega objekta



Slika 18 • Betoniranje prekladne konstrukcije desnega objekta

je bila prednapeta s 50 % končne sile, ko je trdnost betona preseгла 20 MPa. Končna sila je bila v vse kable vnešena, ko je trdnost betona preseгла 36 MPa. Sledilo je injektiranje kablov in obbetoniranje napenjalnih glav.

Demontaža nosilnega opažnega odra

Leseni del opaža stranskih delov in konzol je bil odstranjen pred prednapenjanjem. Z odstranjevanjem nosilnega odra smo pričeli po prednapetju in starosti betona 17 dni. Iz dvigalk je bil odstranjen pesek. Oder se je spustil za 9 cm. Najprej smo odstranili vse lesene elemente. Sledilo je izvlečenje "H33" nosilcev na rob AB plošče ter demontaža s pomočjo žer-

java. Delo na višini je bilo zelo zahtevno. Nevšečnosti so povzročali dolgi palični nosilci na stranskih poljih. HEB nosilci in podporni stolpi "S50" so bili demontirani s sodelovanjem avtodvigala in žerjava. Vmesni jekleni stolp mase 30 ton je bil na mesto desnega dela prestavljen v celoti s pomočjo koles in hidravlike.

6.7 • Napredovanje del

Dela na objektu so bila konec decembra prekinjena. Celoten opaž prekladne konstrukcije desnega dela je bil demontiran. Izvedena so bila zaključna dela na krajnih opornikih (manjkajoči steni in zasipni klini).

Spomladi bomo nadaljevali s hodniki in robnimi venci. Na mestih prehoda avtoceste na objekt je potrebno narediti prehodne plošče. Pred polaganjem zaščitne in obrabne plasti asfalta se bo preko celotne prekladne konstrukcije izvedla hidroizolacija.

Ostanejo nam še zaključna dela, kot so izdelava zemeljskih stožcev ob krajnih podporah ter navezava na sosednje objekte, ureditev brežin pod viaduktom in ureditev regulacije potoka. Manjkajoča dela na konstrukciji so postavitve odbojnih in zaščitnih ograj, izdelava komunalnih in elektro vodov ter zaključna dela na vozlišču. Pred tehničnim pregledom se bo naredila obremenilna preizkušnja.

7 • SKLEP

V celotni konstrukciji je vgrajenih preko 4500 m³ betona in 400 ton navadne in prednapete armature. Viadukt Vranke je do sedaj najdaljši avtocestni objekt v Sloveniji, katerega prekladna konstrukcija je bila izvedena v eni fazi. V fazi načrtovanja je bil podan predlog za izvedbo ločnega mostu. Kasneje se je izkazalo, da je gradnja ločnega mostu z razponom, manjšim od 100 m, predraga. Zaradi slabih temeljnih tal bi se pojavil problem temeljenja podpornega odra AB loka in dostopa do temeljev.

Pogled na delno zgrajeni objekt daje videz elegantne AB konstrukcije. Stebri s prevladujočo

dimenzijo v prečni smeri se lepo ujemajo s prekladno konstrukcijo, ki ji dimenzijo v isti smeri poudarjajo dolge in tanke konzole.

Viadukt je nekaj metrov prekratek. Problem se pojavi pri krajni opori na mariborski strani. Krajni opornik leži na robu brežine. Z bežnim pogledom dobimo vtis, da sprednji del opore leži "v zraku". Pomanjkljivost je najverjetneje posledica slabega posnetka obstoječega terena.

Temelja stebrov v osi 3 ležita na strmem robu grape. Najbolj izrazita je lokacija temelja stebra desnega objekta. Pogled nanj nam sproži občutek, da bo celoten temelj zdrsnil proti dnu grape. Z estetskega stališča bi bilo boljše ome-

njena stebra premakniti za nekaj metrov v smeri Ljubljane. Posledica tega je povečanje vmesnega razpona in s tem sprememba geometrije prekladne konstrukcije. Za ohranitev vmesnega razpona bi bilo potrebno premakniti tudi poziciji stebrov v osi 2. Poseg bi povzročil prevelike razlike v dolžini stebrov in s tem najverjetneje težave pri duktilnem obnašanju stebrov pri potresni obtežbi. Težavo bi omejili z izdelavo delno praznih vodnjakov v osi 3. S tem bi pridobili ustrezno višino stebrov. Preveč enostavno bi bilo, da bi bila konstrukcija idealna s stališča konstrukterja in obenem najenostavnejša za prenos s papirja v naravo. Interakcija med obema stranema deluje, pogosto pa se pojavijo želje po določenih spremembah. Nekatere izmed njih je mogoče in včasih tudi smiselno upoštevati.

ČASOVNI RAZVOJ TLAČNE TRDNOSTI BETONOV Z VISOKO TRDNOSTJO V ODVISNOSTI OD VRSTE IN KOLIČINE VEZIVA

TIME DEVELOPMENT OF COMPRESSIVE STRENGTH OF HIGH STRENGTH CONCRETE IN DEPENDENCE OF BINDER TYPE AND QUANTITY

dr. Drago Saje, univ. dipl. inž. grad.

Univerza v Ljubljani, FGG, Jamova 2, 1000 Ljubljana
dsaje@fgg.uni-lj.si

Znanstveni članek UDK 691.34:620.173

Povzetek | V članku je prikazan in analiziran časovni razvoj tlačne trdnosti trinajstih različnih betonov z visoko trdnostjo od začetka strjevanja betona pa do starosti 360 dni. Podana je primerjava rezultatov meritev tlačne trdnosti betonov z različno vrsto in količino cementa ter betonov z različnim deležem mikrosilike v vezivu. Opisan je lastni matematični model za napovedovanje 28-dnevne tlačne trdnosti betona v odvisnosti od veziva, ki temelji na analizi eksperimentalnih rezultatov. Pri betonih, ki so vsebovali cement z veliko specifično površino in večinskim deležem alita ter pri betonih brez oziroma z manjšim deležem mikrosilike, je tlačna trdnost v začetni fazi strjevanja betona hitro naraščala, kasneje, po 90 dneh pa je bil prirastek tlačne trdnosti v večini primerov zamenljivo majhen.

Summary | The paper presents and analyses the time development of compressive strength of thirteen different high strength concretes from the beginning of the hardening process up to the age of 360 days. Concretes with different types and quantities of cement, and concretes with different shares of silica fume in the binder are compared. Based on the analysis of experimental results, own mathematical model for the prediction of 28-day compressive strength of concrete in dependence of the binder was elaborated. As regard to concretes which included cement with high specific surface and major part of alite, and those concretes without or with low share of silica fume, the compressive strength increased quickly in first few days, but later on, after 90 days, the increment of compressive strength was in the majority of cases negligible.

1 • UVOD

Tlačna trdnost betonov se zaradi dolgotrajnega procesa hidratacije s časom spreminja. Hidratacija cementa, to je eksotermna kemijska reakcija cementa z vodo, ima za posledico formiranje hidratizirane cementne paste, ki je bistveni element trdnosti betona. Na proces hidratacije cementa in na količino sproščene toplote pa vpliva več parametrov, med kateri-

mi sta zelo pomembna vrsta in količina veziva. Vezivo sestavljata cement in mineralni dodatek, običajno mikrosilika.

V gradbeništvu se kot vezivo za betone najpogosteje uporablja portlandski cement, za betone z visoko trdnostjo pa poleg običajnega portlandskega cementa pogosto uporabljamo zelo fino mleti portlandski cement z veliko

specifično površino (500 m²/kg). Posledica velike specifične površine cementa je povečana reaktivnost oziroma burnost kemične reakcije cementa z vodo. Uporabljamo tudi cemente z nizko hidratacijsko toploto, pri katerih se sprošča manj hidratacijske toplote, kar je pomembno zlasti za konstrukcije velikih dimenzij.

Mineralni dodatek mikrosilika je zelo reaktiven pucolanski dodatek, sestavljen pretežno iz silicijevega dioksida. Kemijska reakcija mikrosilike z vodo in kalcijevim hidroksidom tvori kal-

cijev silikat hidrat. Produkt hidratacije cementa kalcijev hidroksid k trdnosti ne prispeva, novo nastali produkt kalcijev silikat hidrat pa prispeva k trdnosti cementnega kamna. Mikrosilika, katere premer zrna je približno stokrat manjši

od premera zrna cementa, zaradi svoje finosti zgosti strukturo cementnega kamna in izboljša stik med cementnim kamnom in agregatom. Zaradi izboljšanega stika med cementnim kamnom in agregatom in predvsem za-

radi bolj goste strukture cementnega kamna (Kjellsen, 1999) imajo betoni z mikrosiliko višjo trdnost ter manjšo prepustnost, kar vpliva na trajnost betona in posledično na trajnost celotne armiranobetonske konstrukcije.

2 • EKSPERIMENTALNI PROGRAM

2.1 • Uporabljeni sestavni materiali betona in razmerja sestavin v mešanica

Pri izdelavi betonskih mešanic smo uporabili dve vrsti drobljenega kamenega agregata z največjim nazivnim zrnom 16 mm in mivko. Prvi agregat je sestavljen iz pranega apnenčevega agregata iz Separacije Kresnice in iz mivke Termit iz Moravč. Drugi agregat pa je, z izjemo mivke Termit iz Moravč, pretežno meta-

morfnega izvora, in sicer frakcije 2/4, 4/8, 8/11 in 11/16 iz Bleiberga v Avstriji, frakcija 0/2 pa je magmatskega izvora iz Kraljevega vrha na Hrvaškem. Pri izdelavi betonskih mešanic smo uporabljali cemente CEM II/A-S 42,5R, CEM I 52,5R in cement z nizko toploto hidratacije CEM I 42,5LH iz cementarne v Anhovem. Sestava cementnih klinkerjev uporabljenih cementov je podana v preglednici 1.

Vrsta cementa	Vrsta cementnega klinkerja	Minerali klinkerja			
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
CEM II/A-S 42,5R	običajni klinker	64%	15%	9%	9%
CEM I 52,5R					
CEM I 42,5LH	klinker z nizko toploto hidratacije	34%	46%	1,5%	15%

Preglednica 1 • Mineralna sestava cementnih klinkerjev.

Oznaka mešanice	Vrsta agregata	Vrsta superplastifikatorja	Fini agregat 0-4 (kg/m ³)	Grobi agregat 4-16 (kg/m ³)	Vrsta cementa	Količina veziva (kg/m ³)	Delež mikrosilike (% veziva)	Vodovezivno razmerje	f _{cm,28dni} (MPa)
312	(K)	(1)	1080	719	(X)	500	10	0,28	89,0
731	(K)	(1)	1023	682	(X)	600	10	0,23	90,3
1600	(K)	(1)	1133	755	(X)	400	10	0,36	81,4
1620	(K)	(2)	1134	755	(X)	400	-	0,40	68,9
1620-1	(K)	(2)	1135	756	(Y)	400	-	0,40	74,9
1620-2	(B)	(2)	1206	820	(X)	400	-	0,40	87,1
1620-3	(K)	(2)	1144	762	(Z)	400	-	0,40	56,9
16210	(K)	(2)	1130	752	(X)	400	10	0,40	80,6
16210-1	(K)	(2)	1130	752	(Y)	400	10	0,40	85,0
16210-2	(B)	(2)	1202	817	(X)	400	10	0,40	89,2
16210-3	(K)	(2)	1138	758	(Z)	400	10	0,40	74,0
16210-4	(B)	(2)	1202	817	(Y)	400	10	0,40	96,8
16215	(K)	(2)	1126	750	(X)	400	15	0,40	80,2

Preglednica 2 • Lastnosti preiskovanih betonov

2.2 • Merjenje tlačne trdnosti betonov z visoko trdnostjo

Enoosno tlačno trdnost betonov smo merili na betonskih kockah z robom a=15 cm s pomočjo elektromehaničnega preskuševalnega stroja za statične tlačne preiskave kapacitete 5000 kN. Vrednosti tlačne trdnosti betonov smo merili pri starosti betonov 1 dan, 3, 7, 28, 56, 90, 180 in 360 dni. Merili smo tudi tlačne trdnosti pri starosti betona manj kot en dan in tako dobili realni časovni potek tlačne trdnosti prav od začetka strjevanja betona. Vzorci za preskus tlačne trdnosti betona so bili, razen tistih preskušanih pred enim dnevom starosti, razkalupljeni po 24-ih urah in do preskusa hranjeni v vodi pri sobni temperaturi.

Legenda:

(K) Kresnice

(B) Bleiberg, Kraljevi vrh

(1) sulfonirani naftalen-formaldehid kondenzat

(2) polikarboksilat

(X) CEM II/A-S 42,5R (Blaine (m²/kg) = 355)

(Y) CEM I 52,5R (Blaine (m²/kg) = 440)

(Z) CEM I 42,5LH (Blaine (m²/kg) = 367)

3 • EKSPERIMENTALNI REZULTATI IN ANALIZA MERITEV TLAČNE TRDNOSTI BETONOV Z VISOKO TRDNOSTJO

0,28, mešanica 1600 pa 0,36. Pri različnih količinah veziva in enakem vodovezivnem razmerju namreč nismo mogli zagotoviti želene konsistence sveže betonske mešanice. Več o vplivu vodovezivnega razmerja na razvoj tlačne trdnosti betona je napisano v literaturi (Saje, 2001).

3.2 • Vpliv deleža mikrosilike na časovni razvoj tlačne trdnosti betona

Na slikah 3 do 10 je prikazan vpliv količine mikrosilike na časovni potek tlačne trdnosti betona. Na slikah 3 in 4 je podan časovni razvoj tlačne trdnosti treh betonov z oznakami 1620, 16210, 16215 z vodovezivnim razmerjem 0,40. Edina razlika med njimi je delež vsebovane mikrosilike (0, 10, 15 %). Če primerjamo te betone, opazimo, da je časovni prirast tlačne trdnosti betonov z večjo količino mikrosilike v prvih sedmih dneh njihove starosti nekoliko upočasnjen (slika 3 ter preglednica 3). Povečan delež mikrosilike v betonu pa ugodno vpliva na velikost tlačnih trdnosti po sedmih dneh starosti betona (slika 4).

Za začetek pucolanske reakcije med mikrosilikom in kalcijevim hidroksidom, je potrebna predhod-

nami veziva 600 kg/m³, 500 kg/m³ in 400 kg/m³ betona. Hidratacija cementa je kemična reakcija, ki je odvisna od sestave cementa. Pri betonih z večjo količino cementa nastane povezana struktura produktov hidratacije prej kot pri betonih z manjšo količino cementa. Ker pa več cementa pomeni več produktov hidratacije v določenem času, je pri zadostni količini vode trdnost betona z večjo količino cementa večja. Pri starosti betona 1 dan je bila tlačna trdnost betona 312 1,2-krat tolikšna kot tlačna trdnost betona 1600, tlačna trdnost betona 731 pa 1,32 krat tolikšna kot tlačna trdnost betona 1600. Pri starosti betona 90 dni pa sta razmerji tlačnih trdnosti betonov 312 in 1600 1,08, razmerji tlačnih trdnosti betonov 731 in 1600 pa 1,12. Pri tem pa moramo omeniti dejstvo, da so se omenjene tri vrste betonskih mešanic razlikovale tudi po vodovezivnem razmerju. Mešanica 731 je imela vodovezivno razmerje 0,23, mešanica 312

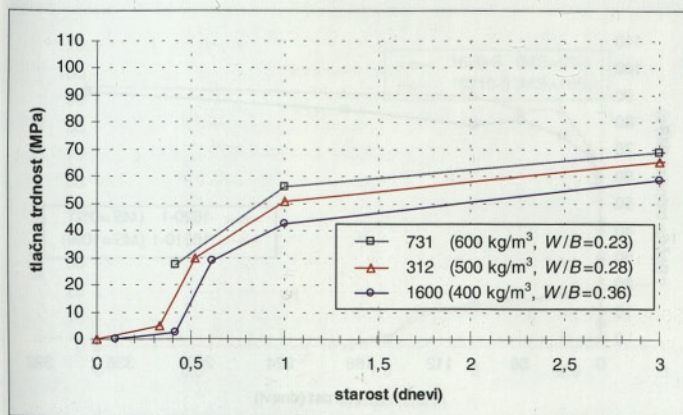
V nadaljevanju analiziramo časovni potek enosne tlačne trdnosti trinajstih različnih betonskih mešanic. Betonske kocke z robom 15 cm, na katerih smo merili tlačno trdnost betona, so bile stare od nekaj ur pa do enega leta. V analizi časovnega razvoja tlačne trdnosti betona smo zajeli vpliv količine veziva, deleža mikrosilike in vrste cementa. Tlačna trdnost betona v diagramih v nadaljevanju predstavlja povprečno vrednost več izmerjenih tlačnih trdnosti enakega betona. V preglednici 3 so za trinajst različnih betonskih mešanic in za osem različnih starosti betonov podane povprečne vrednosti tlačnih trdnosti, izmerjene na večjem številu vzorcev enakega betona (Saje, 2001).

3.1 • Vpliv količine veziva na časovni razvoj tlačne trdnosti betona

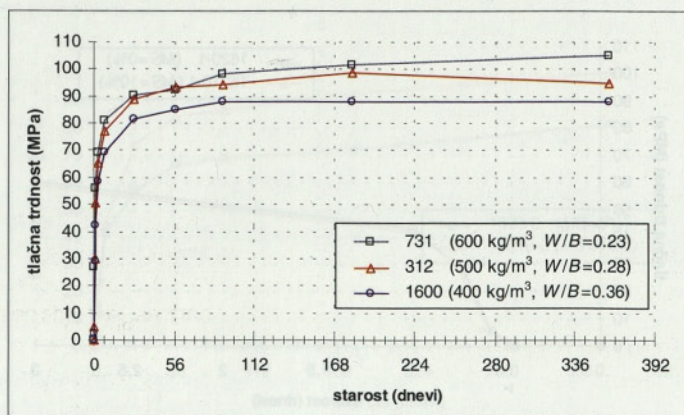
Sliki 1 in 2 prikazujeta časovni potek tlačne trdnosti treh betonov z oznakami 731, 312 in 1600 s količi-

Mešanica	Starost betona							
	Povprečna tlačna trdnost betona v MPa							
	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni	56 dni	90 dni	180 dni	360 dni
312	50,8	65,4	76,9	89,0	93,5	94,4	98,5	94,9
713	56,2	69,1	81,1	90,3	92,2	98,0	101,8	105,2
1600	42,5	58,8	69,1	81,4	85,1	87,7	88,1	88,0
1620	32,3	50,7	60,0	68,9	77,7	77,8	81,0	82,1
1620-1	42,9	60,2	67,1	74,9	81,1	78,9	84,7	91,6
1620-2	28,0	56,4	75,3	87,1	87,8	89,6	95,6	96,0
1620-3	23,3	23,3	41,6	56,9	66,7	69,3	72,2	81,1
16210	26,4	51,2	62,4	80,6	85,6	87,3	93,2	97,8
16210-1	41,6	58,9	70,1	85,0	84,4	90,1	90,9	93,3
16210-2	22,7	53,1	73,3	89,2	100,0	99,4	107,1	108,9
16210-3		23,3	45,0	74,0	84,4	86,7	92,4	100,4
16210-4	34,9	68,2	81,6	96,8	101,2	101,7	109,8	
16215	22,8	47,6	61,8	80,2	89,4	92,9	90,7	94,9

Preglednica 3 • Povprečne tlačne trdnosti betonov v MPa pri različnih starostih, izmerjene na večjem številu vzorcev



Slika 1 • Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov 731, 312 in 1600 v prvih treh dneh starosti



Slika 2 • Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov 731, 312 in 1600

na reakcija cementa in vode, katere produkt je tudi kalcijev hidroksid. V teh reakcijah iščemo vzrok začetnega počasnejšega naraščanja tlačne trdnosti betona. Ker so obravnavane mešanice vsebovale enako količino veziva (cement + mikrosilika), se je količina cementa z naraščanjem količine mikrosilike zmanjševala. Zato lahko v mešanicah brez mikrosilike v prvih urah strjevanja betona nastane več produktov hidratacije cementa, kar pomeni večjo tlačno trdnost betona brez mikrosilike v primerjavi z betonom z mikrosilikom. Pri starosti betona 1 dan je bila tlačna trdnost betona brez mikrosilike 1620 1,42-krat tolikšna kot tlačna trdnost betona 16215, pri katerem je 15 odstotkov veziva predstavljala mikrosilika. Pri kasnejših starostih betonov, to je po približno sedmih dneh, je verjetno precejšnja količina kalcijevega hidroksida, nastalega pri hidrataciji cementa, že zreagirala z mikrosilikom v kalcijev silikat hidrat in tako se je cementni kamen v betonu z mikrosilikom precej izboljšal. Mikrosilika v betonu zaradi svoje finosti zgosti strukturo cementnega kamna in izboljša stik med agregatom in cementnim kamnom, kar ima za posledico večjo tlačno trdnost otrdelega betona. Tlačna trdnost betona 16215 s 15-odstotnim deležem

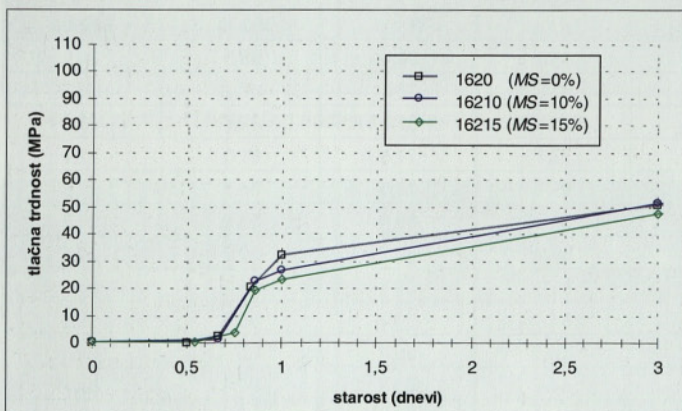
mikrosilike je bila 1,15 krat tolikšna kot tlačna trdnost betona 1620 brez mikrosilike pri 56 dneh njune starosti.

Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov 1620-2 in 16210-2 na sliki 7 potrjuje predhodno navedeno tezo, da se hitrost začetnega naraščanja tlačne trdnosti betona s povečevanjem količine mikrosilike zmanjšuje. Omenjena betona 1620-2 in 16210-2 sta po sestavi enaka kot 1620 in 16210, le da vsebujeta namesto sedimentnega pretežno metamorfni agregat. Sliki 8 in 10 pa potrjujeta tezo, da pri starostih betona, ki so višje od 7 dni, mikrosilika ugodno vpliva na velikost tlačne trdnosti.

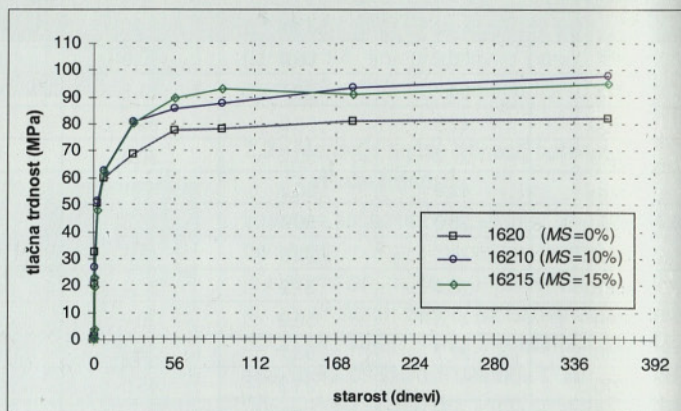
Tlačna trdnost betona 16215 (slika 4) je pri starosti betona 180 dni padla glede na tlačno trdnost betona pri starosti 90 dni za 2,2 MPa. Padec trdnosti betona pri 180 dneh, ves čas negovanega v vodi, verjetno ni realen in je lahko rezultat premajhnega števila preiskovanih vzorcev. Ker je prirast tlačne trdnosti pri starosti betona, ki je višja od 90 dni, zaradi skoraj že končanega procesa hidratacije cementa v betonih z visoko trdnostjo z nizkim vodovozivnim razmerjem relativno majhen, raztros rezultatov tlačnih trdnosti pa relativno velik, lahko premajhno število pre-

skušancev pomeni neustrezno oceno tlačne trdnosti. Problem padca tlačne trdnosti, verjetno tudi zaradi pomanjkanja števila preiskovanih vzorcev, pri 56 ali 90 dni starem betonu opazimo tudi pri betonih 1620-1 na sliki 6 in betonu 1620-2 na sliki 8.

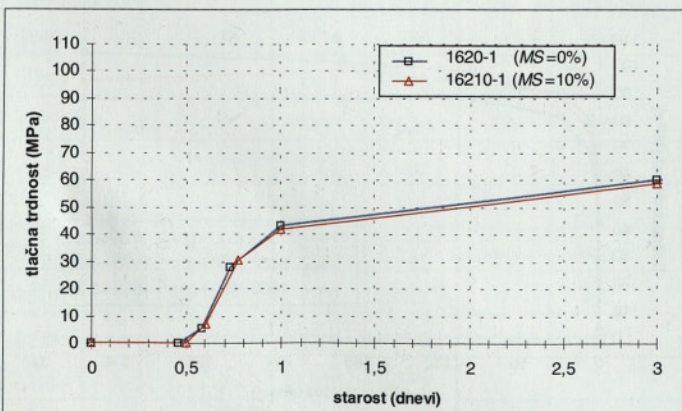
Slika 5 prikazuje časovni razvoj tlačne trdnosti betonov 1620-1 in 16210-1 z deležem mikrosilike 0 in 10 %. Oba betona vsebujeta 400 kg veziva in imata vodovozivno razmerje 0,4, vsebujeta pa čisti portlandski cement CEM I 52,5R z največjo finostjo mletja (440 m²/kg) v primerjavi z ostalimi vrstami preiskovanih cementov. Poteka tlačnih trdnosti obeh betonov v prvih treh dneh njune starosti sta skoraj enaka (slika 5). Zelo podobna pa sta poteka tlačnih trdnosti omenjenih betonov tudi po starosti betonov več kot 3 dni (slika 6). To je verjetno posledica velike specifične površine in količine uporabljenega cementa. Ker je zaradi velike specifične površine cementa ob zadostni količini vode v določenem času hidratiziranega več cementa v primerjavi s cementom manjše specifične površine in je zaradi tega struktura cementnega kamna bolj nosilna, je vpliv mikrosilike manjši. Iz tega lahko ugotovimo, da se s povečevanjem specifične površine ce-



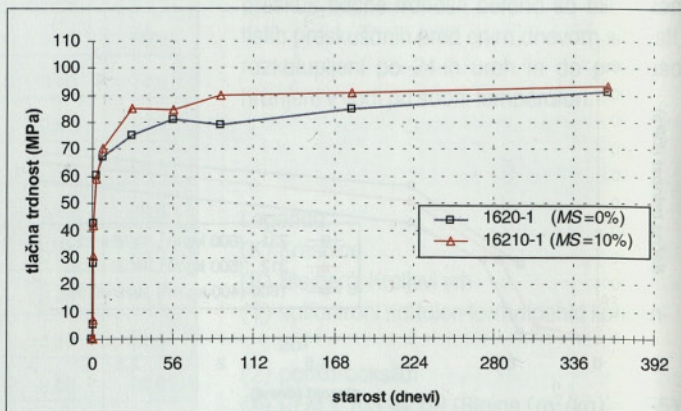
Slika 3 • Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov 1620, 16210 in 16215 v prvih treh dneh starosti.



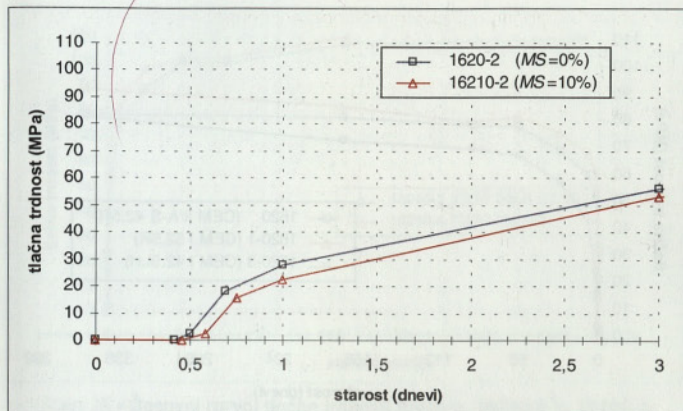
Slika 4 • Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov 1620, 16210 in 16215



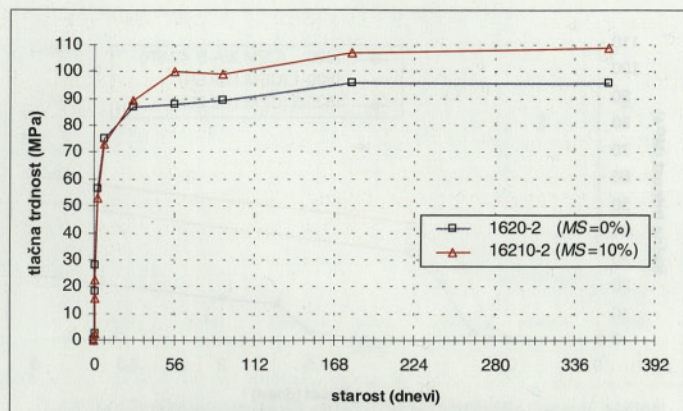
Slika 5 • Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov 1620-1 in 16210-1 v prvih treh dneh starosti.



Slika 6 • Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov 1620-1 in 16210-1.



Slika 7 • Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov 1620-2 in 16210-2 v prvih treh dneh starosti.



Slika 8 • Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov 1620-2 in 16210-2.

menta vpliv mikrosilike na velikost tlačne trdnosti betona zmanjšuje. Pri betonu z mikrosiliko je manj cementa kot pri betonu brez mikrosilike. Ker je pri uporabljenem cementu prevladujoči mineral alit, pri hidrataciji alita pa nastane 3-krat toliko kalcijevega hidroksida kot pri hidrataciji belita, je možno, da je učinek pucolanske reakcije mikrosilike s kalcijevim hidroksidom zaznaven že zelo zgodaj. Pucolanska reakcija v nadaljevanju pa omogoči večjo tlačno trdnost betona.

Betona 1620-3 in 16210-3 imata enako sestavo kot betona 1620 in 16210 (0 in 10 % mikrosilike, W/B=0,4, 400 kg/m³ veziva), le da vsebujeta cement z nizko toploto hidratacije. Ta cement vsebuje manj alita in več belita kot ostala dva preiskovana cementa (preglednica 1). Znano je (Ukrainczyk, 1994), da hidratacija alita največ prispeva k začetni trdnosti, hidratacija belita pa h končni trdnosti cementnega kamna. V našem primeru, ko gre za cement z majhnim deležem alita, imamo majhne začetne trdnosti in je zaradi tega tudi vpliv mikrosilike v prvih treh dneh skoraj zanemarljiv. Poleg tega pa pri hidrataciji belita nastane manj kalcijevega hidroksida kot pri hidrataciji alita, kar pomeni, da je pri pretežno belitem cementu na voljo manj kalcijevega hidroksida za relativno hitro pucolansko reakcijo z mikrosiliko.

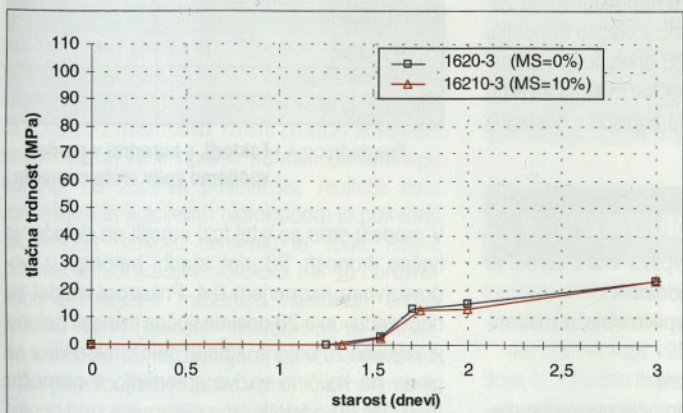
3.3 • Vpliv vrste cementa na časovni razvoj tlačne trdnosti betona

V okviru analize vpliva vrste cementa smo v preiskovanih betonih uporabili tri vrste cementa, CEM II/A-S 42,5R, CEM I 52,5R in CEM I 42,5LH. Ti cementi se medsebojno razlikujejo po finosti mletja oziroma po njihovi specifični površini (355, 440 in 367 m²/kg) in po deležih posameznih mineralov v cementnem klinkerju.

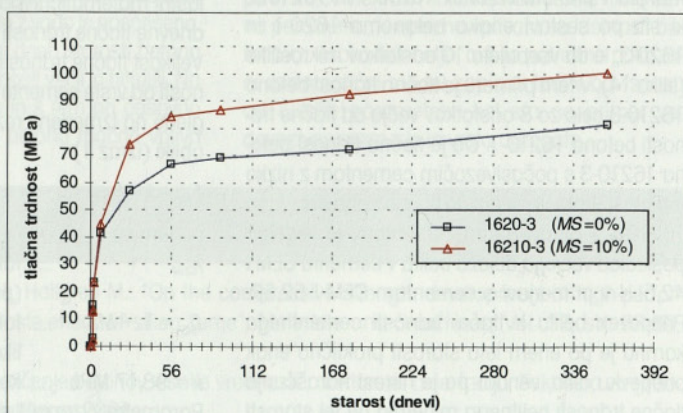
Iz primerjave poteka tlačne trdnosti betonov 1620 in 1620-1 na sliki 11 vidimo, da tlačna trdnost betona 1620-1, ki vsebuje cement z največjo specifično površino, v prvem dnevu starosti narašča hitreje kot tlačna trdnost betona 1620. Pri starosti betona en dan je bila tlačna trdnost betona 1620-1 1,33-krat tolikšna kot tlačna trdnost betona 1620 pri enaki starosti betona. Pri starosti betonov 180 dni pa je bila tlačna trdnost betona s finim cementom 1620-1 1,05-krat tolikšna kot tlačna trdnost betona 1620. Podobne razmere smo opazili tudi na slikah 13 in 15, ki prikazujeta časovni razvoj tlačne trdnosti betonov z mikrosiliko 16210 in 16210-1 ter 16210-2 in 16210-4. Na sliki 14 pa vidimo, da je prirast tlačne trdnosti betona s finim cementom in mikrosiliko 16210-1 po 90 dneh še manjši (le

3,2 MPa od 90 do 360 dni) kot pri betonu brez mikrosilike 1620-1 (12,7 MPa).

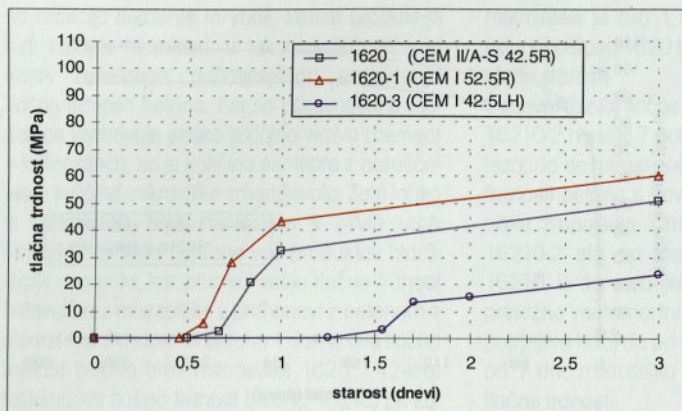
Vzrok za razlike v časovnem razvoju tlačne trdnosti omenjenih betonov je specifična površina cementa in prisotnost žindra v cementu CEM II/A-S 42,5R. Specifična površina cementa in pucolanski dodatek imata velik vpliv na proces hidratacije. Žindra je latentno hidravlično vezivo, ki potrebuje za začetek reakcije kalcijev hidroksid. Hidratacija cementa se prične na površini cementnih zrn. V primeru cementa z veliko specifično površino je v določenem času hidratiziranega več cementa, sprosti se več toplote in kemijska reakcija cementa z vodo je pospešena. Posledica tega je hitrejši in večji prirast tlačne trdnosti v prvih dneh starosti betona, kasneje, po 90 dneh pa je prirast tlačne trdnosti zanemarljivo majhen, posebno v primeru betona z mikrosiliko. Na hitrost hidratacije cementa in s tem na časovno naraščanje tlačne trdnosti betona ima velik vpliv mineraloška sestava cementnega klinkerja, kar je razvidno iz primerjave betonov 1620, 1620-1 in 1620-3, ki vsebujejo cemente CEM II/A-S 42,5R, CEM I 52,5R in CEM I 42,5LH (sliki 11 in 12). Beton z oznako 1620-3, ki vsebuje počasi vezoči cement CEM I 42,5LH, je imel pri starosti



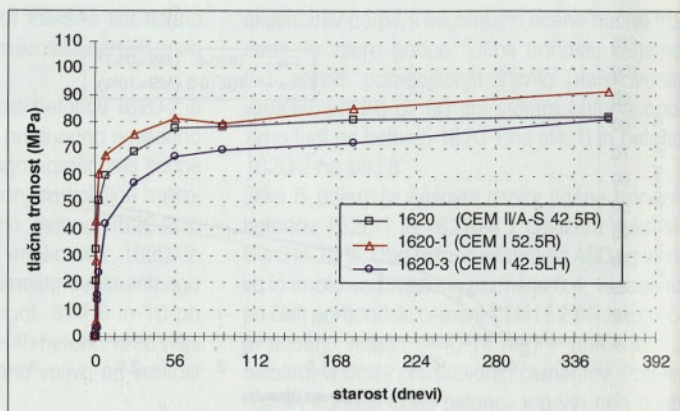
Slika 9 • Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov 1620-3 in 16210-3 v prvih treh dneh starosti.



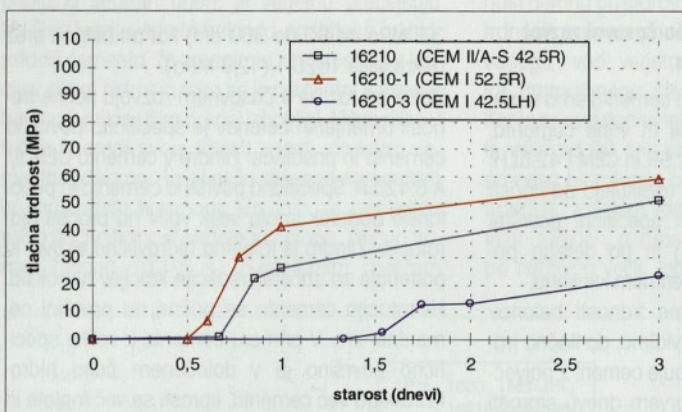
Slika 10 • Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov 1620-3 in 16210-3.



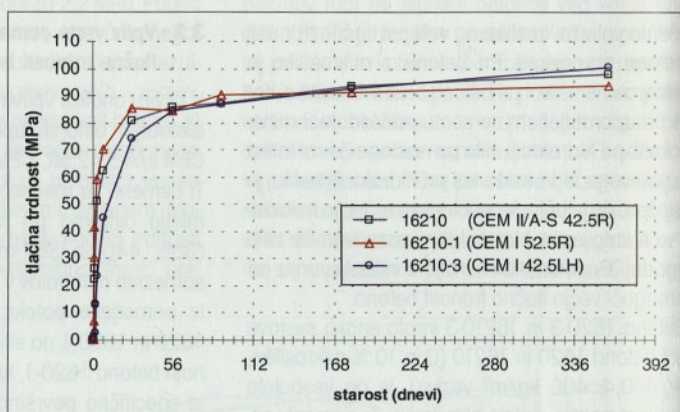
Slika 11 • Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov 1620, 1620-1 in 1620-3 v prvih treh dneh starosti



Slika 12 • Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov 1620, 1620-1 in 1620-3



Slika 13 • Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov 16210, 16210-1 in 16210-3 v prvih treh dneh starosti



Slika 14 • Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov 16210, 16210-1 in 16210-3

betona 1 dan tlačno trdnost tako majhno, da jo z uporabljenim merilno opremo ni bilo mogoče izmeriti, medtem ko je imel beton 1620-1 s čistim portlandskim cementom CEM I 52,5R pri starosti 1 dan tlačno trdnost že 42,9 MPa. Pri starosti betona 1 leto pa je razlika v tlačni trdnosti omejenih betonov bistveno manjša, in sicer je bila tlačna trdnost betona 1620-1 1,13-krat tolikšna kot tlačna trdnost betona 1620-3 (slika 12). Razlika v tlačni trdnosti pri starosti 360 dni pa je še manjša v primeru betonov 16210-1 in 16210-3, ki sta po sestavi enaka betonoma 1620-1 in 1620-3, le da vsebujeta 10 odstotkov mikrosilike (slika 14). V tem primeru je tlačna trdnost betona 16210-3 celo za 8 odstotkov večja od tlačne trdnosti betona 16210-1. Da je tlačna trdnost betona 16210-3 s počasivezočim cementom z nizko toploto hidratacije večja od tlačne trdnosti betona 16210-1 s hitrovezočim cementom, je verjetno posledica večjega deleža belita v cementu CEM I 42,5LH v primerjavi s cementom CEM I 52,5R. Prispevek belita k tlačni trdnosti cementnega kamna je po enem letu starosti praktično enak prispevku alita, vendar pa je hitrost naraščanja tlačne trdnosti belitnega minerala pri tej starosti znatno večja od alitnega, katerega tlačna trdnost je skoraj že dosegla asimptotično vrednost

(Ukrainczyk, 1994). Iz tega lahko sklepamo, da bosta tlačni trdnosti betonov 1620-3 in 16210-3, ki vsebujeta cement z večjim deležem belita, imeli večji prirastek tlačne trdnosti po enem letu starosti betona kot betona 1620-1 in 16210-1, ki vsebujeta cement z manj belita in več alita.

3.4 • Tlačna trdnost betona pri starosti betona 28 dni

Na podlagi analize rezultatov meritev smo razvili lastni matematični model za napovedovanje 28-dnevne tlačne trdnosti betona z visoko trdnostjo. Velikost tlačne trdnosti pri 28 dneh, f_{cm} , v odvisnosti od vrste cementa in količine mikrosilike smo glede na izmerjene rezultate zapisali v naslednji obliki (izraz 1)

$$f_{cm} = k \cdot f_{CEM} \cdot f_{MS} \quad (1)$$

pri tem so

f_{CEM} faktor vpliva vrste cementa (preglednica 4),

$f_{MS} = 1 + MS$ faktor vpliva deleža mikrosilike.

$k = 98,17 \text{ MPa}$ koeficient.

Parametre v izrazu 1 smo določili z uporabo metode najmanjših kvadratov na množici rezultatov naših meritev.

Velikost tlačne trdnosti pri 28 dneh je tako

$$f_{cm} = [98,17 \text{ MPa}] \cdot f_{CEM} \cdot (1+MS) \quad (2)$$

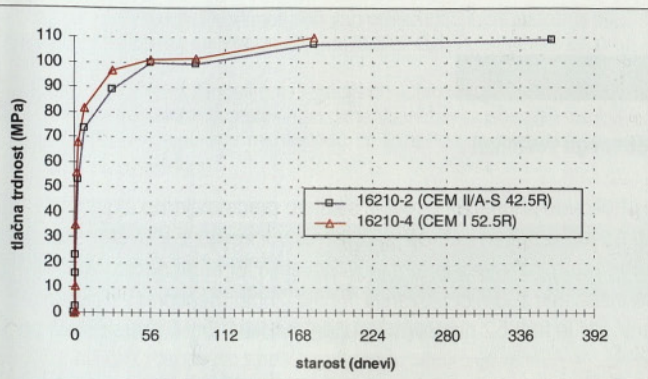
V preglednici 1 smo podali faktorje za posamezne vrste preiskovanih cementov, s katerimi v modelu za napovedovanje 28-dnevne tlačne trdnosti betona upoštevamo vpliv vrste cementa.

Vrsta cementa	f_{CEM}
CEM I 52,5R	0,75
CEM II/A-S 42,5R	0,70
CEM I 52,5LH	0,65

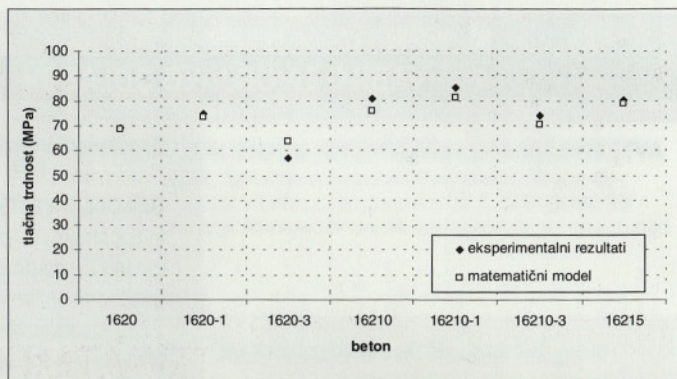
Preglednica 4 • Faktorji, s katerimi v model vpeljemo vpliv vrste cementa

V modelu smo se v tej fazi omejili na določanje tlačne trdnosti 28 dni starih betonov z vodovozivnim razmerjem 0,4. Prikazani model za napovedovanje 28-dnevne tlačne trdnosti betona je veljaven za betone, katerih delež mikrosilike se glede na količino veziva spreminja v območju med 0 in 20 odstotki.

V preglednici 5 smo zbrali izmerjene 28-dnevne tlačne trdnosti preiskovanih betonov in vrednosti,



Slika 15 • Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov 16210-2 in 16210-4



Slika 16 • Primerjava eksperimentalno določene tlačne trdnosti betona pri 28 dneh in modelirane tlačne trdnosti betona pri 28 dneh.

ki smo jih določili s predhodno opisanim matematičnim izrazom za napovedovanje 28-dnevne tlačne trdnosti betona, ter odstopanja modeliranih vrednosti od izmerjenih.

Iz primerjave eksperimentalno določene in modelirane tlačne trdnosti betona pri 28 dneh (preglednica 5 in slika 16) vidimo, da z modelom relativno dobro napovemo tlačne trdnosti betona pri 28 dneh. Največje odstopanje, to je 12,16 odstotkov, je bilo pri betonu 1620-3, kar je verjetno posledica majhnega števila preiskovanih vzorcev.

tudi razmerje posameznih mineralov v cementnem klinkerju. Večji delež alita v cementu pomeni hitrejši prirastek tlačne trdnosti v začetnem obdobju, kasneje po 90 dneh pa se naraščanje tlačne trdnosti pri pretežno alitnem cementu umiri bolj kot v primeru pretežno belitnega cementa. Pri betonu s cementom z večjim deležem belita in manjšim deležem alita je naraščanje tlačne trdnosti v začetnem obdobju strjevanja betona razmeroma počasno.

Primerjava rezultatov meritev in tlačne trdnosti betona pri 28 dneh, določene s prikazanim matematičnim modelom, pokaže, da z modelom relativno dobro napovemo tlačne trdnosti betona pri 28 dneh v odvisnosti od veziva v betonu. Ker pa vrsta cementa in količina mikrosilike nista edina parametra, ki opazno vplivata na lastnosti betonov z visoko trdnostjo, bi bilo potrebno prikazati matematični model zapisati tudi v odvisnosti od ostalih parametrov, kot sta na primer vodovozivno razmerje in vrsta agregata.

Oznaka mešanice	Eksperiment f_{cm}	Model f_{cm}	Odstopanje
1620	68,9	68,7	-0,25%
1620-1	74,9	73,6	-1,69%
1620-3	56,9	63,8	12,16%
16210	80,6	75,6	-6,21%
16210-1	85,0	81,0	-4,71%
16210-3	74,0	70,2	-5,14%
16215	80,2	79,0	-1,45%

Preglednica 5 • Primerjava eksperimentalno določene tlačne trdnosti betona pri 28 dneh in modelirane tlačne trdnosti betona pri 28 dneh.

4 • SKLEP

Raziskave vpliva količine veziva na časovni razvoj tlačne trdnosti betona so pokazale, da s povečevanjem količine veziva v betonu njegova tlačna trdnost narašča hitreje. Več cementa pomeni več produktov hidratacije v določenem času, tako da ob zadostni vodi hitreje nastaja nosilna struktura.

Pri preiskavah betonov z dodatkom mikrosilike smo ugotovili, da tlačna trdnost takšnih betonov v začetni fazi strjevanja narašča počasneje kot pa pri betonih brez mikrosilike. Tlačna trdnost betona brez mikrosilike pri starosti 1 dan je bila za 42 odstotkov večja kot tlačna trdnost betona s 15 odstotki mikrosilike. Začetno počasnejše naraščanje tlačne trdnosti betonov z dodatkom mikrosilike je posledica pucolanske reakcije kalcijevega hidroksida z mikrosiliko, katere produkt je kalcijev silikat hidrat, ki je nosilec trdnosti cementnega kamna. Za začetek pucolanske reakcije med mikrosiliko in kalcijevim hidroksidom je potrebna predhodna reakcija cementa in vode, katere produkt je tudi kalcijev hidroksid. Ker so obravnavane primerjalne mešanice vsebovale enako količino veziva (cement + mikrosilika), se je količina cementa z naraščanjem deleža mikrosilike zmanjševala. Tako je lahko v prvih urah strjevanja betona brez mikrosilike nastalo več produktov hidratacije cementa, kar pomeni večjo tlačno trdnost betona brez mikrosilike v primerjavi z betonom z

mikrosiliko. Mikrosilika pa po določenem času zreagira z nastajajočim kalcijevim hidroksidom v kalcijev silikat hidrat, kar omogoči betonu že pri starosti 28 dni večjo tlačno trdnost v primerjavi s trdnostjo betona brez mikrosilike.

Pri betonih, ki so vsebovali cement z veliko specifično površino in večinskim deležem alita, je tlačna trdnost v prvih nekaj dneh hitro naraščala, kasneje, po 90 dneh pa je bil prirastek tlačne trdnosti zanemarljivo majhen. V primeru uporabe cementa z veliko specifično površino je v določenem času hidratiziranega več cementa, sprosti se več toplote in kemijska reakcija cementa z vodo je pospešena. Zaradi tega je v prvih nekaj dneh starosti betona prirastek njegove tlačne trdnosti večji in hitrejši. Na hitrost hidratacije cementa in s tem na časovno naraščanje tlačne trdnosti betona močno vpliva

5 • LITERATURA

Kjellsen, K.O., Wallevik O.H., Hallgren M.: "On the compressive strength development of high-performance concrete and paste-effect of silica fume", *Materials and Structures*, Vol. 32, str. 63-69, Januar-Februar 1999.

Saje, D.: "Tlačna trdnost in krčenje betonov visoke vrednosti", doktorska disertacija, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 2001.

SIST EN 206-1:2003: Beton - 1. del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost, 2003.

Ukrainczyk, V.: "Beton: struktura, svojstva, tehnologija", ALCOR, Zagreb, 1994.

VABILO ZA OBJAVO OGLASOV

Spoštovani bralci Gradbenega vestnika!

GRADBENI VESTNIK je strokovno-znanstvena revija, s katero predstavljamo slovenski in tuji strokovni javnosti dosežke z vseh področij gradbeništva. Revija je tudi člansko glasilo Zveze društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije ter Matične sekcije gradbenih inženirjev pri Inženirski zbornici Slovenije. Revija izhaja mesečno v nakladi 2750 izvodov. Med naročniki je tudi 52 naslovov iz tujine, z nekaterimi tujimi naslovi pa si revijo izmenjujemo.

V Gradbenem vestniku lahko objavite oglase na različnih mestih, v različnih velikostih in po različnih cenah:

Ovitek: zadnja stran 1/1	200.000,00 SIT
Notranja stran 1/1	150.000,00 SIT
Notranja stran 2/3	130.000,00 SIT
Notranja stran 1/2	100.000,00 SIT
Notranja stran 1/3	75.000,00 SIT
Notranja stran 1/4	40.000,00 SIT

V cenah ni upoštevan DDV.

Oglas lahko pripravite v:

- rasterskih formatih JPEG, TIFF, EPS
- formatu CDR (ver 8.0 ali manj), pri čemer je potrebno vse črke spremeniti v krivulje.

Vsebine je mogoče poslati z redno pošto na naslov: GRADBENI VESTNIK, Karlovška 3, 1000 Ljubljana ali po e-pošti na naslov gradb.zveza@siol.net

V pričakovanju Vašega sodelovanja
Vas topla pozdravljamo!

ZDGITS – izdajateljica
GRADBENEGA VESTNIKA

NOVI DIPLOMANTI GRADBENIŠTVA

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Boštjan Gorela, Uspešnost investiranja v izgradnjo stanovanjskega objekta vila Portorož, mentorica doc. dr. Maruška Šubic Kovač
Rafael Rudolf, Ekonomski vidiki izvedbe investicijsko vzdrževalnih del poslovnega objekta, mentor izr. prof. dr. Albin Rakar, somentor as. mag. Aleksander Srdić
Uroš Selan, Nekateri vidiki vrednotenja nepremičnin za potrebe obdavčenja na primeru Občine Vrhnika, mentorica doc. dr. Maruška Šubic Kovač
Vesna Vidmar, Računalniške analize možnih načinov sanacije plazu med P-247 in P-266 na HC Razdrto – Vipava, mentor doc. dr. Janko Logar, somentor as. dr. Boštjan Pulko

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Andrej Humar, Toplotni mostovi, mentor izr. prof. dr. Aleš Krainer, somentor red. prof. dr. Jožef Peternejl
Aleš Klobasa, Avtomatske parkirne hiše, mentor doc. dr. Tomaž Maher, somentor as. dr. Peter Lipar

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ VODARSTVA IN KOMUNALNEGA INŽENIRSTVA

Tjaša Župec, Modeliranje membranskih procesov pri čiščenju odpadnih voda, mentor doc. dr. Jože Panjan

DOKTORSKI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

mag. ERIK ZUPANČIČ, Rotacijska kapaciteta spojev jeklenih konstrukcij, mentor red. prof. dr. Darko Beg

mag. Mario Krzyk, Dvodimenzionalno matematično modeliranje toka v strmih strugah, mentor izr. prof. dr. Matjaž Četina, somentor izr. prof. dr. Matjaž Mikoš

mag. Darko Drev, Modeliranje filtracijskih in biokemijskih procesov pri različnih substratih in pretokih pri dimenzioniranju rastlinskih čistilnih naprav in precejalnikov, mentor doc. dr. Jože Panjan, somentor izr. prof. dr. Daniel Vrhovšek

UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Darko Lipič, Primerjava tehnik terminskega planiranja za viadukt Ločica, mentor red. prof. dr. Mirko Pšunder

UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO – EKONOMSKO POSLOVNA FAKULTETA

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GOSPODARSKEGA INŽENIRSTVA

Katarina Gajšek, Tehnična in ekonomska upravičenost uporabe superplastifikatorja v betonu, mentorja red. prof. dr. Radimir Ilič in izr. prof. dr. Tanja Markovič Hribnik, somentorica as. mag. Lucija Hanžič

Rubriko ureja • **Jan Kristjan Juteršek**, univ. dipl. inž. grad.

KOLEDAR PRIREDITEV

7.3. - 10.3.2004

ASCE Conference

Engineering, Construction and
Operation in Challenging
Environments
Houston, Texas, ZDA

28.3. - 31.3.2004

2004 ITE Technical Conference and Exhibit

California, ZDA
www.ite.org/meetcon/index.html
ite_staff@ite.org

29.3. - 4.4.2004

Bauma 2004

München, Nemčija
www.bauma.de
info@imag.de

30.3. - 2.4.2004

Intertraffic Amsterdam

Amsterdam, Nizozemska
www.intertraffic.com/events/events_list.asp
intertraffic@rai.nl

31.3. - 2.4.2004

Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena

Bochum, Nemčija
<http://balkema.ima.nl/instructions.htm>

4.4. - 7.4.2004

9th International Symposium on Concrete Roads

Istanbul, Turčija
secretariat@cembureau.be

6.4. - 10.4.2004

MEGRA 2004

gradbeni sejem
Gornja Radgona, Slovenija
info@pomurski-sejem.si

12.4. - 15.4.2004

Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures

Vail, Colorado, ZDA

17.4. - 22.4.2004

North American Tunneling Conference 2004

Atlanta, Georgia, ZDA
<http://balkema.ima.nl/instructions.htm>

26.4. - 28.4.2004

Concrete Structures: The Challenge of Creativity

Avignon, Francija

2.5. - 7.5.2004

CIB World Building Congress 2004

Toronto, Ontario, Kanada
www.cib2004.ca
cib2004@nrc.ca

12.5. - 14.5.2004

3rd Euroasphalt and Eurobitume Congress

Dunaj, Avstrija
www.eecongress.org
info@eecongress.org

16.5. - 19.5.2004

Conference IWCSE 2004
Cold Regions Engineering
Edmonton, Kanada

24.5. - 28.5.2004

MIPRO 2004
Opatija, Hrvatska
www.mipro.hr
mipro@ri.htnet.hr

9.6. - 11.6.2004

4. Posvetovanje slovenskih geoteknikov in 5. Šukljejev dan
Rogaška Slatina, Slovenija

14.6. - 17.6.2004

8th World Conference on Timber Engineering
Lahti, Finska
www.ril.fi/wcte2004
kaisa.vanalanen@ril.fi

24.6. - 26.6.2004

Bridges across the Danube-
Bridges in Danube Basin
Novi Sad, Srbija in Črna Gora

5.7. - 7.7.2004

SEMC 2004 Conference
Structural Engineering,
Mechanics and Computation
Cape Town, Južna Afrika

18.7. - 23.7.2004

Composite Construction V
International Conference
Mpumalanga, Južna Afrika
www.engconfintl.org/4ab.html
a_kemp@civil.wits.ac.za

20.7. - 23.7.2004

Conference ACMBS-IV
Advanced Composite Materials in Bridges and Structures
Calgary, Kanada

1.8. - 6.8.2004

13th World Conference on Earthquake Engineering
Vancouver, Kanada
www.venuewest.com/13wcee
13wcee@venuewest.com

23. - 25.8.2004

Technologies for Deep Water and Remote Offshore
Developments
Lizbona, Portugalska
www.oceanresearchconference.com

7.9.2004

ITC@EDU WORKSHOP
Istanbul, Turčija
http://2004.ecppm.org

8. - 10.9.2004

ECPPM Conference
European Conference on Product and Process Modelling in the
AEC Industry
Istanbul, Turčija
http://2004.ecppm.org

12.9 - 16.9.2004

8th Conference on Asphalt Pavements
for Southern Africa with the theme Roads-
the Arteries of Africa
Sun City, Južna Afrika
http://asac.csir.co.za/capsa
patloots@iafrica.com

19.9 - 24.9.2004

Metropolitan Habitats and Infrastructure
IABSE Symposium
Shanghai, Kitajska
www.iabse.ethz.ch/conferences/Shanghai/Shanghai_f.htm
secretariat@iabse.ethz.ch

29.9 - 1.10.2004

Interoute 2004 Congress and Trade Fair
Montpellier, Francija
www.exposium.fr

19.10 - 22.10.2004

IABMAS Conference
Bridge Maintenance, Safety and Management
Kyoto, Japonska

20. - 22.10.2004

7. slovenski kongres o cestah in prometu
Portorož, Slovenija
DRC, Masarykova 14, Ljubljana

21. - 23.10.2004

Durability and Maintenance of Concrete Structures
Dubrovnik, Hrvatska
secon@grad.hr

28.10 - 31.10.2004

ISEAT 2004
4th International Symposium on Asphalt Emulsion Technology
Washington DC, ZDA
www.aema.org
krissoff@aema.org

9. - 12.2.2005

IABSE Conference
Role of Structural Engineers Towards Reduction of Poverty
New Delhi, Indija
www.iabse.org

Rubriko ureja • **Jan Kristjan Juteršek**, ki sprejema predloge
za objavo na e-naslov: **msg@izs.si**