





Gradbeni vestnik • GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE in MATIČNE SEKCIJE GRADBENIH INŽENIRJEV INŽENIRSKO ZBORNICE SLOVENIJE

UDK-UDC 05 : 625; ISSN 0017-2774
Ljubljana, junij 2013, letnik 62, str. 117-140

Izdajatelj:

Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS), Karlovška cesta 3, 1000 Ljubljana, telefon 01 52 40 200; faks 01 52 40 199
v sodelovanju z **Matično sekcijo gradbenih inženirjev Inženirske zbornice Slovenije (MSG IZS)**, ob podpori **Javne agencije za knjigo RS, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani in Zavoda za gradbeništvo Slovenije**

Izdajateljski svet:

ZDGITS: **mag. Andrej Kerin**
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: **doc. dr. Milan Kuhta**
ZAG: **akad. prof. dr. Miha Tomaževič**

Glavni in odgovorni urednik:

prof. dr. Janez Duhovnik

Sodelavec pri MSG IZS:

Jan Kristjan Juteršek

Lektor:

Jan Grabnar

Lektorica angleških povzetkov:

Darja Okorn

Tajnica:

Eva Okorn

Oblikovalska zasnova:

Mateja Goršič

Tehnično urejanje, prelom in tisk:

Kočevski tisk

Naklada:

3400 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 števil. Letna naročnina za individualne naročnike znaša 23,16 EUR; za študente in upokojene 9,27 EUR; za družbe, ustanove in samostojne podjetnike 171,36 EUR za en izvod revije; za naročnike iz tujine 80,00 EUR. V ceni je všteti DDV.

Poslovni račun ZDGITS pri NLB Ljubljana:
SI56 0201 7001 5398 955

Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

1. Uredništvo sprejema v objavo znanstvene in strokovne članke s področja gradbeništva in druge prispevke, pomembne in zanimive za gradbeno stroko.
2. Znanstvene in strokovne članke pred objavo pregleda najmanj en anonimen recenzent, ki ga določi glavni in odgovorni urednik.
3. Članki (razen angleških povzetkov) in prispevki morajo biti napisani v slovenščini.
4. Besedilo mora biti zapisano z znaki velikosti 12 točk in z dvojnimi presledki med vrsticami.
5. Prispevki morajo vsebovati naslov, imena in priimke avtorjev z nazivi in naslovi ter besedilo.
6. Članki morajo obvezno vsebovati: naslov članka v slovenščini (velike črke); naslov članka v angleščini (velike črke); znanstveni naziv, imena in priimke avtorjev, strokovni naziv, navadni in elektronski naslov; oznako, ali je članek strokoven ali znanstven; naslov POVZETEK in povzetek v slovenščini; ključne besede v slovenščini; naslov SUMMARY in povzetek v angleščini; ključne besede (key words) 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 ti označeni še z A, B, C itn.
7. Poglavlja in razdelki so lahko oštevilčeni. Poglavlja se oštevilčijo brez končnih pik. Denimo: 1 UVOD; 2 GRADNJA AVTOCESTNEGA ODSEKA; 2.1 Avtocestni odsek ... 3 ...; 3.1 ... itd.
8. Slike (risbe in fotografije s primerno ločljivostjo) in preglednice morajo biti razporejene in omenjene po vrstnem redu v besedilu prispevka, oštevilčene in opremljene s podnapisi, ki pojasnjujejo njihovo vsebino.
9. Enačbe morajo biti na desnem robu označene z zaporedno številko v okroglem oklepaju.
10. Kot decimalno ločilo je treba uporabljati vejico.
11. Uporabljena in citirana dela morajo biti navedena med besedilom prispevka z oznako v obliki oglatih oklepajev: (priimek prvega avtorja ali kratica ustanove, leto objave). V istem letu objavljena dela istega avtorja ali ustanove morajo biti označena še z oznakami a, b, c itn.
12. V poglavju LITERATURA so uporabljena in citirana dela razvrščena po abecednem redu priimkov prvih avtorjev ali kraticah ustanov in opisana z naslednjimi podatki: priimek ali kratica ustanove, začetnica imena prvega avtorja ali naziv ustanove, priimki in začetnice imen drugih avtorjev, naslov dela, način objave, leto objave.
13. 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.
14. Prispevke je treba poslati v elektronski obliki v formatu MS WORD glavnemu in odgovornemu uredniku na e-naslov: janez.duhovnik@fgg.uni-lj.si. V sporočilu mora avtor napisati, kakšna je po njegovem mnenju vsebina članka (pretežno znanstvena, pretežno strokovna) oziroma za katero rubriko je po njegovem mnenju prispevek primeren.

Uredništvo

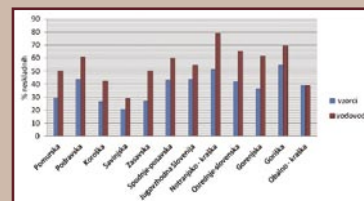
Vsebina • Contents

Članki • Papers

stran 118

doc. dr. Darko Drev, univ. dipl. inž. kem. inž.
izr. prof. dr. Jože Panjan, univ. dipl. inž. grad.

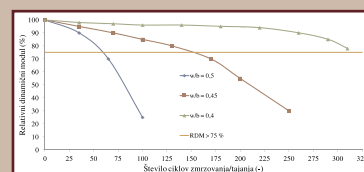
PROBLEMATIKA NEUSTREZNE KAKOVOSTI PITNE VODE NA KRAŠKEM OBMOČJU IN MOŽNE REŠITVE POOR QUALITY OF DRINKING WATER IN KARST AREAS AND POSSIBLE SOLUTIONS



stran 124

Primož Jelušič, univ. dipl. gosp. inž.
doc. dr. Samo Lubej, univ. dipl. inž. grad.
doc. dr. Andrej Ivanič, univ. dipl. inž. grad.

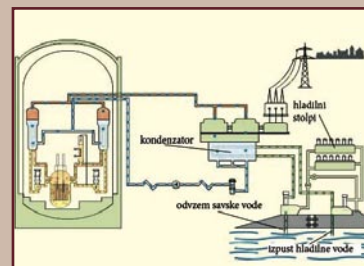
ODPORNOST BETONA Z DODATKOM RECIKLIRANE GUME PROTI ZMRZOVANJU IN TAJANJU FREEZE-THAW DURABILITY OF CONCRETE WITH RECYCLE TIRE RUBBER AND CHEMICAL ADMIXTURES



stran 131

prof. dr. Matjaž Četina, univ. dipl. inž. grad.
prof. dr. Rudolf Rajar, univ. dipl. inž. grad.
Vanja Hatič, univ. dipl. inž. grad.
dr. Andrej Širca, univ. dipl. inž. grad.

MATEMATIČNO MODELIRANJE TOPLOTNE OBREMENITVE SPODNJE SAVE PRI NUKLEARNI ELEKTRARNI KRŠKO MATHEMATICAL MODELING OF THERMAL POLLUTION OF LOWER SAVA RIVER AT THE NUCLEAR POWER PLANT KRŠKO



Obvestila ZDGITS

stran 140

ZADNJI PRIPRAVLJALNI SEMINAR IN IZPITNA ROKA ZA STROKOVNE IZPITE ZA GRADBENO STROKO V LETU 2013

Novi diplomanti

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

Koledar prireditev

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

Slika na naslovnici: Helidrom v Univerzitetnem kliničnem centru v Ljubljani,
foto Janez Duhovnik

PROBLEMATIKA NEUSTREZNE KAKOVOSTI PITNE VODE NA KRAŠKEM OBMOČJU IN MOŽNE REŠITVE

POOR QUALITY OF DRINKING WATER IN KARST AREAS AND POSSIBLE SOLUTIONS

doc. dr. Darko Drev, univ. dipl. inž. kem. inž.

darko.drev@izvrs.si

IzVRS, Hajdrihova 28 c, 1000 Ljubljana,

izr. prof. dr. Jože Panjan, univ. dipl. inž. grad.

joze.panjan@fgg.uni-lj.si

UL FGG, Jamova 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 551.44:628.1.033

Povzetek | Na kraških območjih ni ostre meje med površinskimi in podzemnimi vodami. Zato se onesnažena površinska voda hitro odrazi na kakovosti podtalnice. Če niso ustrezno upoštevana osnovna merila sanitarnega inženirstva, pogosto pride do neustrezne kakovosti vode v vodnih zajetjih. To je še posebno izraženo v času povečanih padavin, ko postane voda motna. Sestava ter velikost in porazdelitev delcev motne vode sta pokazali, da je za razrešitev tega problema najprimernejša membranska filtracija.

Ključne besede: pitna voda, vodovodni sistemi, sanitarno inženirstvo

Summary | One prominent feature of the Karst areas is the lack of sharp boundaries between surface water and groundwater. As a consequence, surface water contamination quickly results in a decrease in the quality of groundwater. If adequate compliance with sanitary engineering principles is not ensured, underground drinking water reservoirs may be easily contaminated. This is particularly evident during periods of significant precipitation, when water becomes cloudy. Our analysis of the composition and size distribution of particles in cloudy water showed that membrane filtration is the preferred method for the resolution of this problem.

Keywords: drinking water, water systems, sanitary engineering

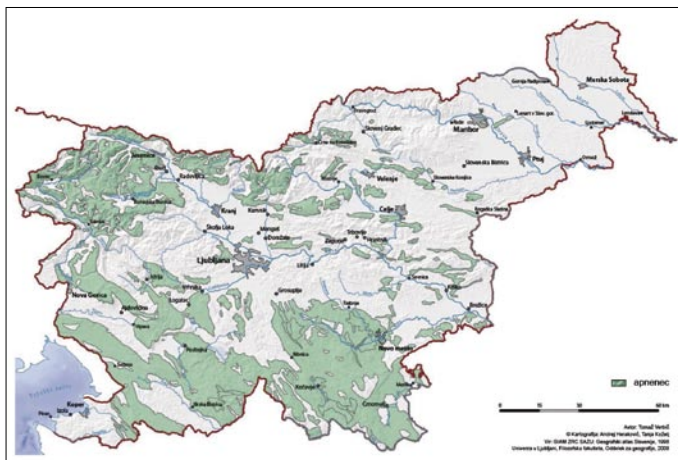
1 • UVOD

V Sloveniji se vodovodni sistemi napajajo večinoma iz podtalnice (MZ, 1998–2011). Več kot 50 odstotkov zemljišč v Sloveniji je kraških (Gams, 2004). Na slikah 1 in 2 sta prikazani površini tal Slovenije, pokriti z apnencem in dolomitom (GIAM, 1998). Samo v severovzhodni Sloveniji je struktura tal drugačna. Iz kraškega ozemlja so izvzete tudi doline z debelo plastjo naplavin. Na kraškem zemljišču ni ostre meje med površinskimi in

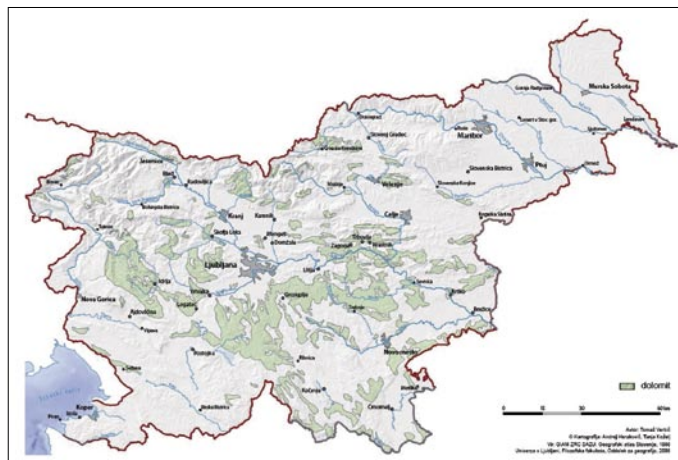
podzemnimi vodami. Zato lahko onesnažene površinske vode močno vplivajo na kakovosti podtalnice. Tudi onesnaževanje iz kmetijstva, industrije in prebivalstva se hitro odrazi na podtalnici. Zato je zelo pomembno, da so vodna zajetja ustrezno varovana z vodo-varstvenimi območji.

Na vodovarstvenih območjih moramo upoštevati ustrezne ukrepe za varovanje podtalnice (RS, 2011). Velik problem je neustrezna

kmetijska raba zemljišč. To je splošna težava, ki ni povezana le s kraškimi zemljišči. Vpliv neustrezne rabe kmetijskih zemljišč na podtalnico je odvisen predvsem od debeline in vrste zemlje, ki ločuje zgornjo plast zemlje od podzemne vode. Če je relativno kratka pot vode, ki pronica skozi zemeljske plasti iz vrha do podzemne vode, je čiščenje relativno slabo. Pomembna je tudi sestava zemeljskih plasti. Na primer glina, bentoniti in zeoliti so naravni ionski izmenjevalci, ki zadržujejo različne kovinske katione in NH_4^+ (Coonery, 1999). Čez takšne materiale je tudi slaba prepustnost vode, ker so delci glina zelo

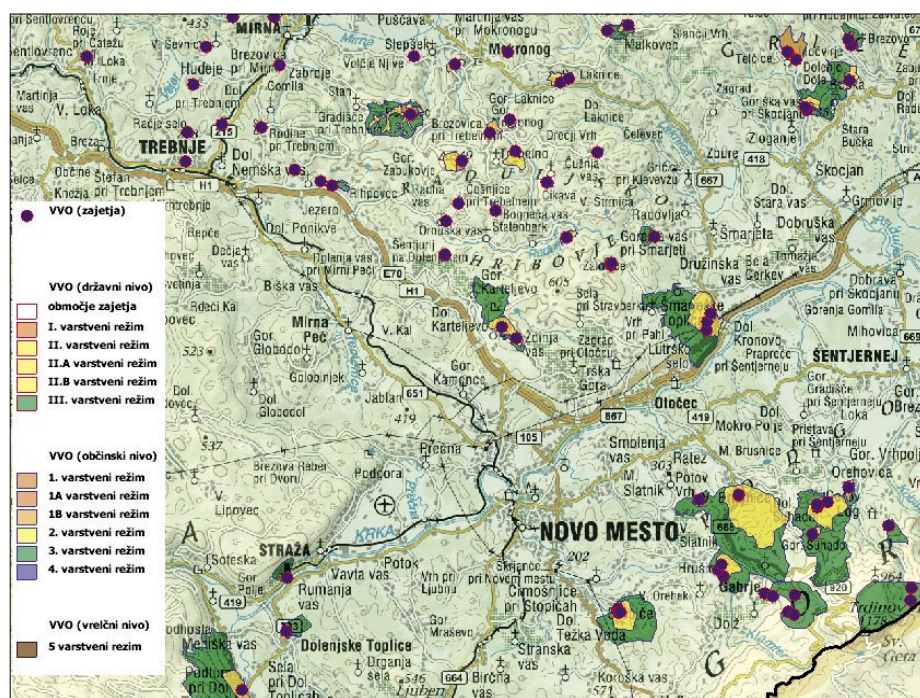


Slika 1 • Površina Slovenije, na kateri je prisoten apnenec (GIAM, 1998)



Slika 2 • Površina Slovenije, na kateri je prisoten dolomit (GIAM, 1998)

fini. Bistveno drugače pa je pri peščenih tleh. Prepustnost vode je zelo velika, vezanje nečistoč pa je relativno majhno, saj zemlja nima kakšne posebne adsorpcijske sposobnosti. Opravlja pa se lahko biološko čiščenje, podobno kot na precejalnikih in biofiltrih. Še hitrejše onesnaženje podzemne vode predstavlja onesnažena površinska voda. Ker na Krasu ni ostre meje med površinskimi in podzemnimi vodami (Gams, 2004), je lahko onesnaženje podzemne vode neposredno. Za izpuste iz industrije in komunalnih čistilnih naprav v vodotoke na Krasu ne obstajajo ostrejši kriteriji. Odpadna voda iz male komunalne čistilne naprave ima na iztoku v okolje predpisane samo vrednosti za KPK 150 mg O₂/L in BPK₅ 30 mg O₂/L, vsi preostali parametri, vključno z mikrobiološkimi onesnaževali, pa niso predpisani. Tudi pri tehnoloških odpadnih vodah, ki odteka v okolje, niso predpisani mikrobiološki parametri. Zato se lahko odrazi odpadna voda iz čistilne naprave, ki nima ustreznih stopnje za mikrobiološko čiščenje, kot jo ima mikrobiološka onesnaženost vode v vodnem zajetju. Podobno velja za izpuste tehnoloških odpadnih voda ((RS, 2009b), (RS, 2010a), (RS, 2010b)). Vodna zajetja so praviloma izbrana tako, da je vpliv onesnaževanja čim manjši (RS, 2011). To pomeni, da na kakovost podzemne vode ne vplivajo industrijski onesnaževalci in izpusti iz komunalnih čistilnih naprav. Vodna zajetja morajo biti v



Slika 3 • Prikaz vodovarstvenih pasov na delu Dolenjske (ARSO, 2013)

čim večji meri zavarovana tudi pred vplivi iz kmetijstva. Žal to v praksi pogosto ne drži. Kot kaže slika 3, na kateri so prikazana vodovarstvena območja na območju Trebnja in Novega mesta, lahko ugotovimo, da nekatera vodna zajetja sploh nimajo ustreznih vodovarstvenih pasov. Podobna situacija je tudi v drugih delih Slovenije (ARSO, 2013).

Pri pregledu stanja kakovosti pitnih voda v slovenskih javnih vodovodnih sistemih ugotavljamo, da obstajajo velike razlike v odstotkih neskladnih vzorcev med majhnimi, srednjimi in velikimi vodovodnimi sistemi (MZ, 1998–2011). To se odraža bistveno bolj pri mikrobioloških parametrih kot pa pri fizikalno-kemijskih.

2 • METODOLOGIJA

Pridobili in obdelali smo različne baze podatkov o vodovodnih sistemih v Sloveniji,

letnih poročil o kontroli kakovosti pitne vode v Sloveniji za obdobje 1998–2011 (MZ, 1998–

2011), stanje tehnike priprave pitne vode, predpise s področja pitnih voda itd.

Na dveh vodnih zajetjih, na katerih se pojavlja motnost v času povečanih padavin, smo analizirali velikost, porazdelitev delcev in njihovo sestavo.

Fizikalno-kemijske analize smo opravljali po predpisanih metodah (RS, 2009a). Velikost in porazdelitev delcev smo določali z aparaturο Frisch. Merili smo velikosti delcev od 0,08 do 42,30 μm .

V nadaljevanju besedila je velikost javnih vodovodov podana glede na število prebivalcev, ki se oskrbujejo s pitno vodo iz vodovoda:

- 50 do 1000 prebivalcev – mali vodovodni sistem,

- 1001 do 10000 prebivalcev – srednji vodovodni sistem,
- nad 10.000 prebivalcev – veliki vodovodni sistem.

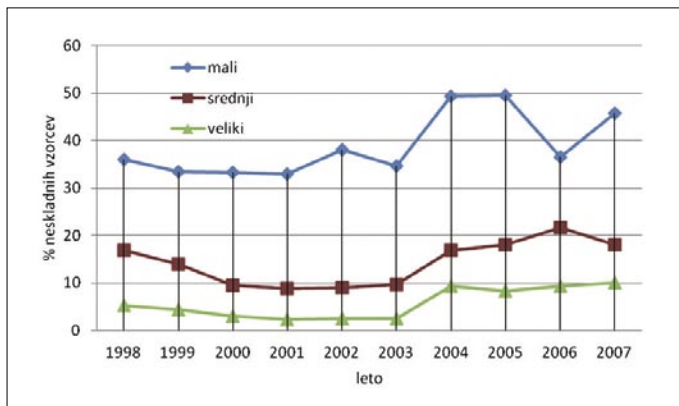
3 • RAZISKAVA

Pri pregledu stanja kakovosti pitnih voda v slovenskih javnih vodovodnih sistemih ugotavljamo, da obstajajo velike razlike v odstotku neskladnih vzorcev med majhnimi, srednjimi in velikimi vodovodnimi sistemi. To se odraža bistveno bolj pri mikrobioloških parametrih kot pa pri fizikalno-kemijskih (sliki 4 in 5). Na slikah 4, 5 in 6 so upoštevani rezultati monitoringov kakovosti voda na mestih uporabe. Te monitoringe opravljajo regionalni zavodi za zdravstveno varstvo. Izpeljani so strokovno in predstavljajo dokaj realno stanje kakovosti pitne vode na posameznem vodovodu. Kon-

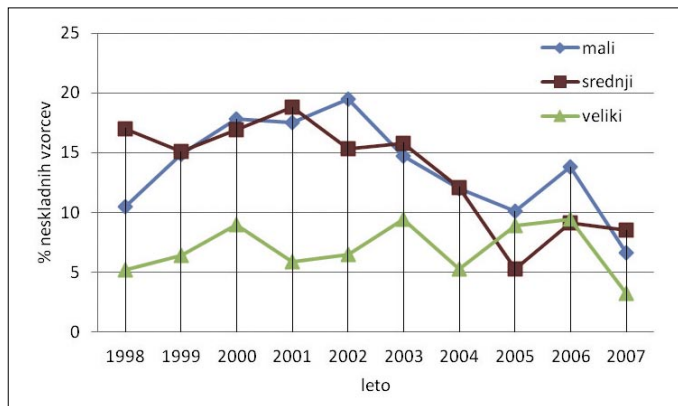
trola kakovosti vode na vodnih zajetjih pa ni predmet predpisanega državnega monitoringa, temveč je definirana v HACCP-elaboratih za posamezne vodovode. Ti interni monitoringi so zato večinoma slabi tako kot tudi HACCP-elaborati. Njihova glavna pomanjkljivost je v tem, da se preiskave pogosto ne opravljajo ali pa se takrat, ko je stanje dobro. Glavni razlog za neustrezno kakovost pitne vode na malih vodovodnih sistemih je neustrezna priprava pitne vode (MZ, 1998–2011). Z relativno enostavnimi postopki čiščenja je mogoče v večini primerov zagotoviti

zdravstveno neoporečno pitno vodo ((EPA, 2005), (EPA, 2011)). Če vodna zajetja niso ustrezno varovana, povrh vsega pa nimajo niti dezinfekcije, ni čudno, da regionalni zavodi za zdravstvo ugotavljajo tako slabo stanje.

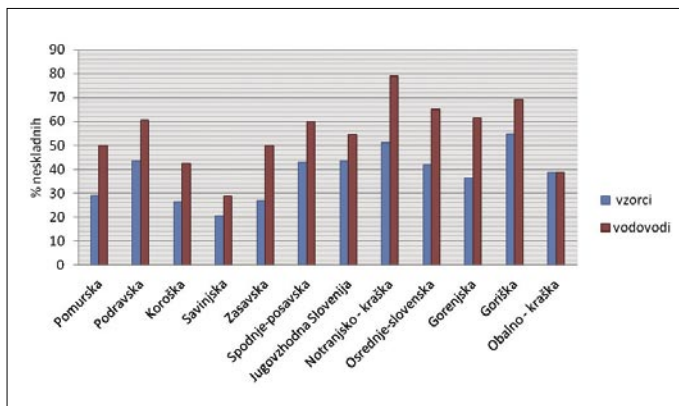
V nadaljevanju obravnavamo dva velika vodovoda, pri katerih se zelo hitro opazi vpliv meteoroloških voda na kakovost vode na vodnem zajetju (Dolenjska, Gorenjska). V prvem primeru navajamo le rezultate meritev močnosti v času padavin in sušnem obdobju. Rezultatov fizikalno-kemijskih preiskav v času padavin pa ni na razpolago, ker pri internem monitoringu izbirajo izključno čas, ko je neoporečna kakovost pitne vode. Zato teh rezultatov ne navajamo.



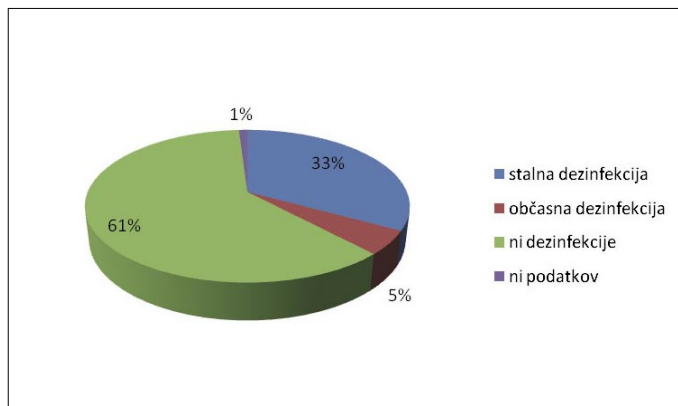
Slika 4 • Mikrobiološka neskladnost kakovosti pitne vode v javnih vodovodnih sistemih Slovenije v desetletnem obdobju 1998–2007 (IVZ, 1998–2007)



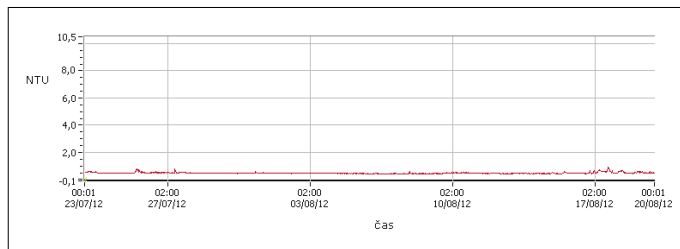
Slika 5 • Fizikalno-kemijska neskladnost kakovosti pitne vode v javnih vodovodnih sistemih Slovenije v desetletnem obdobju 1998–2007 (IVZ, 1998–2007)



Slika 6 • Delež neskladnih vzorcev pitne vode vodovodnih sistemov, ki oskrbujejo od 50 do 1000 prebivalcev v letu 2011 (MZ, 2012)



Slika 7 • Delež izvajanja dezinfekcije na vodovodnih sistemih v Sloveniji leta 2010 (100 odstotkov je število vseh vodovodnih sistemov) (MZ, 2010)

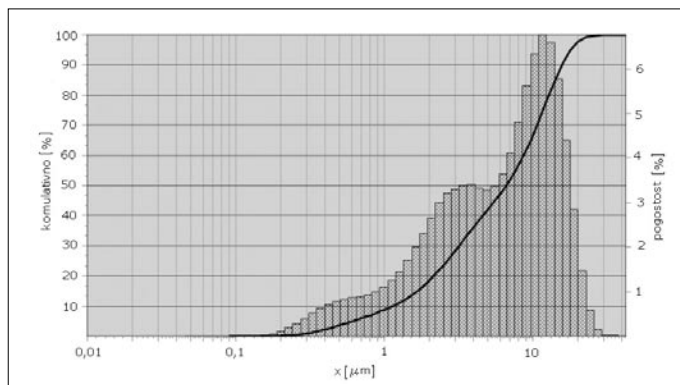


Slika 9 • Meritev motnosti na vodnem zajetju na Dolenjskem v času suše leta 2012

Sestava delcev v preglednicah 2 in 3 kaže na to, da so delci v relativno velikem deležu organ-

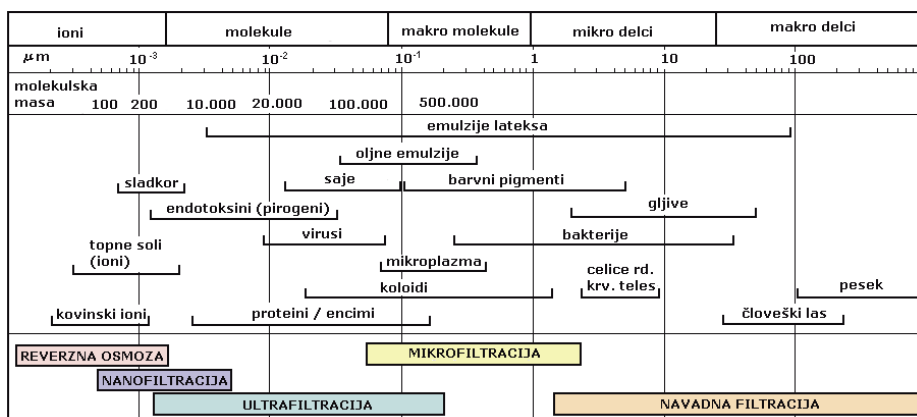
Parameter	Enota	Zajetje 1	Zajetje 2
Povprečni premer delcev	µm	6,5	7,6
Neraztopljene snovi	mg/L	82	63
Delež neraztopljenih snovi	%	63	41
Delež raztopljenih snovi	%	27	59
Delež mineralnih snovi	%	65	55
Delež organskih snovi	%	35	45

Preglednica 1 • Preiskava vode iz zajetja 1 in 2 na Gorenjskem v času povečane motnosti



Slika 11 • Porazdelitvena krivulja velikosti delcev v podtalnici iz vodnega zajetja 2 na Gorenjskem v času povečane motnosti

V zadnjem času se pogosto odločajo projektanti vodovodov za ultrafiltracijske membrane. Takšne membrane odstranijo poleg



Slika 12 • Vrste membranske filtracije glede na velikost delcev (DOW, 2010)

Parameter	Rezultat	Enota	Mejna vrednost
Amonij	0,03	mg/L	< 0,50
Barva	0,6	m ⁻¹	-
Celotni organski ogljik – TOC	3,5		
Elektroprevodnost (20 °C)	183	μS/cm	< 2500
Železo	406	μg/L	< 200
Mangan	14	μg/L	< 50
Motnost	33,2	NTU	-
Oksidativnost	2,3	mg O ₂ /L	< 5,0
pH-vrednost	7,91		6,5–9,5
Raztopljeni organski ogljik – DOC	3,5		

Preglednica 2 • Fizikalno-kemijska preiskava vode iz zajetja 1 na Gorenjskem v času padavin (november 2012)

Parameter	Rezultat	Enota	Mejna vrednost
Amonij	0,02	mg/L	< 0,50
Barva	0,5	m ⁻¹	-
Celotni organski ogljik – TOC	3,1		
Elektroprevodnost (20 °C)	196	μS/cm	< 2500
Železo	148	μg/L	< 200
Mangan	8,9	μg/L	< 50
Motnost	22,1	NTU	-
Oksidativnost	2	mg O ₂ /L	< 5,0
pH-vrednost	8,06		6,5–9,5
Raztopljeni organski ogljik – DOC	3,1		

Preglednica 3 • Fizikalno-kemijske preiskave vode iz zajetja 2 na Gorenjskem v času padavin (november 2012)

bakterij in virusov tudi oljne emulzije, koloidne delce, endotoksine, encime itd. (EPA, 2005). V konkretnem primeru takšnih onesnaževal ne pričakujemo, zato bi mikrofiltracijska membrana z velikostjo por 0,1 μm povsem zadostovala.

Na vodnem zajetju 1 so vsi fizikalno-kemijski parametri v dovoljenih mejah, na vodnem zajetju pa je prisotnega dvakrat več železa, kot je dovoljeno.

Z UV-dezinfekcijo se dovolj učinkovito odstrani mikrobiološko onesnaženje. To kažejo rezultati

preiskav v preglednicah 4 in 5. Vendar pa to velja za le vodno zajetje in ne za celotno vodovodno omrežje. Če se izpusti v vodovodno omrežje motna voda, se lahko v omrežju kmalu razvijejo mikroorganizmi. To kažejo rezultati monitoringa kakovosti pitne vode na mestih uporabe, ki ga izvaja regionalni zavod za zdravstveno varstvo (MZ, 1998–2012). Rezultatov teh preiskav ne podajamo, ker gre za veliko število analiz. Iz rezultatov je očitna povezava med motno vodo na vodnih zajetjih in zdravstveno ustreznostjo vode iz pip.

Na kakovost vode iz pip imajo velik vpliv tudi interna vodovodna omrežja v posameznih stavbah. Posamezni uporabniki lahko vodo dodatno očistijo, pri nekaterih pa se kontaminira zaradi neustreznega internega omrežja.

Kadar je voda motna, se zaradi preventivne zdravstvene zaščite prebivalstva praviloma priporoča prekuhavanje vode pred uporabo.

Iz preglednice 6 je razvidno, da je voda na vodnem zajetju 1 v normalnih razmerah čista in ne potrebuje dodatnega čiščenja. Podobno velja tudi za vodno zajetje 2.

Parameter	Vrednost	Enota	Mejna vrednost
Koliformne bakterije v 100 ml	73,8	MPN/100 MPN	0
<i>Escherichia coli</i> v 100 ml	3,1	MPN/100 MPN	0
Število kolonij pri 22 °C v 1 ml	> 300	CFU/ml	100
Število kolonij pri 37 °C v 1 ml	35	CFU/ml	20
<i>Clostridium perfringens</i> v 100 ml	< 4	CFU/100 CFU	0
Enterokoki v 100 ml	4	CFU/100 CFU	0

Preglednica 4 • Mikrobiološke preiskave vode iz zajetja 1 na Gorenjskem pred UV-dezinfekcijo v času padavin (november 2012)

Parameter	Pred UV	Za UV	Enota
<i>Escherichia coli</i> v 100 ml pitne vode	2	0	MPN/100 MPN
<i>Clostridium perfringens</i> v 100 ml	< 4		CFU/100 CFU
Koliformne bakterije v 100 ml	200,5	0	MPN/100 MPN
Število kolonij (CFU) pri 37 °C v 1 ml	23	0	CFU/ml
Število kolonij (CFU) pri 22 °C v 1 ml	> 300	12	CFU/ml
Enterokoki v 100 ml	11		CFU/100 CFU

Preglednica 5 • Mikrobiološke preiskave vode iz zajetja 2 na Gorenjskem pred UV-dezinfekcijo in za njo v času padavin (november 2012)

Parameter	Rezultat	Enota	Mejna vrednost
Amonij	< 0,02	mg/l	< 0,50
Motnost	0,22	NTU	-
Barva	< 0,1	m-1	-
Elektroprevodnost (20 °C)	223	µS/cm	< 2500
Oksidativnost	0,4	mg O ₂ /l	< 5,0
pH-vrednost	8,02		6,5–9,5

Preglednica 6 • Fizikalno-kemijske preiskave vode na vodnem zajetju 1 v času normalnega obratovanja (februar 2012)

4 • SKLEPI

Letna poročila o kakovosti pitnih voda na javnih vodovodih v Sloveniji izkazujejo, da veliko malih vodovodnih sistemov ne zagotavlja zdravstveno neoporečne pitne vode (MZ, 1998–2011). Stanje kakovosti pitne vode za srednje in velike vodovodne sisteme je boljše, vendar pa so kljub temu nekateri vzorci neustrezni. Ko analiziramo razloge, ugotovimo, da mnoga vodna zajetja za male vodovode nimajo ustreznih vodovarstvenih pasov (ARSO, 2013). Poleg tega področna zakonodaja premalo upošteva naravne danosti glede zaledja vodnega vira, tj., ali gre za kraško ali drugo zaledje. Zato lahko slabo očiščene odpadne vode iz malih komunalnih čistilnih naprav in iz tehnoloških virov onesnaževanja na kraškem ozemlju zelo hitro onesnažijo podzemne vode.

Obravnavana primera motnosti vode na vodnih zajetjih na Dolenjskem in Gorenjskem kaže na to, da se padavine hitro odrazijo pri povečanju motnosti in poslabšanju tudi drugih parametrov. V času brez povečanih padavin pa je voda čista.

Porazdelitveni krivulji velikosti delcev v vodah vodnih zajetij 1 in 2 v času velike motnosti kažejo, da so delci velikosti med 0,3 µm in 15 µm. Povprečni premer delca je približno 7 µm. Za odstranjevanje takšnih delcev je primerna mikrofiltracijska membrana.

Če želimo iz vode odstranjevati še viruse in ostanke večjih organskih molekul (mineralna olja, mehčala, ostanki pesticidov itd.), je bolje, da izberemo ultrafiltracijsko membrano. Vendar pa teh onesnaževal v obravnavanih vod-

nih zajetjih ne pričakujemo. Z UV-dezinfekcijo se dovolj učinkovito uniči vse bakterije (EPA, 2011). To kažejo tudi rezultati mikrobioloških preiskav pred UV- in za UV-dezinfekcijo na vodnem zajetju 2. S tem pa ne zagotovimo zdravstveno neoporečne pitne vode na mestih uporabe. Motna voda, ki pride v vodovodni sistem, kmalu postane ustrezno gojišče za razvoj mikroorganizmov. V obravnavanih primerih sestavljajo motnost v velikem deležu (35 do 45 odstotkov) tudi organske snovi. Mikrobiološka kontaminacija vode je mogoča na več mestih vodovodnega sistema in na internih vodovodnih omrežjih posameznih stavb. Zato je prav, da na vodnem zajetju odstranimo vse delce, ne glede na to, ali so anorganskega ali organskega izvora. Zaradi mikrobiološke varnosti je smiselno na koncu priprave vode tudi minimalno kloriranje (0,1–0,2 mg/L).

5 • LITERATURA

- ARSO – Agencija Republike Slovenije za okolje, Atlas okolja, www.arso.gov.si, 2013.
- Coonery, E., Booker, N., Ammonia Removal from Wastewaters Using Natural Australian Zeolite, II Pilot – Scale Study Using Continuous Packed Column Process, Separation Science and Technology, 34(14), 1999.
- Dow, Dow Chemical Company, Water & Process Solution, Filmetc™ Reverse Osmosis Membranes, Technical Manual, 2010.
- EPA-United States Environmental Protection Agency, Membrane filtration guidance manual, EPA 815-R-06-009, 2005.
- EPA-United States Environmental Protection Agency, Water Treatment Manuals: Disinfection, 2011.
- Gams, I., Kras v Sloveniji, 2. Pregledna izdaja, Založba ZRC, 2004.
- GIAM ZRC SAZU, 1998, Geografski atlas Slovenije, Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo, 2008.
- MZ – Ministrstvo za zdravje Republike Slovenije, in IVZ, Inštitut za varovanje zdravja Republike Slovenije, Letna poročila o monitoringu pitne vode v Sloveniji za leta: 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012.
- RS, Republika Slovenija, NUV, Uredba o načrtu upravljanja voda za vodni območji Donave in Jadranskega morja, Ur. l. RS, št. 61/2011.
- RS, Republika Slovenija, Pravilnik o pitni vodi, Uradni list RS, št. 19/2004, 35/2004, 26/2006, 92/2006, 25/2009a.
- RS, Republika Slovenija, Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih vod v vode in javno kanalizacijo, Uradni list RS, št. 47/2005, 45/2007, 79/2009b.
- RS, Republika Slovenija, Uredba emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode iz malih komunalnih čistilnih naprav, Uradni list RS, št. 97/2007, 30/2010a.
- RS, Republika Slovenija, Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode iz komunalnih čistilnih naprav, Uradni list RS, št. 45/2007, 63/2009, 105/2010b.

ODPORNOST BETONA Z DODATKOM RECIKLIRANE GUME PROTI ZMRZOVANJU IN TAJANJU

FREEZE-THAW DURABILITY OF CONCRETE WITH RECYCLE TIRE RUBBER AND CHEMICAL ADMIXTURES

Primož Jelusič, univ. dipl. gosp. inž.

primoz.jelusic@um.si

doc. dr. Samo Lubej, univ. dipl. inž. grad.

samo.lubej@um.si

doc. dr. Andrej Ivanič, univ. dipl. inž. grad.

andrej.ivanic@um.si

Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo,
Smetanova 17, 2000 Maribor

Znanstveni članek

UDK 665.9:691.3:699.86

Povzetek | Odpadne gume in elektrofiltrski pepel se zbirajo v velikih količinah, zato njihova uporaba prispeva k reševanju problema onesnaževanja okolja. V članku je predstavljena receptura betonske mešanice z dodatkom reciklirane gume kot nadomestkom dela agregata in z elektrofiltrskim pepelom kot delnim nadomestkom cementa. Tak beton ustreza trdnostnemu razredu C12/15 in je primeren za izdelavo podložnih betonov. Na laboratorijskih preizkušanjih so bili analizirani vplivi reciklirane gume in elektrofiltrskega pepela na notranjo odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju. Ugotovljeno je bilo, da je za doseganje notranje odpornosti betona potrebno povečanje prostornine por z dodatkom aeranta.

Ključne besede: beton, reciklirana guma, elektrofiltrski pepel, aerant, odpornost betona

Summary | Scrap tires and fly ash are being generated and accumulated in large volumes causing an increasing threat to the environment. There are mechanical, environmental and economic reasons to include recycled rubber and fly ash in concrete mixture. The concrete mixture with recycled rubber and fly ash is presented. Concrete used in foundations of non-load bearing structures should be a minimum strength classification of C12/15. In the paper, the freeze-thaw resistance of rubber included concrete with fly ash were investigated. Rubber included concrete is not freeze-thaw resistant, without entrained air.

Keywords: concrete, recycled rubber, fly ash, air-entrainer, resistance of concrete

1 • UVOD

Problematika odpadkov je čedalje bolj aktualna, saj njeno reševanje ni samo moralna, ampak tudi zakonodajna obveza. Ponovna uporaba industrijskih odpadkov je ključnega pomena pri reševanju problema onesnaževanja okolja.

V gradbeništvu je že znana uporaba elektrofiltrskega pepela (EFP) kot stranskega produkta pri izogrevanju premoga, s katerim lahko delno nadomestimo cement in s tem zmanjšamo stroške betona. Zaloge mineralnega agregata

so v naravnem okolju omejene, zato je smiselno razmišljati tudi o primernih nadomestkih. Ker se odpadne gume zbirajo v velikih količinah in s tem predstavljajo veliko obremenitev okolja, lahko takšen delni nadomestek naravnega agregata predstavlja reciklirana guma (RG) različnih velikosti in oblik.

Beton z dodatkom RG ima številne prednosti pred navadnim betonom, kot so večja de-

formabilnost, manjša toplotna prevodnost in boljša odpornost proti zmrzovanju in tajanju (Popit, 2012). Številni raziskovalci so preučili vpliv vsebnosti RG na tlačno, upogibno in natežno trdnost ter na statični in dinamični modul elastičnosti ((Topcu, 1995), (Toutanji, 1996), (Benazzouk, 2006), (Ganijani, 2009), (Son, 2011)). Vpliv RG na odpornost proti zmrzovanju in tajanju betona pa je še vedno slabo raziskan (Oikonomou, 2009). Pomembna ugotovitev na tem področju je, da pri cementni pasti z dodanimi delci gume opazimo zmanjšanje količine kapilarne vode, manjšo hitrost absorpcije vode in manjšo odprto poroznost (Segre, 2001).

Štranski produkti industrijskih panog (EFP, mikosilika, žlindra, metakaolin) se uporabljajo v betonu kot hidravlični dodatki, ki lahko delno nadomestijo cement, ki je najdražja komponenta betona. EFP je najpogostejše uporabljen dodatek, ki nastaja pri izogrevanju premoga in premogovega prahu. Uporaba EFP v betonu je zanimiva za raziskovalce povsod po svetu, zato so vplivi EFP na fizikalne in mehanske lastnosti betona podrobno raziskani (Siddique, 2003). Namen raziskav je bil izdelati recepturo za beton trdnostnega razreda C 12/15, kjer smo delež agregata nadomestili z RG, delež cementa pa z EFP. Tak beton se v

praksi lahko uporablja kot podložni beton in je pogosto izpostavljen zmrzovanju in tajanju. Odpornost strjenega betona proti zmrzovanju in tajanju se bistveno izboljša z namenskim povečanjem prostornine por. To povečanje lahko dosežemo z aerantom, kot je navedeno v literaturi ((Bates, 1952), (Lerch, 1960), (Pinto, 2001)). Vpliv aeranta in EFP na odpornost proti zmrzovanju in tajanju betona z dodatkom RG je bil raziskan na podlagi eksperimenta. Kot delni nadomestek agregata so bili uporabljeni gumeni sekanci iz silikonske gume, EPDM in EPM, ki so odporni proti vplivu staranja (UV-obsevanje).

2 • NOTRANJA ODPORNOST BETONA PROTI ZMRZOVANJU/TAJANJU

2.1 Opis mehanizma zmrzovanja in tajanja betona

Delovanje mehanizma nastanka poškodb v betonu so opisali ((Collins, 1944), (Powers, 1956), (Pigeon, 1995)). Na zmrzlinso odpornost betona vplivajo predvsem lastnosti cementnega kamna in agregata. Odpornost agregata proti zmrzovanju in tajanju je odvisna tudi od poroznosti, absorpcije, prepustnosti in strukture por v agregatu. Za zagotovitev dobre zmrzlinse odpornosti betona je treba zagotoviti mineralni agregat z nizko prepustnostjo in visoko trdnostjo. Pri grobozrnatih agregatih, ki imajo kapilarni sistem prekinjen s številnimi makroporami, ne pride do propada zrn, četudi agregat absorbira veliko vode, ker so makropore prevelike za zadrževanje vlage zaradi kapilarnosti.

Odpornost agregata proti zmrzovanju in tajanju lahko ocenimo na dva načina:

- (1) na podlagi preteklih izkušenj in
- (2) na podlagi laboratorijskih testov zmrzovanja/tajanja betonskih preizkušancev.

Če so agregati iz znanega nahajališča predhodno dali zadovoljive rezultate, jih lahko smatramo za primerne.

Voda, ki je prodrla v beton, ob zmrzovanju poveča svojo prostornino za 9 %. Med zmrzovanjem v kapilarnih porah nastane hidravlični pritisk. Velikost hidravličnega pritiska je odvisna od prepustnosti materialov, oddaljenosti do mest, kjer se lahko pritisk sprosti, in hitrosti, s katero nastaja led. Hidravlični pritisk v kapilarnih porah ne nastane, če te niso popolnoma zasičene.

(Powers, 1975) je pojasnil tudi rast ledenih kristalov pri konstantni temperaturi pod 0 °C.

Led, ki nastane v porah, ima nižjo koncentracijo alkalij in kloridov kot voda. Potovanje raztopljenih snovi skozi polprepustno sredstvo (kapilare) v smeri nižje koncentracije se imenuje osmoza. V cementnem kamnu torej nastane osmotski tlak zaradi razlike v koncentraciji alkalnih raztopin.

2.2 Vpliv aeranta na notranjo odpornost betona proti zmrzovanju/tajanju

Glede na velikost in nastanek lahko pore v betonu razdelimo na gelne pore, kapilare in zračne mehurčke. Odpornost strjenega betona proti zmrzovanju in tajanju v vlažnem stanju se bistveno izboljša z namenskim povečanjem prostornine zračnih mehurčkov, kar dosežemo z aerantom. Raziskovalca ((Bates, 1952), (Lerch, 1960)) sta prikazala vpliv prostornine zračnih mehurčkov na odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju. Ugotovila sta, da se betonu brez dodatka aeranta relativni dinamični modul zmanjša za 50 % že pred izvedbo 200 ciklov zmrzovanja in tajanja. Z dodatkom aeranta in prostornino por 4 % pa se število ciklov zmrzovanja in tajanja poveča za osemkrat.

Zračni mehurčki v betonu delujejo kot prazne komore v cementnem kamnu, kamor lahko voda vstopi in zmrzne. Tako hidravlični pritiski, ki povzročajo propad betona, ne nastanejo. V procesu tajanja se voda večinoma vrne v kapilare. Zračni mehurčki v betonu so ponovno prazni in omogočajo vstop vode v naslednjem ciklu zmrzovanja. Hidravlični pritiski zaradi povečanja prostornine vode so odvisni predvsem od razdalje, ki jo mora voda prepotovati do najbližjega zračnega mehurčka. Zato

morajo biti zračni mehurčki dovolj blizu, da je pritisk manjši od natezne trdnosti cementnega kamna. Intenziteta hidravličnega pritiska je odvisna tudi od hitrosti zmrzovanja, stopnje zasičenosti, prepustnosti cementnega kamna in razdalje med porami ter od velikosti por. Beton je odporen proti zmrzovanju in tajanju, če je razdalja med porami manjša od 0,2 mm (Powers, 1965) in specifična površina por večja od 24 mm²/mm³. Vpliv razdalje med zračnimi mehurčki na zmrzlinso odpornost betona so raziskovali ((Klieger, 1952), (Klieger, 1956), (Klieger, 1966), (Powers, 1965), (Whiting, 1998)). Korelacijo med prostornino por in razdaljo med porami je podal tudi (Pinto, 2001).

2.3 Vpliv EFP na notranjo odpornost betona proti zmrzovanju/tajanju

V tehnologiji betona je poznano, da imajo betoni, ki vsebujejo več kot 20 % EFP na maso cementa, manjšo poroznost od betona brez tega dodatka. Povprečni premer zrna EFP znaša od 0,015 mm do 0,02 mm. EFP povečuje obdelavnost svežega betona, podaljšuje proces hidratacije, omogoča večjo trdnost in zmanjšuje poroznost. Nižja toplota hidratacije zmanjša zgodnjo trdnost betona. EFP se lahko uporablja kot hidravlični dodatek pri izdelavi cementa in kot dodatek pri izdelavi betona. EFP zmanjša tudi porabo vode oziroma poveča pretočnost svežega betona. Z zmanjšano količino vode se zmanjša krvavenje betona in prav tako tudi krčenje betona. EFP poveča tlačno trdnost betona zaradi pucolanske aktivnosti. Ker pa je pucolanska aktivnost počasna, beton počasi pridobiva trdnost. Struktura betona postane gostejša, kar zmanjša prepustnost betona.

ASTM C618 razdeli EFP na tri skupine: (1) razred F: manj kot 5 % CaO, (2) razred C: več

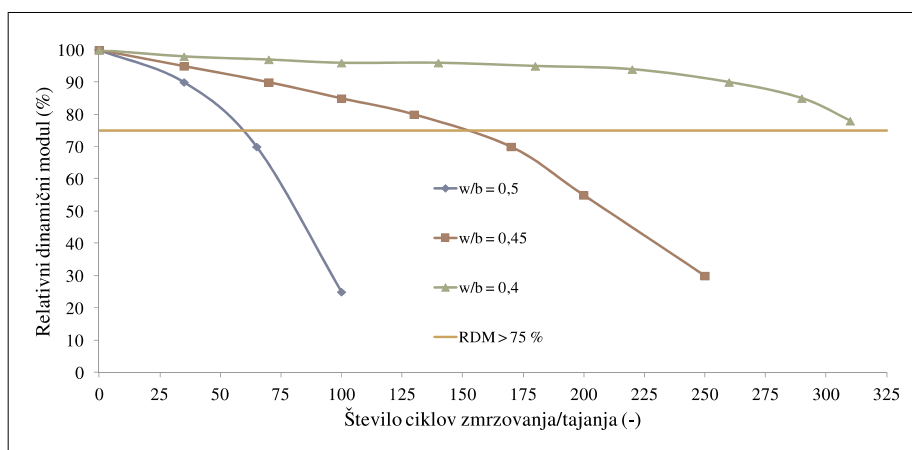
kot 10 % CaO (z žganjem lignita) in (3) razred N (Siddique, 2003). Lastnosti EFP so odvisne od njihove kemične sestave.

2.4 Metode preskušanja odpornosti betona proti zmrzovanju/tajanju

Odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju se poveča, če uporabimo mineralni agregat, ki je zmrzljivo obstojen. Zagotoviti moramo nizko vodovezivno razmerje (maksimalno 0,45) ob minimalni količini cementa 335 kg/m³ svežega betona. Beton je treba pravilno negovati, da doseže minimalno trdnost 28 MPa (Pinto, 2001).

Tudi beton z majhno prostornino por je bolj odporen proti zmrzovanju in tajanju, če se uporabi nizko vodovezivno razmerje. Slika 1 prikazuje vpliv vodovezivnega razmerja na trajnost betona brez dodatkov aeranta.

Odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju se lahko določi na različne načine. Ena izmed metod je določitev izgube mase vzorca po določenem številu ciklov zmrzovanja in tajanja. Druga metoda je merjenje spremembe transversalne frekvence nihanja, iz katere lahko izračunamo dinamični modul elastičnosti. Po standardu SIST 1026:2004 se notranja odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju ugotavlja z relativnim dinamičnim



Slika 1 • Vpliv vodovezivnega razmerja na trajnost betona brez dodatkov aeranta (Pinto, 2001)

modulom (RDM) elastičnosti betona po N -ciklih zmrzovanja/tajanja. Beton je odporen proti zmrzovanju in tajanju, če pri 28-dnevni starosti in po predpisanem številu ciklov zmrzovanja in tajanja znaša RDM najmanj 75 %. Število ciklov N je lahko 50 ali 100, kar je odvisno od predvidene stopnje izpostavljenosti betona zmrzovanju in tajanju v objektu.

Odpornost betona lahko določimo tudi s faktorjem odpornosti (D_f). Standard ASTM C 666:2008 definira faktor odpornosti z enačbo:

$$D_f = \frac{N \times RDM (\%) }{300}, \quad (1)$$

kjer je N število ciklov, RDM pa relativni dinamični modul pri številu ciklov N .

Standard ASTM C 666 priporoča zmrzovanje do 300 ciklov oziroma dokler RDM ni manjši od 60 % začetne vrednosti. Točni kriteriji za odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju niso določeni. Faktor odpornosti se pogosto uporabi zgolj za primerjavo med različnimi betoni. Beton ni odporen proti zmrzovanju/tajanju, če je faktor odpornosti D_f manjši od 40.

3 • EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 Uporabljeni materiali

Za izdelavo betonskih vzorcev je bil uporabljen cement Portland proizvajalca Lafarge Cement iz Trbovelj, z oznako Modri cement CEM II/B-M (W-L) 42.5 N. Z EFP je bilo nadomeščenih 30 % količine vezi-

va, uporabljena sta bila dva različna tipa EFP. V preglednici 1 sta podani kemični sestavi EFP. Uporabljena pepela se razlikujeta tudi po specifični površini, ki za EFP TIP 1 znaša 5025 cm²/g, za EFP TIP 2 pa 3288 cm²/g.

	EFP – TIP 1 % (m/m)	EFP – TIP 2 % (m/m)
Žarilna izguba pri 950 °C	2,63	0,41
Netopni ostanek	10,23	16,67
SiO ₂ v netopnem ostanku	5,77	13,08
SiO ₂ , čisti	42,82	47,62
SiO ₂ , raztopljeni	0,48	0,64
SiO ₂ , celokupni	43,30	48,26
SiO ₂ , reaktivni	37,53	35,18
CaO, reaktivni	8,01	7,65
SO ₃	1,88	1,88
CaO, prosti	1,22	2,00

Preglednica 1 • Rezultati laboratorijskih analiz EFP, ki jih določa standard SIST EN 450-1

Uporabljeni naravni mineralni agregat je bil drobljenec dolomitnega izvora (iz nahajališča Golubovec) z največjim zrnem 16 mm. Uporabljene so bile tri frakcije drobljenega agregata: 0/4 mm, 4/8 mm in 8/16 mm. Sekanci RG frakcije 0/8 mm, dobavljeni iz podjetja Sava Kranj, so bili uporabljeni kot delno nadomestilo naravnega mineralnega agregata. S sekanci je bilo nadomeščenih 10 % naravnega mineralnega agregata. Namensko povečanje prostornine por v betonski mešanici smo dosegli z dodatkom aeranta (Kemacol LPA), ki smo ga dozirali v količini 0,65 % na skupno maso veziva.

3.2 Priprava preizkušancev

Betonske mešanice so bile zamešane z laboratorijskim mešalcem kapacitete 56 litrov in hitrostjo 56 obr./min. Čas mešanja je znašal 5 minut. Sledila je določitev konsistence z metodo poseda po določitih standarda SIST EN 12350-2. Beton v kalupu je bil zgoščen z vibracijsko mizo pri frekvenci 3600 obr./min. in amplitudo 0,75 ± 0,1 mm. Recepture betonskih mešanic so podane v preglednici 2, iz katere je razvidno, da je bilo izdelanih pet

različnih mešanic. Izračun mase posameznih frakcij agregata je bil narejen po enačbi Fuller (Fuller, 1907).

Sveži beton je bil vgrajen v standardne kalupe dimenzij 400/100/100 mm. Izdelanih je bilo 27 vzorcev, in sicer:

- 3 vzorci po recepturi 1 (R1-1, R1-2, R1-3),
- 6 vzorcev po recepturi 2 (R2-1, R2-2, R2-3, R2-4, R2-5, R2-6),
- 6 vzorcev po recepturi 3 (R3-1, R3-2, R3-3, R3-4, R3-5, R3-6),
- 6 vzorcev po recepturi 4 (R4-1, R4-2, R4-3, R4-4, R4-5, R4-6),
- 6 vzorcev po recepturi 5 (R5-1, R5-2, R5-3, R5-4, R5-5, R5-6).

Standard SIST 1026:2004 določa, da je treba izdelati najmanj tri preskušance betona iste vrste. Zaradi še vedno neraziskanega vpliva kombinacije RG, EFP in aeranta na zmrzlin-sko odpornost betona je bilo izdelanih 6 preskušancev pri recepturah R2, R3, R4 in R5. Vzorci so bili razopaženi po 24 urah in položeni v kad z vodo temperature $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Po treh dneh so bili vzorci prestavljeni v komoro s stalno vlago $> 95\%$ in temperaturo $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Pred začetkom preizkusa so bili vzorci štiri dni v vodi, ki je segala približno 2 cm nad njihovo površino.

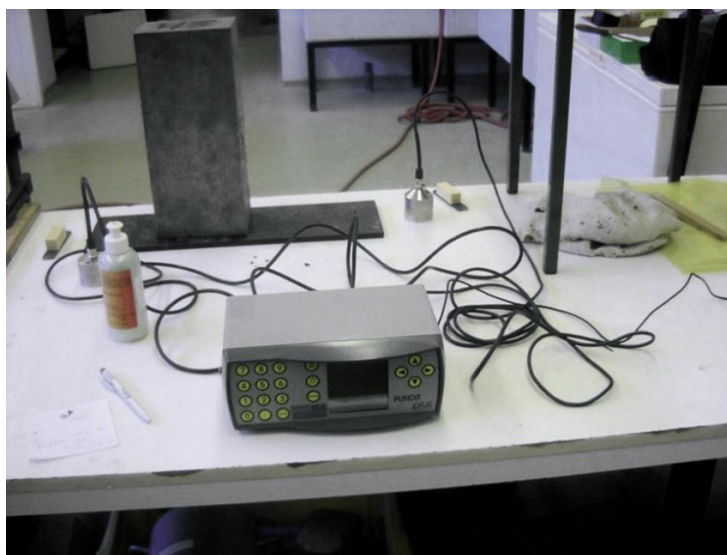
- Za določitev tlačne trdnosti betona je bilo izdelanih 16 vzorcev dimenzij 150/150/150 mm:
- 4 vzorci po recepturi 1 (R1-C1, R1-C2, R1-C3, R1-C4),
 - 3 vzorci po recepturi 2 (R2-C1, R2-C2, R2-C3),
 - 3 vzorci po recepturi 3 (R3-C1, R3-C2, R3-C3),

	RECEPTURA					GOSTOTA (kg/m ³)
	R1	R2	R3	R4	R5	
CEMENT (kg)	250	252	252	252	252	3100
EFP (kg)	0	108 (TIP 1)	108 (TIP 1)	108 (TIP 2)	108 (TIP 2)	2600
VODA (kg)	180	180	180	180	180	1000
AGREGAT 0/4 mm (kg)	884,8	781	781	781	781	2800
AGREGAT 4/8 mm (kg)	241,7	328	328	328	328	2810
AGREGAT 8/16 mm (kg)	688,1	453	453	453	453	2820
R. GUMA 0/8 mm (kg)	86,4	174	174	174	174	1200
AERANT (kg)	0	0	2,88	0	2,88	1000

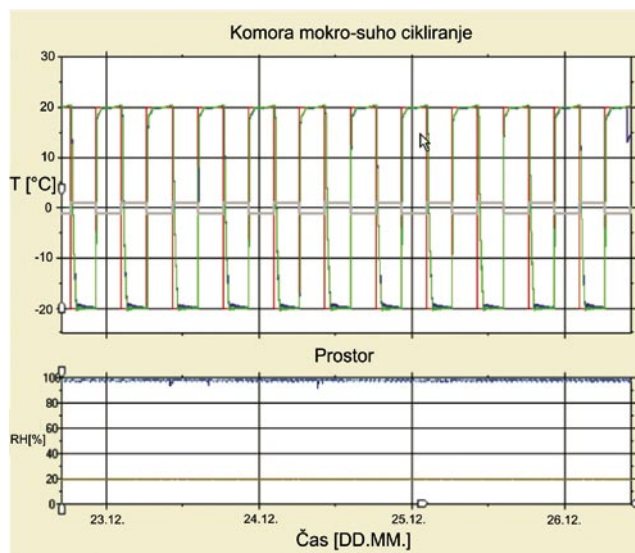
Preglednica 2 • Receptura betonske mešanice z vsebnostjo sekancev reciklirane gume kot delnega nadomestila naravnega mineralnega agregata

	RECEPTURA				
	R1	R2	R3	R4	R5
POROZNOST (%)	2	2	6	2	6
w/b*	0,72	0,5	0,5	0,5	0,5

Preglednica 3 • Poroznost in *vodovozivno razmerje betonskih mešanic



Slika 2 • Meritev časa prehoda ultrazvoka z napravo PUNDIT plus (model PC1006)



Slika 3 • Računalniško zapisovanje ciklov zmrzovanja in tajanja

- 3 vzorci po recepturi 4 (R4-C1, R4-C2, R4-C3),
- 3 vzorci po recepturi 5 (R5-C1, R5-C2, R5-C3).

3.3 Eksperimentalna metoda določitve odpornosti betona proti zmrzovanju in tajanju

Pred začetkom preizkusa v klimatski komori je bil z napravo PUNDIT plus (model PC1006) izmerjen začetni čas prehoda ultrazvoka (t_0). Oddajnik in sprejemnik sta bila prekrita z gelom in nameščena na stranici prizme (400/100/100 mm), kot je prikazano na sliki 2.

Opravljenih je bilo 10 meritev časa prehoda ultrazvoka na posameznemu vzorcu, nato je sledil izračun srednje vrednosti. Preizkus odpornosti betona proti zmrzovanju in tajanju je bil opravljen po standardu SIST 1026:2004. Cikel je trajal 8 ur in je bil sestavljen iz 4 ur suhega zmrzovanja pri $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ter 4 ur tavanja v vodi s temperaturo $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Čas prehoda ultrazvoka je bil izmerjen vsakih 25 ± 2 ciklov. Meritve je bilo treba opraviti na popolnoma od-taljenih in vlažnih vzorcih, torej pred začetkom zmrzovanja. Slika 3 prikazuje računalniško zapisovanje ciklov zmrzovanja in tavanja.

3.4 Rezultati eksperimentalnih meritev

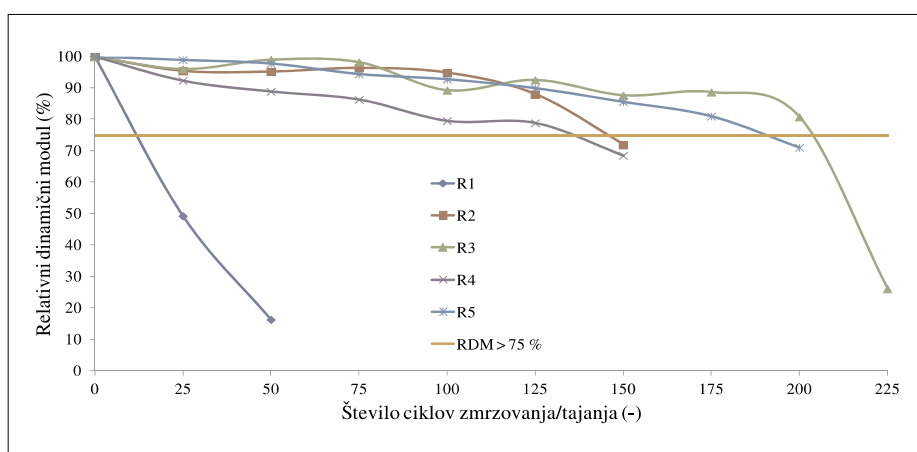
Po končanem mešanju je bil najprej opravljen preizkus konsistence betona z metodo poseda po določilih standarda SIST EN 12350-2:2001. Zahtevani posedek stožca je bil med 10 in 40 mm (razred S1). Tlačna trdnost je bila določena v skladu s standardom SIST EN 12390-3:2002. Rezultati poseda in tlačne trdnosti za posamezno betonsko mešanico so podani v preglednici 4.

Izmerjeni časi prehodov ultrazvoka so se uporabili za izračun RDM po enačbi:

$$RDM = \left(\frac{t_0}{t_N} \right)^2 \cdot 100\%, \quad (2)$$

Oznaka vzorca	$f_{c,cube}$ (MPa)	Povprečni posedek stožca Δh (mm)	Povprečna tlačna trdnost $f_{c,cube}$ (MPa)	Gostota (kg/m ³)
R1-C1 R1-C2 R1-C3 R1-C4	22 19,4 20,8 21,1	11	20,8	2397
R2-C1 R2-C2 R2-C3	19 15,8 16	15	16,9	2230
R3-C1 R3-C2 R3-C3	17 16,4 17,3	15	16,9	2145
R4-C1 R4-C2 R4-C3	18,8 18,3 18,9	16	18,7	2219
R5-C1 R5-C2 R5-C3	18,1 17,6 16,5	17	17,4	2159

Preglednica 4 • Posedek, tlačna trdnost in gostota za posamezno betonsko mešanico



Slika 4 • RDM v odvisnosti od števila ciklov zmrzovanja/tavanja

kjer je RDM relativni dinamični modul (%), t_0 čas prehoda ultrazvoka (μs) in t_N čas prehoda ultrazvoka po N -ciklih zmrzovanja/tavanja (μs). Na sliki 4 je prikazana odvisnost RDM od števila ciklov zmrzovanja/tavanja vseh

eksperimentalnih betonskih mešanic. Meritve časa prehoda ultrazvoka skozi vzorec so se zaključile takrat, ko se je relativni dinamični modul znižal pod 75 %.

Receptura R1 ima visoko vodovезivno razmerje ($w/b = 0,72$). Čeprav je cementna pasta modificirana z delci gume, ki zmanjšujejo količino kapilarne vode, hitrost absorpcije vode in odprto poroznost, bi bilo treba uporabiti nižje vodovезivno razmerje. S slike 5 je razvidno, da beton po recepturi R1 ni odporen proti zmrzovanju in tajanju, saj je RDM manjši od 75 % že pri 25 ciklih. Faktor odpornosti betona po recepturi R1 znaša samo 3,3.

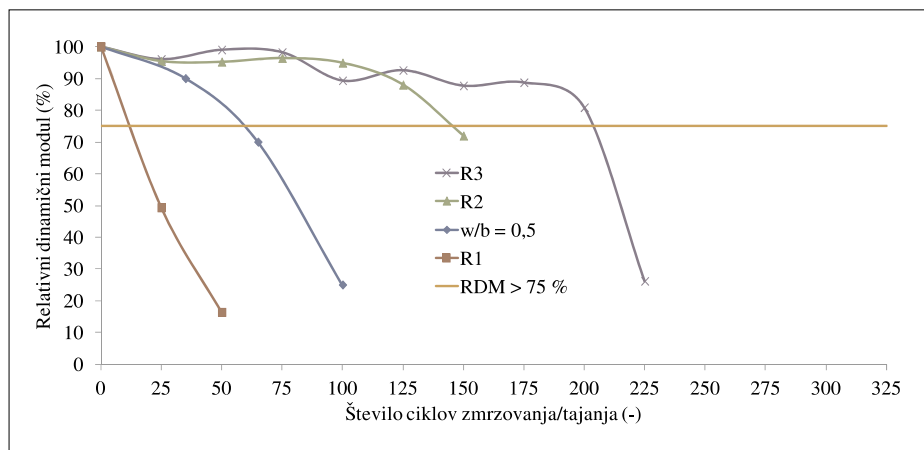
4 • DISKUSIJA

Z enačbo 1 so bili izračunani faktorji odpornosti (D_f), ki so podani v preglednici 5. Na podlagi teh faktorjev se lahko določi odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju. V tem članku so bile vrednosti D_f uporabljene za primerjavo med betoni eksperimentalnih

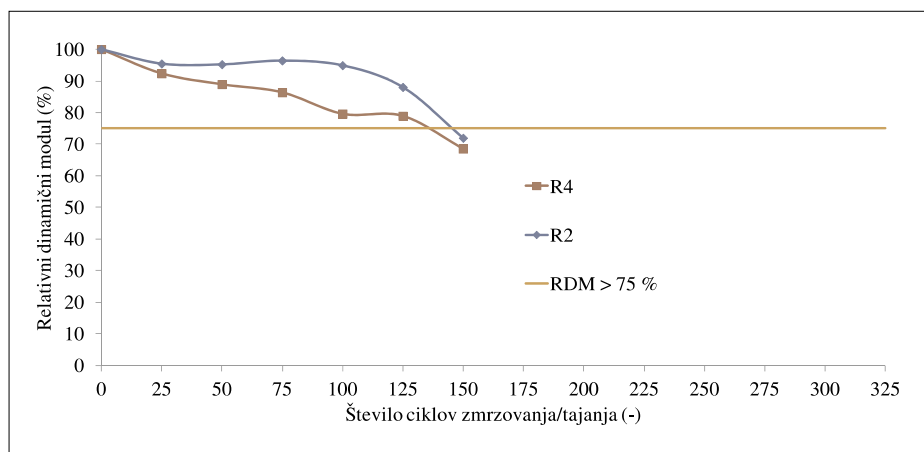
receptur, ki smo jih analizirali. Izračuni so bili opravljeni tako, da se je določilo število ciklov pri vrednosti $RDM = 75\%$. Za primerjavo so bili dodani faktorji odpornosti betonov pri različnih vodovезivnih razmerjih, podanih v (Pinto, 2001).

	R1	R2	R3	R4	R5	w/b = 0,5	w/b = 0,45	w/b = 0,4
D_f	3,3	36,3	51,3	32,0	47,5	16,3	40,0	77,5

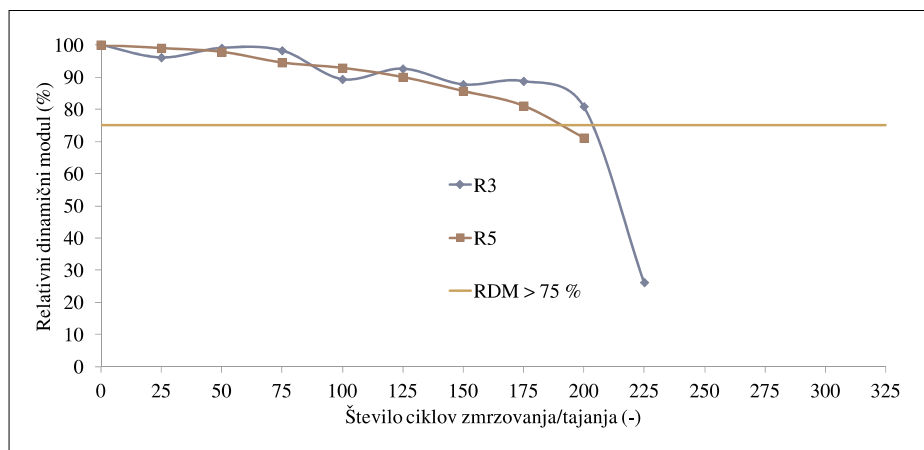
Preglednica 5 • Faktorji odpornosti za posamezno recepturo in primerjale betone



Slika 5 • Primerjava betonov z različno recepturo in betonom z vodovezivnim razmerjem 0,5



Slika 6 • Receptura R2 (EFP-TIP 1) in receptura R4 (EFP-TIP 2)



Slika 7 • Receptura R3 (EFP-TIP 1) in receptura R5 (EFP-TIP 2)

Ker beton R1 ni bil odporen proti zmrzovanju in tajanju, je bil dodan EFP. Z EFP je bilo nadomeščenih 30 % količine veziva, kar je po ASTM tudi maksimalna količina, ki se lahko dodaja v betonske mešanice. Slika 5 prikazuje, da je beton z vodovezivnim razmerjem 0,5 manj odporen proti zmrzovanju in tajanju kot beton z vodovezivnim razmerjem 0,4, pri katerem je 30 % veziva EFP. Faktor odpornosti za beton R2 znaša $D_f = 36,3$. Čeprav dodana reciklirana guma zmanjša absorpcijo vode in EFP zmanjša poroznost betona, beton še vedno ne ustreza kriteriju $D_f > 40$.

Pri recepturi R3 so bile uporabljene enake količine komponent kot pri recepturi R2, le da je bil dodan aerant. Odpornost strjenega betona proti zmrzovanju in tajanju se bistveno izboljša s povečanjem prostornine por (slika 5). Faktor odpornosti betona z dodatkom RG (10 % agregata), EFP (30 % veziva) in aeranta (0,65 % veziva) znaša $D_f = 51,3$. Tak beton je odporen proti ciklom zmrzovanja in tajanja.

EFP-TIP1 in EFP-TIP2 se razlikujeta po vrednosti specifične površine, manj pa po kemični sestavi. Oba tipa EFP vsebujeta približno 10 % CaO. Faktorja odpornosti D_f se zato bistveno ne razlikujeta. Primerjava različnih tipov receptur z EFP je prikazana na sliki 6 (brez aeranta) in sliki 7 (z aerantom).

5 • SKLEP

V tem prispevku je prikazana receptura za beton z dodatkom RG in EFP, ki je odporen proti zmrzovanju in tajanju. To je bilo doseženo šele z dodatkom aeranta, za katerega je znano, da bistveno izboljša notranjo odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju. Ugotovljeno je bilo, da specifična površina in sestava EFP nimata

večjega vpliva na faktor notranje odpornosti. Beton z recepturo R3 (RG, EFP, aerant) ima 3,1-krat večji faktor odpornosti kot navadni beton pri enakem vodovozivnem razmerju. Povprečna tlačna trdnost betona po recepturi R3 znaša 16,9 MPa. Takšna tlačna trdnost ustreza betonu C12/15, ki je primeren za

podložne betone. Dodatek aeranta je povečal faktor odpornosti za 1,4-krat, pri čemer pa se povprečna tlačna trdnost ni zmanjšala. Iz slednjega je mogoče sklepati, da obstaja optimalna količina veziva in aeranta v betonih z reciklirano gumo, pri kateri se odpornost proti zmrzovanju in tajanju poveča, medtem ko tlačna trdnost ostane nespremenjena. Na podlagi faktorjev odpornosti je mogoče sklepati, da mora biti vodovozivno razmerje neaeriranega betona z dodatkom 10 % RG največ 0,45.

6 • LITERATURA

- Bates, A. A., Woods, H., Tyler, I. L., Verbeck, G., Powers, T. C., Rigid-Type Pavement, Association of Highway Officials of the North Atlantic States, 28th Annual Convention Proceedings, 164–200, 1952.
- Benazzouk, A., Douzane, O., Mezreb, K., Queneudec, M., Physico-mechanical properties of aerated cement composites containing shredded rubber waste, *Cement and Concrete Composites*, 28, 650–657, 2006.
- Collins, A. R., The destruction of concrete by frost, *Journal of Institute of Civil Engineers*, 23, 29–41, 1944.
- Fuller, W. B., Thompson, E., The Laws of Proportioning Concrete, *ASCE Transactions* LIX, 67–118, 1907.
- Ganijan, E., Khorami, M., Maghsoudi, A. K., Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete, *Construction and Building Materials*, 23, 1828–1836, 2009.
- Klieger, P., Studies of the Effect of Entrained Air on the Strength and Durability of Concretes Made with Various Maximum Sizes of Aggregates, *Research Department Bulletin RX040*, Portland Cement Association, 1952.
- Klieger, P., Further Studies on the Effect of Entrained Air on Strength and Durability of Concrete with Various Sizes of Aggregate, *Research Department Bulletin RX077*, Portland Cement Association, 1956.
- Klieger, P., Air-Entraining Admixtures, *Research Department Bulletin RX199*, Portland Cement Association, 1966.
- Lerch, W., Basic Principles of Air-Entrained Concrete, T-101, Portland Cement Association, 1960.
- Oikonomou, N., Mavridou, S., The use of waste tyre rubber in civil engineering works, *Sustainability of construction materials*, Woodhead Publishing Limited, 213–235, 2009.
- Pigeon, M., Pleau, R., *Durability of Concrete in Cold Climates*, E&FN Spon, New York, 1995.
- Pinto, R. C. A., Hover, K. C., Frost and Scaling Resistance of High-Strength Concrete, *Research and Development Bulletin RD122*, Portland Cement Association, 2001.
- Popit, A., Nikonov, A., Emri, I., Overview about research of properties and applicability of concrete with added granular rubber from scrap tires, *Gradbeni vestnik*, 61, 284–297, 2012.
- Powers, T. C., Resistance to weathering – freezing and thawing, *ASTM Sp. Tech. Publ.*, 169, 182–187, 1956.
- Powers, T. C., Topics in Concrete Technology ... (3) Mixtures Containing Intentionally Entrained Air; (4) Characteristics of Air-Void Systems, *Research Department Bulletin RX174*, Portland Cement Association, 1965.
- Powers, T. C., Freezing Effects in Concrete, Paper from symposium sessions, held in Atlantic City, New Jersey and Ottawa, Ontario, 1973, Published in, *Durability of concrete*, SP-47, American Concrete Institute, Detroit, 1975.
- Segre, N., Joekes, I., Use of tire rubber particles in addition to cement paste, *Cement and Concrete Research* 30, 1421–1425, 2001.
- Siddique, R., Effect of fine aggregate replacement with class F fly ash on the mechanical properties of concrete, *Cement and Concrete Research*, 33, 539–547, 2003.
- Son, K. S., Hajirasouliha, I., Pilakoutas, K., Strength and deformability of waste tyre rubber-filled reinforced concrete columns, *Construction & Building Materials*, 25, 218–226, 2011.
- Topcu, I. B., The properties of rubberized concretes, *Cement and Concrete Research*, 25, 304–310, 1995.
- Toutanji, H. A., The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 18, 135–139, 1996.
- Whiting, D. A., Nagi, M. A., *Manual on Control of Air Content in Concrete*, EB116, National Ready Mixed Concrete Association and Portland Cement Association, 1998.

MATEMATIČNO MODELIRANJE TOPLOTNE OBREMITVE SPODNJE SAVE PRI NUKLEARNI ELEKTRARNI KRŠKO

MATHEMATICAL MODELING OF THERMAL POLLUTION OF LOWER SAVA RIVER AT THE NUCLEAR POWER PLANT KRŠKO

prof. dr. Matjaž Četina, univ. dipl. inž. grad.

matjaz.cetina@fgg.uni-lj.si

prof. dr. Rudolf Rajar, univ. dipl. inž. grad.

rudi.rajar@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Katedra za mehaniko tekočin

Vanja Hatič, univ. dipl. inž. grad.

vanja.hatic@gmail.com

dr. Andrej Širca, univ. dipl. inž. grad.

andrej.sirca@ibe.si

IBE, d. d., Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 519.8:536.22:621.311.25

(282.243.743)(497.4 Krško)

Povzetek | Pri načrtovanju termo- ali nuklearnih elektrarn na rekah je treba z matematičnimi modeli napovedati posledice toplotne obremenitve. V prispevku je kratko opisan tridimenzionalni model PCFLOW3D, predvsem modul za simulacijo toplote. Pri- kazana je detajlna verifikacija modela z meritvami v bazenih Vrhovo in Blanca.

Opisana je uporaba modela pri napovedi toplotnega obremenjevanja Save z izpusti toplote iz Nuklearne elektrarne Krško (NEK). V prihodnjih letih bo namreč 7 km dolvodno od NEK zgrajena HE Brežice, z bazenom, v katerega bo iztekala odpadna toplota iz NEK. Toplotne razmere se bodo od sedanjega stanja, ko je izpust toplote neposredno v Savo, bistveno spremenile. Rezultati simulacij so pokazali, da bo osnovna zahteva, da se temperatura pod NEK ne sme povečati za več kot 3 °C, presežena le v redkih izjemnih razmerah.

Ključne besede: tridimenzionalni model, simulacija toplote, toplotna obremenitev Save, odpadna toplota iz nuklearne elektrarne

Summary | During the design of thermo- or nuclear power plants on rivers, simu- lations by numerical models are used to forecast the thermal processes which often cause unacceptable thermal pollution. In the paper, a three-dimensional numerical model PCFLOW3D is described, especially its module for the simulation of thermal processes. A detailed verification of the model is presented, where measurements in the reservoirs Vrhovo and Blanca were used. Further, the application of the model is described for the forecast of thermal load of the Sava River with the thermal outflow from the Nuclear power plant Krško. At present, the cooling water is discharged directly into the Sava River. How- ever, in the next years a new HEPP Brežice will be built 7 km downstream, and the cooling water will flow into the reservoir. The thermal conditions will be significantly changed. Simulation results showed that the maximum allowed temperature increase of 3 °C would be exceeded in very rare conditions only.

Key words: three-dimensional model, simulation of thermal processes, thermal load of Sava River, cooling water from nuclear power plant.

1 • UVOD

Toplotno obremenjevanje je eden pomembnejših procesov pri varovanju okolja. Voda v rekah, jezerih ali tudi morju se lahko segreje do tako visokih temperatur, da so onemogočeni normalni biološki procesi razvijanja flore in favne. Poleg naravnega segrevanja zaradi sončne energije so vzroki segrevanja lahko antropogeni, kar smatramo kot toplotno onesnaževanje. To je predvsem odvajanje odpadne toplote iz termo- in nuklearnih elektrarn. Obseg takega onesnaževanja je treba predvideti že v projektih načrtovanja elektrarn, saj je treba oceniti vplive na okolje, od tega pa je delno tudi odvisna ekonomska upravičenost načrtovane elektrarne.

V slovenski zakonodaji je npr. predpis, da se v rekah ali rečnih akumulacijah temperatura vode zaradi odvajanja odpadne toplote iz termoelektarn ali nuklearne elektrarne ne sme zvišati za več kot 3 °C.

Pri načrtovanju izgradnje NEK v letu 1973 so bili toplotni procesi, kjer se je odpadna toplota odvajala neposredno v Savo, simulirani predvsem s poskusi in meritvami na hidravličnih modelih, s čimer so bili določeni pogoji obratovanja. V naslednjih letih se načrtuje izgradnja hidroelektrarne (HE) Brežice, ca. 7 km dolvodno od NEK. Jez HE Brežice bo zajezil Savo in odpadna toplota se bo v prihodnje namesto v reko Savo odvajala v akumulacijsko jezero

Brežice. S tem se bodo pogoji odvajanja toplote spremenili, saj se bo gladina ob vtoku vode v dovodni kanal NEK povišala za 3 metre, hitrosti toka v bazenu bodo zmanjšane, zadrževalni čas na dolvodnem odseku Save bo povečan, poleg tega bo povečana površina vodne gladine dolvodno od NEK, kar bo povzročilo večji vnos sončne toplote v vodotok.

Zaradi tega je bilo nujno preveriti toplotne razmere, ki bodo nastale v bodočem stanju po izgradnji HE Brežice.

Za takšne presoje je danes mogoče uspešno uporabiti matematične modele, saj je z njimi možno simulirati vse vplive, od izmenjave toplote med bazenom in atmosfero pa do vnosa odpadne toplote iz energetskih objektov. V prispevku so opisani takšen model, njegovo umerjanje in verifikacija veljavnosti ter v sklepnem delu rezultati simulacij.

2 • ODVAJANJE ODPADNE TOPLOTE IZ NEK V SAVO

Izkoristek nuklearne elektrarne Krško znaša le 35 %, ostalih 65 % energije, proizvedene v reaktorjih, se pretvori v toplotno energijo, ki se odvaja s hladilno vodo v reko Savo (NEK, 2012). Zaradi tega ima v sedanjem stanju hladilna voda iz NEK daleč največji vpliv na segrevanje Save dolvodno od jez HE NEK. Upravičeno lahko predvidevamo, da bo NEK tudi po izgradnji HE Brežice ostala največji toplotni obremenjevalec Save.

NEK odvzema vodo iz Save tik nad pregrado pri elektrarni (slika 1). Količina odvzete vode je odvisna od obratovanja elektrarne. Kadarkoli se izkorišča 100 % moči reaktorja in savski pretok to dopušča, se iz Save odvzema $Q_{NEK} = 25 \text{ m}^3/\text{s}$. Črpalke po ceveh potiskajo odvzeto savsko vodo v kondenzator, kjer je izrabljena vodna para, ki prihaja iz turbin. Pri

prehodu skozi kondenzator se zaradi ohlajanja pare savska voda segreje. Črpalke nato segreto vodo potiskajo nazaj v Savo. V neugodnih vremenskih razmerah in pri nizkem pretoku Save je treba pred izpustom nazaj v Savo hladilno vodo ohladiti še v hladilnih stolpih. V hladilnih stolpih se voda hladi z zrakom iz okolice (NEK, 2012).

Toplota, ki jo odda hladilna voda v Savo, je podana z enačbo (1).

$$E_{NEK} = Q_{NEK} \rho_v (T_{NEK} - T_{inp}) c_{pv} t, \quad (1)$$

kjer so:

E_{NEK} vnos toplote z izpustom odpadne vode (J),

Q_{NEK} pretok hladilne vode iz NEK (m^3/s),

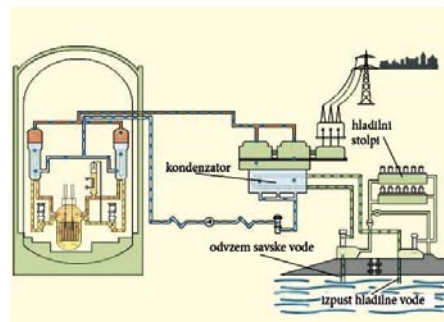
ρ_v gostota vode (kg/m^3),

T_{NEK} temperatura hladilne vode (°C),

T_{inp} vtočna temperatura Save (°C),

c_{pv} specifična toplota vode, ki znaša 4219 J/(kgK),

t čas (s).



Slika 1 • Shema procesa hlajenja v NEK, možnost kombinacije hlajenja s savsko vodo in s hladilnimi stolpi (NEK, 2012)

3 • MATEMATIČNI MODEL

3.1 Model PCFLOW3D

Model PCFLOW3D je nestalni tridimenzionalni nelinearni baroklini model, razvit na Katedri za mehaniko tekočin FGG. Uporabljen in verificiran je bil že pri reševanju mnogih praktičnih problemov, predvsem pri problemih onesnaževanja površinskih voda ((Četina, 2000), (Rajar, 2004), (Tomiya, 2006), (Rajar, 2007)). Princip modela je bil zato

že večkrat opisan ((Rajar, 1997), (Četina, 1997)).

Hidrodinamika temelji na osnovnih enačbah nestalnega toka s prosto gladino, v vertikalni smeri uporabljamo hidrostatično aproksimacijo. Osnovni model sestoji iz štirih modulov: hidrodinamičnega, transportno-disperzijskega, sedimentacijskega in biogeokemičnega modula. Med zunanjimi silami, ki vplivajo na vred-

nosti hidrodinamičnih količin, lahko v modelu PCFLOW3D upoštevamo veter, plimovanje, dotoke rek in notranje sile zaradi gradientov temperature in slanosti ter posledično gradientov gostote vode. Hidrodinamični račun poteka po metodi končnih volumnov, transport in disperzijo polutantov pa lahko računamo z Eulerjevo metodo končnih razlik ali z Lagrangeovo metodo sledenja delcev.

Vpliv turbulence je zajet s koeficienti turbulentne viskoznosti N_h in N_v (posebej za horizontalno in vertikalno smer) ter s koeficienti turbulentne difuzije D_h in D_v . Vrednosti

koeficientov določimo z dodatnimi enačbami, s t.i. modeli turbulence. Koeficienti turbulentne viskoznosti in difuzije so odvisni od hitrosti toka v posameznih točkah in njenih gradientov, spreminjajo se v času in prostoru. Model PCFLOW3D omogoča poljubno kombinacijo horizontalnega in vertikalnega modela turbulence. Uporabljamo v glavnem dva modela turbulence: (a) Model Smagorinsky (vertikalno in/ali horizontalno); (b) Model Mellor-Yamada (vertikalno).

Pri opisanih simulacijah toplotnih procesov smo uporabili model Smagorinsky tako po horizontalni kot po vertikalni smeri.

V prvotni verziji modela je numerično reševanje dinamičnih enačb potekalo po t.i. hibridni shemi, kar je kombinacija »upwind« in centralne sheme. V hidrodinamičnem modulu je ta shema razmeroma dovolj natančna, medtem ko smo pri umerjanju transportno-disperzijskega modula že v več primerih ugotovili, da je shema premalo natančna, ker povzroča preveč poznane numerične difuzije. Zato je bila v zadnjem času vgrajena dodatna shema Quick, ki je drugega reda točnosti in povzroča bistveno manj numerične difuzije.

O uporabnosti in točnosti obeh shem je več detajlov v poglavju 4, kjer je opisana primerjava z meritvami.

3.2 Simuliranje toplotnih procesov

Če simuliramo spremembe toplote v jezerih ali v rečnih bazenih, moramo v modelu upoštevati dve vrsti izmenjave med vodnim telesom in okolico:

- Dotok toplote iz lokalnih virov, v našem primeru dotok odpadne toplote iz NEK
- Izmenjava toplote z atmosfero

LOKALNI DOTOK TOPLOTE. Dotok toplote iz lokalnih virov je upoštevan v definiranih robnih celicah modela, v našem primeru na mestu, kjer je stik odvodnega kanala NEK z bazenom. Ker je temperatura neposredno merilo toplote, v modelu preračunavamo temperaturo na isti način kot katerikoli polutant, parameter temperatura je na mestu koncentracije polutanta. V transportno-disperzijskem modulu se simulira transport in disperzija temperature. Dotok toplote v vodno telo pa se v vsakem času preračunava po enačbi:

$$Q_T = Q \rho \Delta T C_{pv} \quad (2)$$

Kjer pomeni:

Q_T dotok toplote (J/s),

Q pretok vode (m^3/s),

ρ gostota vode ($1000 \text{ kg}/m^3$)

ΔT prirastek temperature ($^{\circ}C$),

C_{pv} specifična toplota vode ($4219 \text{ J}/(kg^{\circ}C)$)

IZMENJAVA TOPLOTE Z OZRAČJEM. Meteorološki dejavniki, ki vplivajo na izmenjavo toplote med vodnim telesom in ozračjem, so naslednji: sončno obsevanje, veter, vlažnost zraka, zračni tlak in oblačnost. Skupni vpliv vseh teh procesov je zajet v splošni enačbi toplotnega toka (Orlob, 1983):

$$P = GSA + SO + SV + CO + EV, \quad (3)$$

kjer so:

P skupno prehajanje toplote (W/m^2),

GSA prehajanje toplote zaradi globalnega sevanja sonca (W/m^2),

SO prehajanje toplote zaradi sevanja ozračja (W/m^2),

SV prehajanje toplote zaradi sevanja vodnega telesa (W/m^2),

CO prehajanje toplote zaradi konvekcije (W/m^2),

EV prehajanje toplote zaradi evaporacije (W/m^2).

Dejansko toploto, ki jo prejme akumulacija, pa izračunamo z izrazom:

$$E_{atm} = P A_a t, \quad (4)$$

kjer so:

E_{atm} vnos toplote iz atmosfere (J),

P skupni dotok toplote iz atmosfere (W/m^2),

A_a površina akumulacije (m^2),

t čas (s).

V modelu se najprej v vsakem času preračunava dotok toplote iz ozračja, ki je lahko pozitiven ali negativen (torej segrevanje ali ohlajanje). Posamezne člene se računa po izkustvenih enačbah (Orlob, 1983).

Najpomembnejši je prvi člen, globalno sevanje. To je dotok toplote preko kratkovalovnega sončnega sevanja. Ta parameter je odvisen od zemljepisne širine, dolžine dneva (torej letnega časa) in od oblačnosti. Zaradi neposrednega odboja je v modelu ta radiacija zmanjšana za 7 % (VGI-VGL, 1989). Podatek o globalnem sevanju mora biti bodisi poznan iz neposrednih meritev sevanja (vpliv oblačnosti je neposredno vključen) ali pa izračunan iz splošnih enačb glede na zgoraj omenjene parametre. Drugi način je lahko natančen le ob jasnem vremenu, saj je npr. oblačnost lahko upoštevana le za neke povprečne mesečne razmere.

na Savi v Radečah) in krivuljo, izvrednoteno preko školjčnega diagrama na HE Vrhov. Ker je drugi način vrednotenja pretoka nezanesljiv, smo po nasvetu strokovnjakov iz HE Vrhov upoštevali pretoke po podatkih Urada za meteorologijo.

Meteorološki podatki. Ti so bili merjeni v bližini kraja meritev. Globalno sevanje je bilo merjeno neposredno na soncu. Vendar smo po dolgem nizu poskusov umerjanja z modelom ugotovili, da je pri merjenju morala nastajati napaka. Zato smo v nadaljevanju izračune globalnega sevanja opravili po splošnih enačbah, kjer je to odvisno od lege v koordinatnem sistemu zemlje ter od letnega in dnevnega časa (Hočevár, 1982). Te enačbe

in končni profil smo oblikovali tako, da se vzdolž toka preseki in širine gladine kar najbolj prilegajo dejanskim. V zadnji verziji smo upoštevali naslednje debeline računskih slojev (od gladine proti dnu): 0,5; 0,8; 1,0; 2,0; 2,5; 2,2; 1,5 in 1,5 metra.

Hidravlični podatki. V obdobju od 22. do 24. julija je bil pretok preko bazena nestalen in je nihal okrog vrednosti $112 \text{ m}^3/s$. Dobili smo dve dokaj različni krivulji časovnega spreminjanja pretoka: pretoke po podatkih Urada za meteorologijo (dobljeni na osnovi meritev

4 • UMERJANJE MODELA

4.1 Umerjanje v bazenu Vrhov

Ena od meritev temperature v bazenu Vrhov v letu 1998 je bila opravljena od 22. julija ob 9. uri do 24. julija ob 8. uri zjutraj. Tako so bili zajeti dva cela dneva in dve noči. Zato smo to meritev izkoristili za temeljito umerjanje modela PCFLOW3D.

Topografski podatki. Topografijo bazena smo zajeli s 57 celicami v vzdolžni smeri ($D_x = 100 \text{ m}$) in 19 v prečni smeri ($D_y = 10 \text{ m}$). Upoštevali smo, da je presek trapezne oblike, ki se linearno večja vzdolž toka. Začetni

so v svetu preverjene, in ker je bilo v celotnem času meritev nebo brez oblakov, je odpadla negotovost zaradi oblačnosti. Izkazalo se je, da je bilo globalno sevanje po meritvah za ca. 20 % prenizko, verjetno zaradi koeficienta odboja, ki ni bil pravilno umerjen.

Kot rezultat prikazujemo samo sliko meritev skupaj z izračunanimi rezultati: temperature v profilu novega mostu v Radečah, ki je 4350 metrov gorvodno od HE Vrhovo (slika 2). Vidimo, da se potek merjenih in izračunanih temperatur dovolj dobro ujema v celotnem obdobju meritev in tudi po celotni globini. Ker smo podobno ujemanje dobili tudi v drugih merjenih profilih, menimo, da je model simulacije toplotnih procesov pokazal dobro točnost in zanesljivost.

4.2 Meritve v bazenu Blanca

Iz poročila Inštituta za hidravlične raziskave (IHR, 2011) povzemamo glavne podatke in rezultate o meritvah, ki smo jih uporabili za verifikacijo modela PCFLOW3D.

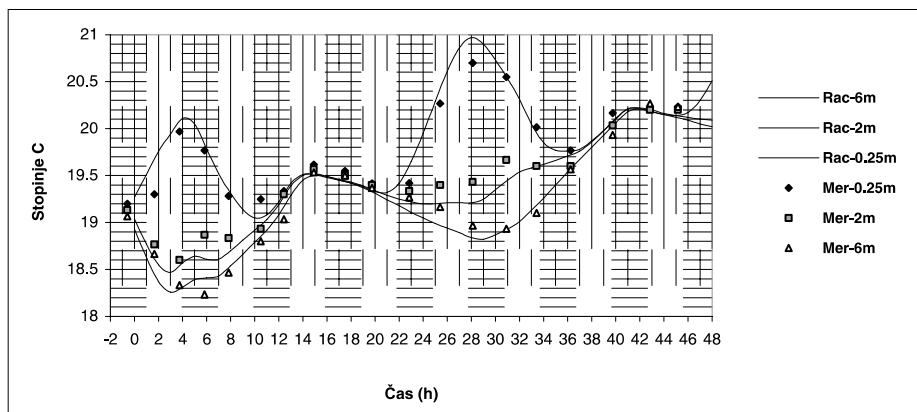
Datum in časi meritev. Meritve v bazenu Blanca so bile opravljene 23. in 24. avgusta 2011. Rezultati so pregledno prikazani v poročilu (IHR, 2011). Meritve v vsakem merskem profilu so bile opravljene šestkrat v času od 23. avgusta ob 10. uri do 24. avgusta 2011 ob 7. uri.

V vsakem profilu so bili časi meritev nekoliko različni (izvajanje na različnih lokacijah je zahtevalo prevoze). Točni časi vsake meritve so prikazani na slikah 5 in 6 skupaj z rezultati meritev in rezultati simulacij.

Hidravlične in temperaturne razmere. Pretok v bazenu Blanca je bil v času meritev $Q = 63 \text{ m}^3/\text{s}$, z minimalnimi nihanji okrog te vrednosti, ki smo jih zanemarili.

Debeline slojev in temperature, kot so bile upoštevane v matematičnih simulacijah, so prikazane v preglednici 1. Vseh slojev v simulacijah je bilo 16, vendar sta prvi spodnji (sloj 1) in zadnji zgornji (sloj 16) fiktivna (zaradi numerične metode).

Treba je pripomniti, da smo prikazane začetne temperature slojev (v času $t = 0$ v simulacijah, kar pomeni 23. avgusta ob polnoči) lahko le privzeli iz meritev, upoštevane so bile povprečne temperature v posameznih slojih, čeprav so dejansko vzdolž toka variirale za ca. $\pm 5 \%$.



Slika 2 • Primerjava merjenih in izračunanih temperatur v bazenu Vrhovo v profilu novega mostu Radeče



Slika 3 • Tloris bazena Blanca, označenih je pet merskih mest

Prav tako smo v simulacijah morali privzeti dotočno temperaturo v prvem gorvodnem profilu. Iz merjenih rezultatov smo privzeli, da je ta temperatura približno $T_{zoc} = 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Kot je opisano v poglavju 4.4, so prav te netočnosti v vhodnih podatkih povzročile največji del razlik med merjenimi in izračunanimi rezultati.

Meteorološke razmere. Vse podatke o atmosferskih razmerah (globalno sevanje, temperatura zraka, hitrost vetra, vlažnost) smo dobili iz meritev (IHR, 2011). Za temperaturo vodne gladine smo v začetnih simulacijah upoštevali povprečje meritev ($25 \text{ }^{\circ}\text{C}$), v kasnejših (tudi končnih) simulacijah pa je bila v računih upoštevana v vsaki celici modela dejanska

temperatura površinskega sloja, ki se je med časom simulacij spreminjala.

Rezultati. Rezultati meritev, tj. izmerjene temperature v petih merskih profilih v različnih časih dneva (povzeti iz poročila (IHR, 2011)), so prikazani na slikah 5 in 6 skupaj z rezultati simulacij z modelom PCFLOW3D, verzija 21, in sicer za poenostavljeno topografijo (primer BLALIN) in za realno topografijo bazena Blanca (REA).

4.3 Umerjanje modela in dopolnitve

Simulacije hidrodinamike in predvsem toplotnega dogajanja za dosedanje projekte (IBE, 2011) so bile izvedene z verzijo 20 modela

sloj	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$D_h \text{ (m)}$	1,5	1,5	1,5	1,5	1,25	1,1	0,85	0,55	0,4	0,35	0,3	0,25	0,25	0,2
$T \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	19	21	21,2	21,3	21,3	21,3	21,3	21,3	21,6	24	24,4	24,6	24,6	24,6

Preglednica 1 • Debeline slojev in začetne temperature v času $t = 0$, kot so bile upoštevane v matematičnih simulacijah

PCFLOW3D. Kot je opisano v poglavju 4.1 sta bili v letih 1995 in 1998 narejeni detajlna kalibracija in verifikacija tega modela z meritvami temperature v bazenu Vrhovu (Rajar, 1998), ki sta pokazali dobro ujemanje med meritvami in rezultati simulacij.

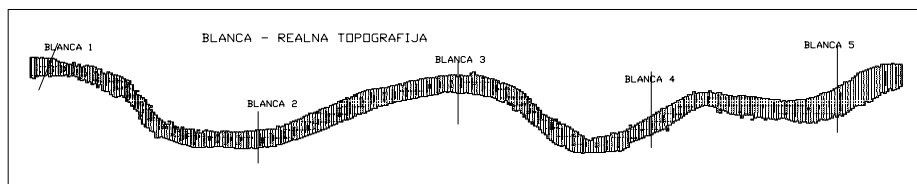
Vendar pa so bile pri nadaljnjih izračunih za omenjene projekte v bazenu Brežice razmere pomembno drugačne kot v primerih iz bazena Vrhovu.

Razlike so predvsem v naslednjih detajlih:

1. V primeru bazena Brežice je poleg izmenjave toplote z ozračjem prisoten lokalni vtok toplote iz odvodnega kanala NEK, kar povzroči bolj kompleksno dogajanje toplotne obremenitve.
2. Pri bazenu Brežice je treba izvršiti simulacije za zelo ekstremne toplotne pojave, kot so visoka temperatura vode v Savi, nizek pretok Save in visoka temperatura ozračja. Pri meritvah v bazenu Vrhovu je bila toplotna stratifikacija majhna, tudi zato, ker je bil pretok v Savi razmeroma velik (112 oziroma 140 m³/s), zato je bilo vertikalno mešanje toplote po globini razmeroma močno.

Ker so bile ob času meritev v bazenu Blanca skoraj ekstremno vroče poletne razmere, z zelo visokimi temperaturami Save in ozračja, nizkim pretokom (63 m³/s) in z močno stratifikacijo slojev, so nam te meritve služile za dodatno verifikacijo in umerjanje modela. Dopolnila modela PCFLOW3D iz verzije 20 v verzijo 21 so bila pripravljena postopno, s serijo korakov. V nadaljevanju opisujemo postopke, s katerimi smo z dopolnili modela dosegli bistveno večjo točnost.

V (prvotni) verziji 20 je predvsem bistveno to, da so se vse simulacije disperzije toplote (ali drugih polutantov) vršile po numerični shemi upwind, za katero je znano, da povzroča določeno numerično difuzijo. Tako je najbolj bistveno dopolnilo modela iz verzije 20 v verzijo 21 uporaba druge numerične



Slika 4 • Tloris območja simulacije z matematičnim modelom (REA) – realna topografija bazena Blanca z vrisanimi lokacijami merskih mest, v katerih smo primerjali merjene in računske rezultate

sheme quick, ki je drugega reda točnosti in bi po vseh informacijah iz literature morala povzročati bistveno manj numerične difuzije. To je najbolj bistveno pri ugotavljanju, koliko resnične toplotne stratifikacije po globini nastane v simulacijah, kajti shema upwind zaradi numerične difuzije delno izenačuje temperaturo posameznih slojev (predvsem površinskih), kar ni v skladu z resničnim fizikalnim pojavom.

Pri vseh simulacijah, tako z verzijo 20 kot 21, smo račun hidrodinamike (HD) in simulacijo disperzije toplote razdelili: najprej smo izračunali potek hitrosti, kjer je model z iterativnim postopkom iz začetnega stanja (vse hitrosti so nič) izračunal stanje HD, ko se ustali pri podanih robnih pogojih in podanem pretoku. V nadaljnjih simulacijah smo z upoštevanjem tako dobljenega (konstantnega) HD-polja simulirali disperzijo toplote. Tako smo bistveno zmanjšali čas izračunov (ca. trikrat). S simulacijami smo preverili, da tak način izračunov v primerjavi s točno simulacijo, kjer se več čas skupaj računata HD in toplotna disperzija, povzroča le manjše netočnosti, reda nekaj odstotkov.

Z modelom PCFLOW3D-V21 smo simulirali tri primere:

- A. BLALIN – bazen Blanca, linearna verzija (umerjanje modela)
- B. REA – bazen Blanca, realna topografija (umerjanje modela)
- C. AVG63A – bazen Brežice (z odsekom Save nad jezom NEK), za razmere v avgustu, pretok 63 m³/s

V marcu 2012 je bil že simuliran osnovni primer: AVG63 – bazen Brežice (z odsekom Save nad jezom NEK), za razmere v avgustu, pretok 63 m³/s, z verzijo 20 modela PCFLOW3D (IBE, 2012).

Primer BLALIN in REA sta bila izvršena in uporabljena za kalibracijo in verifikacijo dopolnjenega modela z uporabo meritev v bazenu Blanca. Primer AVG63A pa je bil ponovna simulacija hidrodinamičnih (HD) in predvsem toplotnih razmer v bazenu Brežice. Zadnji primer je bil glede na topografijo in robne pogoje identičen primeru AVG63 iz predhodnih projektov, bistvo je bilo določiti, koliko so toplotne razmere pri tem primeru različne od primera AVG63 zaradi izboljšane točnosti verzije 21 modela PCFLOW3D.

Najprej smo izvršili primer BLALIN s poenostavljeno topografijo (trapezni prerez, linearne spremembe vzdolž toka). Pri tem smo ukrivljenost bazena zanemarili, smo pa vse parametre, ki pomembno vplivajo na toplotne procese, obdržali skoraj enake: površino in tudi širino bazena, volumen in globine. Zato smo lahko bistveno zmanjšali število računskih celic: preglednica 2 kaže, da jih je bilo v primeru REA ca. 54-krat manj, kar je pomembno skrajšalo čas računanja. Druga prednost poenostavljene topografije BLALIN je bila, da smo lahko bolj pregledno opazovali vplive posamezni členov in raznih izboljšav modela.

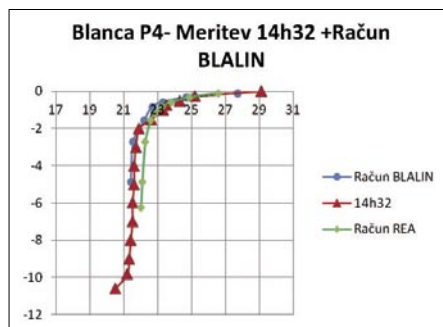
Primer REA pa je bil simuliran z realno topografijo bazena Blanca, ki je prikazana na sliki 4.

Primer	L (dolž.)	Š (širina)	N št. celic X-smer	NJ št. celic Y-smer	št. slojev	D _x	D _y	D _n	Št. vseh celic
BLALIN	8960	180	34	18	16	280	10/16	0,2/1,5	9792
REA	8225	980	331	100	16	25	10	0,2/1,5	529,600
AVG63A	7225	1789,5	246	131	14	4/60	2/20	0,2/1,9	451,164
AVG63	7225	1789,5	246	131	14	4/60	2/20	0,4/1,9	451,164

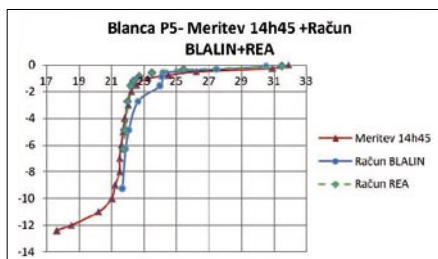
Preglednica 2 • Vrednosti računskih parametrov v posameznih primerih

4.4 Primerjava modelnih rezultatov z meritvami

Na slikah 5 in 6 so prikazane izmerjene krivulje temperature po globini v profilih Blanca 4 in Blanca 5, skupaj z rezultati izračunov serije BLALIN in računa REA. Za primerjavo smo izbrali tri dnevne čase, ujemanje med modelom in meritvami najbolje prikaže meritev ob času največje stratifikacije, tj. med 14. in 15. uro.



Slika 5 • Primerjava merjene in računanke krivulje temperatur po globini v profilu Blanca 4 ob 14. uri in 32 min



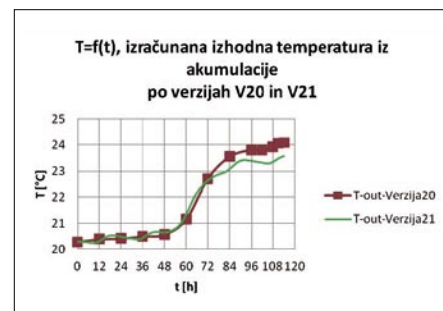
Slika 6 • Primerjava merjene in računanke krivulje temperature po globini v profilu Blanca 5 ob 14. uri in 45 min

Najpomembnejši zaključki o umerjanju so naslednji:

Glede na primerjavo temperaturnih krivulj iz meritev in simulacij lahko rečemo, da nova izpopolnjena verzija modela daje zelo dobro ujemanje. Popolnega ujemanja ni mogoče pričakovati, saj je že omenjeno, da npr. robni pogoji na začetku bazena niso bili dovolj točno merjeni, da bi bile lahko simulacije popolne. Tudi topografija, čeprav v primeru REA simulirana z zelo gosto numerično mrežo, ni popolnoma točna. Poleg tega podatki o atmosferskih razmerah (npr. hitrost vetra, vlažnost) ne morejo biti popolnoma točni. Čeprav so bili verjetno merjeni razmeroma natančno, pa zagotovo ti parametri niso bili konstantni po celotnem območju bazena, kot se edino lahko predpostavlja v simulacijah.

Zanimivo je, da so rezultati simulacij temperature z realno topografijo (primer REA) nekoliko, vendar ne zelo bistveno bližje rezultatom meritev kot primer BLALIN (poenostavljena topografija). To pomeni, da smo s primerom BLALIN dovolj dobro aproksimirali vplivne parametre dejanske topografije.

Pomemben rezultat za toplotno obremenitev Save iz NEK je dejstvo, da na novo umerjen model, verzija 21, daje na iztoku iz bazena Brežice za ca. 0,5 °C nižjo temperaturo kot verzija 20 (slika 7). Kot je dalje prikazano, to pomeni, da je pogoj preseganja 3 °C presežen le v izredno redkih razmerah.



Slika 7 • Primerjava temperature na iztoku iz bazena Brežice, izračunane po verzijah modela 20 in 21. Dodatno umerjena verzija 21 daje za 0,5 °C nižjo temperaturo

5 • OMEJITVE ZARADI TOPLLOTNIH OBREMITEV

5.1 Povzetek evropske zakonodaje

Krovná vodná direktíva Water Framework Directive (WFD), ki jo je v letu 2000 izdala Evropska unija, zapoveduje več novih predpisov na področju varovanja okolja. Namen WFD je, da do leta 2015 izboljša stanje površinskih voda in doseže visok ekološki status. Med drugim je direktiva predpisala tudi kombinirani pristop, ki združuje emisijski in imisijski pristop k varovanju vodnega okolja. V Sloveniji, tako kot v večini drugih članic EU, to pomeni nov pristop, saj smo v preteklosti poznali le emisijski pristop.

Emisijski pristop oziroma izpustni kriterij se v angleški literaturi imenuje Emission Limit Values (ELV). To so mejne vrednosti koncentracije polutanta v odpadni vodi na točki izpusta v vodno telo. ELV je učinkovit način omejevanja onesnaževanja vodnih teles, saj je s tem pristopom mogoče enostavno predpisati omejitve, prav tako je preprosta vzpo-

stavitev monitoringa za tak sistem. Vendar ima ta pristop tudi veliko pomanjkljivost, saj ne upošteva sinergijskega učinka več izpustov v enem vodnem telesu. Tako se lahko zgodi, da vsak posamezni izpust ustreza standardom ELV, da pa njihov skupni učinek deluje negativno na ekologijo vodnega okolja.

Imisijski pristop se v angleški literaturi imenuje Environmental Quality Standards (EQS). To so mejne vrednosti koncentracije polutantov, ki se jih ne sme preseči v vodnem telesu, v katero se odpadne vode odvajajo. Če posplošimo, je pri imisijskem kriteriju vseeno, kakšno odpadno vodo spuščamo v vodno telo, dokler so tam izpolnjeni EQS-standardi. Takšna oblika zakonodaje lahko povzroči, da bi onesnaževalci lahko polno izkoristili ekološko kapaciteto vodnega telesa. Prav tako je zahtevna vzpostavitev monitoringa, saj je težko določiti, kje, kdaj in kako pogosto naj se opravlja meritve.

Kombinirani pristop bi lahko bil popolna rešitev, saj bi izničil slabosti obeh prej omenjenih pristopov in združil njune dobre lastnosti. Vendar se še vedno poraja vprašanje, kje naj bi opravljali meritve EQS. WFD ponuja ohlapen odgovor, in sicer, da morajo vrednosti v vodnem telesu ustrezati EQS-standardom na točki popolnega premešanja, kako se to točko določi, pa ni posebej opisano.

5.2 Aktualne omejitve obratovanja NEK na podlagi slovenske zakonodaje

Že pred izgradnjo NEK so bile 25. oktobra 1973 izdane Smernice za izdelavo lokacijske dokumentacije za gradnjo NE Krško, od koder povzemamo glavne točke:

- Pri predvidenem pretočnem hlajenju kondenzatorja se bo odvajalo v Savo 260.000 do 350.000 KCal/s odvečne toplote.
- Temperatura Save po premešanju hladilne in savske vode, merjena na kontrolnem mestu iznad Brežic, v nobenem primeru ne sme preseči 28 °C.

- Razlika med temperaturo savske vode nad odvzemom in temperaturo, ki se mora doseči po mešanju s hladilno vodo, ne sme biti pred izlivom Krke večja od $\Delta T = 3\text{ °C}$ in v prerezu na republiški meji $\Delta T = 2\text{ °C}$. Da se izpolni ta pogoj in istočasno zagotovi pri 25 % odvzemu pretoka polno obratovanje elektrarne, je treba zgraditi ustrezne akumulacije.
- Investitor mora zagotoviti stalno merjenje temperatur in ugotavljanje temperaturnih razlik v zato merodajnih profilih ter urediti alarmne naprave, ki naj signalizirajo tako prekoračenje absolutne maksimalne, po zakonu še dopustne temperature 28 °C kakor tudi dopustno temperaturno razliko $\Delta T = 3\text{ °C}$ v prerezu pred izlivom Krke in $\Delta T = 2\text{ °C}$ pri profilu na republiški meji s Hrvaško.

Kot smo že povedali, je doslej hladilna voda iz NEK odtekala neposredno v reko Savo, po izgradnji HE Brežice pa bo odtekala v bazen Brežice. Večinoma so za prihodnje stanje omejitve toplotne obremenitve ostale enake, le omejitev maksimalne temperature 28 °C je odpadla.

Toplotne izpuste iz NEK načeloma definira Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih voda v vode in javno kanalizacijo (Uradni list RS, 2012), podrobneje pa več dovoljenj in odločb, v katerih so določene naslednje bistvene vrednosti:

- odvzem hladilne vode lahko znaša največ $26\text{ m}^3/\text{s}$, če je pretok Save večji od $100\text{ m}^3/\text{s}$,

- odvzem lahko znaša največ 25 % pretoka Save, če je pretok Save manjši od $100\text{ m}^3/\text{s}$,
- rečna temperatura se sme po popolnem premešanju zvišati za največ 3 °C v dnevnem povprečju (ob nastopu izjemnih hidrometeoroloških razmer je možno začasno povišanje meje na $3,5\text{ °C}$ s posebno odločbo),
- hladilna voda na iztoku v Savo ima lahko od junija do septembra temperaturo največ 43 °C , od oktobra do maja pa največ 30 °C .

Aktualna dovoljenja ne navajajo več eksplisitno točke popolnega premešanja, vendar je bila njena določitev zahtevana v postopku priprave Državnega prostorskega načrta za HE Brežice.

5.3 Splošna definicija popolnega premešanja

V zakonodaji EU in v slovenski zakonodaji so omejitve temperature ponekod podane v t.i. točki premešanja, ki je na lokaciji, kjer naj bi bila hladilna in rečna voda popolnoma premešani. Vendar je toplotno dogajanje kompleksen pojav, tako da v bistvu točke popolnega premešanja sploh ni mogoče enoznačno definirati. Temperatura vode v bazenu je namreč razporejena različno vzdolž bazena tako po širini kot po globini, spreminja se tudi s časom, saj celo v izbranem prečnem profilu poleg odpadne toplote iz NEK na razpored temperature vplivajo še raz-

ni drugi parametri, kot so razpored hitrosti v profilu, globina, širina, sončno sevanje, veter ... V bistvu torej nimamo točke premešanja, ampak nekakšno prostorsko ploskev, vzdolž katere se pokaže preseganje predpisane temperature.

Tako je točko premešanja nujno definirati na neki praktičen način.

Poglejmo si primer, ko je vir onesnaženja na vodni gladini in na bregu vodotoka. Ob lak onesnaženja se hkrati širi v vertikalni in transverzalni smeri. Za take primere je značilna Gaussova porazdelitev koncentracije po oblaku onesnaženja z maksimalno vrednostjo onesnaženja $c_{\max}$ na vodni gladini na bregu vodotoka. Standardni odklon $c_{\max}$ opisuje lokalno vrednost onesnaženja c in je praktično indikator širine oblaka onesnaženja (Jirka, 2004).

Točka popolnega premešanja v vertikalni smeri je definirana kot točka, ko koncentracija na dnu struge znaša 90 % koncentracije na vodni gladini. Analogno se lahko definira tudi točka popolnega premešanja v transverzalni smeri (Jirka, 2004).

Analizirali smo stopnjo premešanosti za tri mesece: april, junij, avgust (s povprečnimi mesečnimi parametri). Od teh je avgust zagotovo najbolj kritičen.

Vrednost premešanja se v profilih giblje med 0 % in 80 %, meja 90 % sploh ni dosežena. Zato je bilo v študiji predlagano, da se za točko popolnega premešanja upošteva lokacija na iztoku iz HE Brežice.

6.2 Rezultati

Kot primer izračuna smo izbrali kritične razmere (povratna doba štiri leta). Simulacije toplotnih procesov smo izvajali več kot štiri dni, da se vidi že delno umirjanje in ustaljevanje temperature vode v bazenu. Slika 8 prikazuje razpored temperature v površinskem sloju po štirih dneh simulacij ((IHR, 2010), (IBE, 2011)), slika 9 pa detajl iste situacije, razpored temperature v bližini NEK.

Najpomembnejši rezultat pa je časovni potek temperature na iztoku iz bazena Brežice, kajti tako segreta voda bo tekla dalje v bazen Mokrice. Na sliki 10 je prikazan ta potek za

6 • TOPLOTNI PROCESI V BAZENU BREŽICE

6.1 Izbira karakterističnih meteoroloških razmer

Pri obravnavi obratovanja NEK oziroma toplotnih razmer v bazenu Brežice smo kot enega od kriterijev upoštevali, kakšna bi bila temperatura savske vode po popolnem premešanju. To mešanje je v največji meri zagotovljeno na iztoku iz bazena, na turbinskem iztoku HE Brežice. Tako so bile izdelane simulacije toplotnega dogajanja na tem mestu za različne razmere.

Omenjene analize toplotnih procesov so bile najprej opravljene za povprečne razmere nekaterih tipičnih mesecev v letu. Vendar pa so pogoji hlajenja reaktorjev najbolj kritični v posebnih razmerah, ko nastopi kombinacija zelo nizkega pretoka v Savi ter zelo visokih

temperatur vode v Savi in visokih temperatur ozračja. Tako sta bila na IBE pripravljena še dva scenarija: kritične razmere in ekstremne razmere (IBE, 2003). Glavne karakteristike so prikazane v preglednici 3. Verjetnost nastopa obeh dogodkov (povratna doba) je določena kot produkt verjetnosti nastopa 20-dnevnih nizkih pretokov Save in sočasnega 20-dnevnega obdobja vročih dni (prag 27 °C).

RAZMERE	$Q_{\text{Save}} (\text{m}^3/\text{s})$	$T_{\text{zraka}} (\text{°C})$	$T_{\text{Save}} (\text{°C})$	povr. doba (let)
Kritične	75	27	22,83	4
Ekstremne	50	27	24,61	40

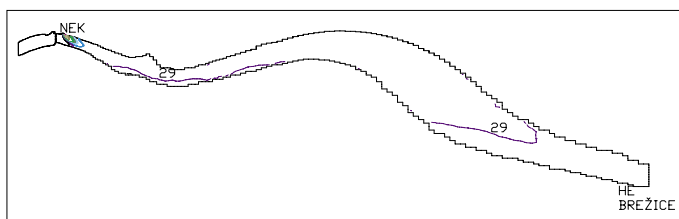
Preglednica 3 • Karakteristike scenarija kritičnih in ekstremnih razmer

nekaj različnih razmer, poleg rezultatov za kritične in ekstremne razmere so prikazani še za nekatere srednje mesečne razmere. Računi pa so bili opravljeni z modelom PCFLOW3D, verzija 20.

Vidi se, da se v tem izračunu kaže, da je povišanje temperature zaradi hladilne vode iz NEK preseženo za več kot dovoljene 3 °C

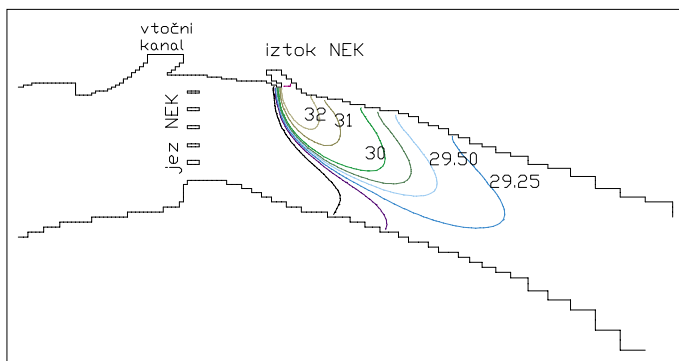
samo v treh primerih: kritičnih, ekstremnih in avgustovskih razmerah. Ker pa so simulacije z novejšo verzijo modela PCFLOW3D (verzija 21) pokazale, da nastane pri takih »vročih« razmerah močnejša stratifikacija in zaradi tega večje oddajanje toplote v ozračje, so po novo umerjenem modelu temperature na iztoku iz bazena Brežice v omenjenih

treh primerih za ca. 0,5 °C nižje. Tako bi do prekoračitve omejitve povečanja temperature za 3 °C prišlo le v kritičnih in ekstremnih razmerah, in sicer največ za 0,5 °C. Takšne izredne situacije se občasno pojavljajo tudi v obstoječem stanju brez zaježitve in jih je pod določenimi pogoji možno reševati z začasnimi dovoljenji za prekoračitve.

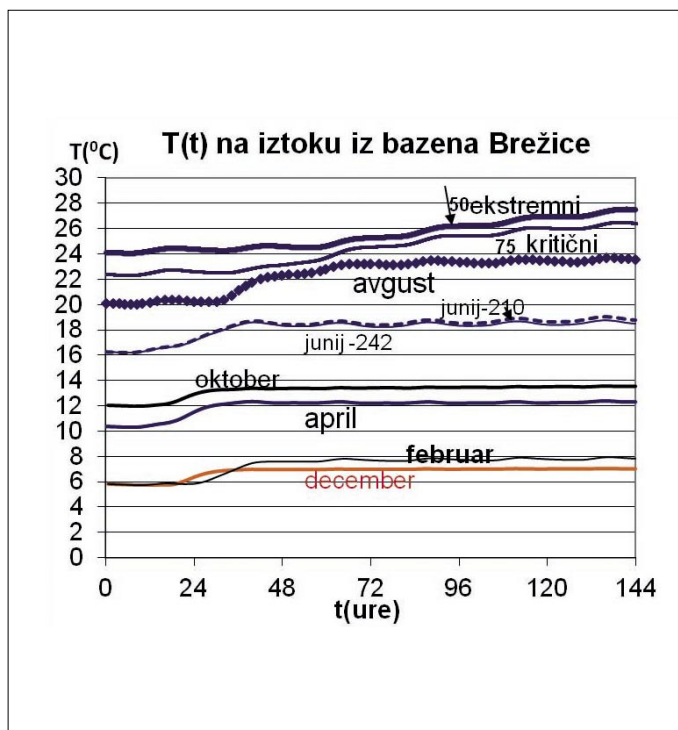


Slika 8 • Izolinije temperature v bazenu Brežice (površinski sloj) po štirih dneh simulaci

Kritične razmere: $Q_{\text{save}} = 75 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{cw}} = 18,75 \text{ m}^3/\text{s}$,
 $T_{\text{save}} = 26,7 \text{ °C}$



Slika 9 • Izolinije temperature v bazenu Brežice (površinski sloj), detalj slike 7a



Slika 10 • Časovni potek temperature na iztoku iz bazena Brežice (turbinski iztok) pri različnih hidroloških in meteoroloških razmerah, izračun po verziji 20

7 • SKLEPI

Po izgradnji HE Brežice bo nastal dolvodno od NEK akumulacijski bazen, v katerega bo odtekala segreta voda iz NEK, ki zdaj odteka neposredno v reko Savo. Nujno je bilo že pri projektiranju bodočega stanja preštudirati toplotne razmere, ki bodo v bodočem bazenu Brežice bistveno drugačne od sedanjih.

Matematični model PCFLOW3D, razvit na Katedri za Mehaniko tekočin UL FGG, je bil preverjen in umerjen z detaljnimi meritvami toplotnih razmer v bazenih Vrhuvo in Blanca.

V nadaljevanju smo ga uporabljali za simulacijo bodočih toplotnih razmer v bazenu Brežice.

Simulirali smo toplotno dogajanje za različne hidrološke in meteorološke razmere in jih predvsem primerjali z omejitvami temperature po slovenski in evropski zakonodaji.

Rezultati so pokazali, da bo glavni pogoj, to je dvig temperature za več kot 3 °C, presežen le v zelo redko nastopajočih razmerah. Ob tem je nujno treba omeniti, da se takšne situacije

pojavljajo že v obstoječih razmerah, hkrati pa je novelacija termične študije celotne Save (IBE, 2012) pokazala, da gorvodni bazeni HE v izrednih hidroloških in meteoroloških razmerah izboljšujejo izhodiščne pogoje (tj. nižajo vstopno temperaturo) za hladilni sistem NEK.

Kot je tudi predvideno po predpisih, bo v bodočih razmerah nujno izvajati monitoring. Rezultati meritev bodo eventualno še pokazali potrebo po dopolnilnih izračunih.

8 • ZAHVALA

Opisane obdelave so se opravljale za potrebe študije HE Brežice – Točka mešanja (IBE, 2012), katere naročnik so bile Hidroelektrarne na spodnji Savi (HESS). Naročniku se zahvaljujemo za dovoljenje za objavo rezultatov.

9 • LITERATURA

- Četina, M., Rajar, R., Širca, A., Hydrodynamic and Water Quality Modelling, Case Studies. Ecological Modelling, 101, pp. 209–228, 1997.
- Četina, M., Rajar, R., Povinec, P., Modelling of Circulation and Dispersion of Radioactive Pollutants in the Japan Sea, Oceanologica Acta 23(7), str. 819–836, 2000.
- Hočevar, A., in dr., Sončno obsevanje v Sloveniji, Zbornik BF, VTOZD za agronomijo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani, 1982.
- IBE, Medsebojni vplivi energetskih objektov ob in na reki Savi z vidika toplotne obremenitve Save. Študija. Ljubljana, Ministrstvo za okolje RS, prostor in energijo: 143 str., 2003.
- IHR, Izvedba hibridnih hidravličnih modelov za območje spodnje vode HE Krško, območje HE Brežice in območje HE Mokrice, Hidrodinamični in transportni model detajla vtoka in iztoka NEK, Poročilo, Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor RS, Ministrstvo za gospodarstvo RS, HESS, 44 str., 2010.
- IBE, Hidrodinamični in transportni model detajla vtoka in iztoka NEK, 3D-računi transporta plavin in dodatni scenariji obratovanja NEK, Poročilo, Ljubljana, HESS, 53 str., 2011.
- IBE, Medsebojni vplivi energetskih objektov ob in na reki Savi z vidika toplotne obremenitve Save, Revizija A, Poročilo, Ljubljana, HESS, 231 str., 2012.
- IHR, Inštitut za hidravlične raziskave, Izvedba meritev stratifikacije Savske vode v akumulacijskih Bazenu HE Vrhovo, HE Boštanj in HE Blanca, Poročilo, Inštitut za hidravlične raziskave, Ljubljana, 2011.
- Jirka, G. H., Bleninger, T., Burrows R., Larsen, T., Environmental quality standards in the EC-water framework directive, Consequences for water pollution control for point sources, E-Water, 2004/04: str. 1–20, 2004.
- NEK, povzeto po: <http://www.nek.si>, 2012.
- Orlob, G. T., Beck, M. B., Jørgensen, S. E., Mathematical modeling of water quality, streams, lakes and reservoirs. Davis, University of California: str. 150–226, 1983.
- Rajar, R., Širca, A., Modeliranje toplotnega onesnaževanja Save in akumulacij, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 14 p., 1998.
- Rajar, R., Četina, M., Hydrodynamic and Water Quality Modelling, An Experience, Ecological Modelling, 101, pp. 195–207, 1997.
- Rajar, R., Žagar, D., Četina, M., Akagi, H., Yano, S., Tomiyasu, T., Horvat, M., Application of three-dimensional mercury cycling model to coastal seas. Ecological Modelling 171, pp. 139–155, 2004.
- Rajar, R., Žagar, D., Četina, M., Horvat, M., and Petkovšek, G., Mass balance of mercury in the Mediterranean sea, Marine Chemistry, 107, pp. 89–102, 2007.
- Tomiyasu, T., Matsuyama, A., Eguchi, T., Fuchigami, Y., Oki, K., Horvat, M., Rajar, R., Akagi, H., Spatial variation of mercury in sediment of Minamata Bay, Japan. Sci. Total Environ. (368), pp. 283–290, 2006.
- Uradni list RS, št. 28/2005, str. 2676, Pravilnik o določitvi odsekov površinskih voda, pomembnih za življenje sladkovodnih vrst rib.
- Povzeto po: <http://www.uradni-list.si/1/objava.jsp?urlid=200528&stevilka=983>, pridobljeno 26. 4. 2012.
- VGI-VGL, Ocenitev uporabe reke Save za odvajanje toplotne energije. Vodnogospodarski inštitut, Vodogradbeni laboratorij, Ljubljana, Poročilo, Naročnik: IB Elektroprojekt, Poročilo, 15 strani, 119 prilog, 1989.

ZADNJI PRIPRAVLJALNI SEMINAR IN IZPITNA ROKA ZA STROKOVNE IZPITE ZA GRADBENO STROKO V LETU 2013

S E M I N A R	I Z P I T	
	Osnovni in dopolnilni	Revidiranje
7.–9. 10.	26. 11.	14. 10.

A. PRIPRAVLJALNI SEMINARJI:

Seminarje organizira **Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS), Karlovska cesta 3, 1000 Ljubljana;**

Telefon: (01) 52-40-200; Fax: (01) 52-40-199; e-naslov: gradb.zveza@siol.net; gradbeni.vestnik@siol.net.

Uradne ure:

ponedeljek, torek, sredo od 09.00 do 13.00 ure;

četrtek od 12.00 do 16.00 ure.

V petek NI URADNIH UR za stranke!

Seminar vključuje **izpitne programe** za:

1. odgovorno projektiranje (osnovni in dopolnilni strokovni izpit)
2. odgovorno vodenje del (osnovni in dopolnilni strokovni izpit)
3. odgovorno vodenje posameznih del
4. Investicijski procesi in vodenje projektov (za kandidate, ki opravljajo dopolnilni strokovni izpit; predavanje se odvija v okviru rednih seminarjev)
5. Kandidati drugih strok lahko poslušajo posamezna predavanja v okviru rednih seminarjev.

(Vsi posamezni programi so dostopni na spletni strani IZS - MSG:

<http://www.izs.si>, v rubriki »Strokovni izpiti«)

Cena za udeležbo na seminarju (za predavanje in literaturo) po izpitnih programih pod 1., 2. in 3. točko znaša 623,22 EUR z DDV, pod 4. točko pa 89,10 EUR z DDV. Cena za udeležbo na posameznem predavanju je 89,10 EUR z DDV.

Kotizacijo za seminar je potrebno nakazati ob prijavi na poslovni račun ZDGITS **SI56 0201 7001 5398 955**, prijavo je potrebno poslati organizatorju (ZDGITS) najkasneje **14 dni pred pričetkom** seminarja!

Prijavni obrazec je mogoče dobiti na spletni strani ZDGITS (<http://www.zveza-dgits.si>).

Izvedba seminarja je odvisna od števila prijav (najmanj 20).

B. STROKOVNI IZPITI

potekajo pri **Inženirski zbornici Slovenije (IZS), Jarška 10-B, 1000 Ljubljana**. Informacije o strokovnih izpiti in izpitnih programih je mogoče dobiti na spletni strani IZS <http://www.izs.si> ali po telefonu (01) 547-33-19 ob uradnih urah (ponedeljek, sredo, četrtek, petek: od 08.00 do 12.00 ure; v torek od 12.00 do 16.00 ure).

NOVI DIPLOMANTI

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Ingrid Car, Rekonstrukcija preлива na pregradi Drtjščica, mentor doc. dr. Andrej Kryžanowski, somentor doc. dr. Simon Schnabl

Nejc Gašperič, Vpliv zrnavostne sestave agregata in vrste superplastifikatorja na reološke lastnosti svežega betona, mentor izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Špela Praček, Obvladovanje tveganj z vidika izvajanja gradbenega nadzora, mentor doc. dr. Primož Banovec

Alja Arrigler, Študij utrditvenih ukrepov za kamnite zidove, mentor izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov, somentor asist. Meta Kržan, izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Aleš Paščinski, Usklajevanje odstopanj pri gradnji po FIDIC pogodbenih pogojih, mentor izr. prof. dr. Jana Šelih, somentor viš. pred. dr. Aleksander Srdić

Miha Vadnjal, Možnosti nadvišanja pregrade Klivnik, mentor doc. dr. Andrej Kryžanowski, somentor doc. dr. Simon Schnabl

Lucija Bonisegna, Zasnova ranžirnih postaj na železniškem omrežju, mentor prof. dr. Bogdan Zgonc, somentor asist. Darja Šemrov

Davor Cvek, Rekonstrukcija ceste z uporabo hladne reciklaže z elektrofiltrskim pepelom, mentor prof. dr. Janez Žmavc, somentor mag. Dejan Hribar

Uroš Šavara, Tirnica, ključni element zgornjega ustroja železniških prog, mentor prof. dr. Bogdan Zgonc, somentor asist. Darja Šemrov

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ VODARSTVA IN KOMUNALNEGA INŽENIRSTVA

Petra Ivančič, Problemi z napihnjnim blatom na komunalnih čistilnih napravah, mentor prof. dr. Boris Kompare, somentor dr. Aleksandra Krivograd Klemenčič

Mihaela Ovčjak, Problematika evtrofnosti in sanacije nenaravnih jezer, mentor izr. prof. dr. Jože Panjan, somentor asist. dr. Mario Krzyk

Martin Jazbec, Analiza razpoložljivosti in rabe vodnih virov na porečju Rižane, mentor prof. dr. Franc Steinman, somentor viš. pred. mag. Sašo Šantl

UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO

VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Peter Behin, Geomehanska analiza varovanja tunelskega izkopa v zahtevnih inženirsko geoloških razmerah, mentor izr. prof. dr. Stanislav Škrabl

Boštjan Belšak, Odvodnja odpadnih voda v delu naselja Dobrovec, mentor viš. pred. Matjaž Nekrep Perc, somentor dr. Uroš Krajnc

Andrej Gril, Verifikacija različnih modelov stavb za analizo njihovih časov glede na število etaž, mentor izr. prof. dr. Matjaž Skrinar

Doroteja Hren, Regulativa na področju opaževanja, mentor izr. prof. dr. Andrej Štrukelj

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Ana Matavž, Presoja ustreznosti rekonstrukcije nedovoljene oblike križišča v Gornji Radgoni v mini krožno križišče, mentor red. prof. dr. Tomaž Tollazzi, somentor Sašo Turnšek, univ. dipl. inž. grad.

Primož Šenveter, Zasnova in računska analiza dvonadstropne industrijske jeklene hale tlorisa 22,5 m x 60 m, mentor red. prof. dr. Stojan Kravanja, somentor doc. dr. Tomaž Žula

1. STOPNJA, UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

Študij je zaključila z diplomskim izpitom:

Manica Napotnik

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

Vsem diplomantom čestitamo!

Skladno z dogovorom med ZDGITS in FGG-UL vsi diplomanti gradbenega oddelka Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani prejemaajo Gradbeni vestnik (12 števil) eno leto brezplačno. Vse, ki bodo želeli po prejemu 12. številke postati redni naročniki, prosimo, naj to čimprej sporočijo uredništvu na naslov: GRADBENI VESTNIK, Karlovška cesta 3, 1000 Ljubljana; telefon: (01) 52 40 200; faks: (01) 52 40 199; e-mail: gradb.zveza@siol.net.

ZDGITS in Uredništvo Gradbenega vestnika

KOLEDAR PRIREDITEV

24.-26.7.2013

ICSA 2013

2nd International Conference on Structures and Architecture
Guimares, Portugalska
www.icsa2013.arquitectura.uminho.pt

23.9.2013

CONSEC13

7th International Conference on Concrete under Severe Conditions
Nanjing, Kitajska
www.consec13.com

24. 9. 2013

1. slovenska konferenca trajnostne gradnje
Kongresni center Brdo pri Kranju, Slovenija
<http://konferencatrajnostnegradnje.si>

24.-27.9.2013

26th IABSE Symposium

Long Span Bridge and Roof Structures – Development, Design and Implementation
Kolkata, Indija
www.bridgeweb.com/MemberPages/Article.aspx?typeid=5&id=2443

25.-27.9.2013

IWCS 2013

Third International Workshop on Concrete Spalling due to fire exposure
Pariz, Francija
<http://mfpa-leipzig.de/index.php?id=64>

1.10.2013

Second International Symposium on UHPFRC

Marseille, Francija
www.afgc.asso.fr

16.10.2013

SLOCOLD 2013

Slovenski nacionalni komite za velike pregrade
Ljubljana, Slovenija
www.slocold.si/symp20years/index-forma.php

6.-9.11.2013

ECOMONDO 2013

17th International Trade Fair of Material & Energy Recovery and Sustainable Development
Rimini, Italija
<http://en.ecomondo.com/>

28.-29.11.2013

Združenje asfalterjev Slovenije

14. kolokvij o asfaltih in bitumnih
Bled, Slovenija
www.zdruzenje-zas.si

2.-6.6.2014

3rd World Landslide Forum "Landslide risk mitigation: Constructing a safe geo-environment"

Peking, Kitajska
www.wlf3.org

30.6.-2.7.2014

EURODYN 2014

9th International Conference on Structural Dynamics
Porto, Portugalska
<http://paginas.fe.up.pt/~eurodyn2014/>

16.-18.7.2014

Footbridge 2014: Past, Present & Future

London, Anglija
www.footbridge2014.com

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