

ZDRUŽENJE ZA BETON SLOVENIJE

**ZBS**

**20**  **let**

**DAN ZBS 2023**

---

**20 LET ZDRUŽENJA**  
LIPICA, 24.-25. maj 2023

---

---

ZBORNİK

---

## **DAN ZBS 2023, 20 LET ZDRUŽENJA ZBORNIK**

LIPICA, 24.-25. MAJ 2023

**ORGANIZATOR:** ZBS, ZDRUŽENJE ZA BETON SLOVENIJE,  
RAVBARJEVA ULICA 13, 1000 LJUBLJANA

**UREDNIKA:** LOJZKA REŠČIČ

**ZNANSTVENI ODBOR:**

PROF. DR. VIOLETA BOKAN BOSILJKOV (PREDSEDNICA),  
DR. ALJOŠA ŠAJNA, DR. JAKOB ŠUŠTERŠIČ, MAG. FRANCI KAVČIČ,  
ZVONKO COTIČ, DR. ANDREJ IPAVEC, DR. DEJAN HRIBAR,  
DOC. DR. MILAN KUHTA, PAVEL MARĐONVIČ, MAG. GREGOR FICKO

**ORGANIZACIJSKI ODBOR:**

DR. ALJOŠA ŠAJNA (PREDSEDNIK), LOJZKA REŠČIČ, ANTON ŠAJNA,  
EMA KEMPERLE, KARMEN JAZBEC, SAŠO SELJAK, INES LIPEC ZORE,  
KATARINA CLEMENTE

**GRADIVA ZBRALA:** LOJZKA REŠČIČ

**TEHNIČNI UREDNIK:** MAG. ANDREJ SOPOTNIK

**OBLIKOVANJE:** HELENA FRAS

**ZALOŽNIK IN IZDAJATELJ:** ZBS, ZDRUŽENJE ZA BETON SLOVENIJE,  
RAVBARJEVA ULICA 13, 1000 LJUBLJANA

**IZDAJA:** PRVA IZDAJA

**DOSTOPNO NA:** WWW.ZABETON.SI

**DATUM JAVNE OBJAVE:** NOVEMBER 2023

**VRSTA PUBLIKACIJE:** E-KNJIGA

**IZDANO:** LJUBLJANA, OKTOBER 2023

**FOTOGRAFIJA NA NASLOVNICI:** PUHOV MOST NA PTUJU  
FOTO: ARHIV PONTING

Besedila niso lektorirana. Za jezikovno in vsebinsko ustreznost prispevkov so odgovorni avtorji.

Glede avtorskih pravic so za objavljena gradiva odgovorni avtorji sami.

Kataložni zapis o publikaciji (CIP) pripravili v Narodni in univerzitetni  
knjižnici v Ljubljani  
COBISS.SI-ID 167864323  
ISBN 978-961-94429-2-0 (PDF)

DAN ZBS 2023 – 20 LET ZDRUŽENJA  
24.–25. MAJ 2023, HOTEL MAESTOSO, LIPICA

# Vsebina

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ZAČETKI ZDRUŽENJA ZA BETON SLOVENIJE</b>   | <b>5</b>  |
| <b>SLAVNOSTNI GOVORI NA OTVORITVI DOGODKA</b>   | <b>11</b> |
| MAG. ANDREJ RAJH, DRŽAVNI SEKRETAR, MINISTRSTVO ZA INFRASTRUKTURO   | 12        |
| PROF. DR. VIOLETA BOKAN BOSILJKOV, PREDSEDNICA ZBS  | 14        |
| DR. H. C. MARJAN PIPENBAHER, PRVI PREDSEDNIK ZBS  | 16        |
| <b>PLENARNA PREDAVANJA 24. MAJ 2023</b>   | <b>18</b> |
| DR. H. C. MARJAN PIPENBAHER<br>ARHITEKTURNA IN KONSTRUKCIJSKA ZASNOVA NOVIH MOSTOV PREKO REKE KRKE V NOVEM MESTU  | 19        |
| MAG. ROMAN MUR<br>DRUGI TIR DIVAČA–KOPER  | 23        |
| MAG. DEJAN JURKOVIČ<br>VIZIJA IN PROJEKTI NADGRADNJE ŽELEZNIŠKEGA OMREŽJA   | 39        |
| KATJA PODGORŠEK<br>TRETJA RAZVOJNA OS   | 46        |
| MAG. SANDI VIRŠEK, MATEJ RUPRET<br>PROJEKT ODLAGALIŠČA NIZKO IN SREDNJE RADIOAKTIVNIH ODPADKOV (NSRAO) V SLOVENIJI  | 61        |
| DR. FRANC SINUR<br>SUHO SKLADIŠČENJE IZRABLJENEGA GORIVA  | 75        |
| PROF. VASA J. PEROVIČ, ASIST. ANJA VIDIC<br>ŽIVLJENJE Z BETONOM   | 83        |
| <b>STROKOVNA PREDAVANJA 24. IN 25. MAJ 2023</b>   | <b>88</b> |
| ANDREJ UNETIČ, DR. JAKOB ŠUŠTERŠIČ, ROK ERCEGOVIČ<br>BETONI ZA HIDROELEKTRARNE NA SPODNJI SAVI  | 89        |
| TILEN TURK, DOC. DR. PETRA ŠTUKOVNIK, MARJAN MARINŠEK, PROF. DR. VIOLETA BOKAN BOSILJKOV<br>PRIMERJAVA OBSTOJNOSTI POSPEŠENO STARANIH CEMENTNIH KOMPOZITOV Z APNENČEVIM IN DOLOMITNIM AGREGATOM | 99        |
| DR. ANDREJ IPAVEC<br>RAZVOJNI IZZIVI CEMENTNE INDUSTRIJE  | 104       |
| KATARINA CLEMENTE, VEDRAN BEKRIČ, MATIC PEVEC, MILOŠ IŠLJAMOVIČ<br>SOODVISNOST KONSISTENCE, UČINKOVITOSTI SUPERPLASTIFIKATORJA IN KAKOVOSTI AGREGATA V BETONU – PRIMERI IZ PRAKSE               | 113       |
| ANA BRUNČIČ, KATARINA ŠTER, DR. SABINA DOLENEC<br>KARAKTERIZACIJA REOLOŠKIH LASTNOSTI CEMENTNIH MATERIALOV DO ZAČETKA VEZANJA   | 126       |

|  |            |
|--|------------|
| <b>ŽIGA KORBAR, DR. ANDRAŽ HOČEVAR, MAG. FRANCI KAVČIČ</b><br>PROJEKTIRANJE BETONSKIH MEŠANIC NORMALNE IN VISOKE TRDNOSTI Z OMEJENO IZBIRO<br>VHODNIH MATERIALOV               | 130        |
| <b>DR. TJAŠA ZUPANČIČ HARTNER</b><br>TRAJNOSTNA GRADNJA, PODPRTA Z BIM TER VR TEHNOLOGIJAMI  | 135        |
| <b>DR. DEJAN HRIBAR, VEDRAN BEKRIĆ, ANDREJ SAJE, ALEKSANDER MRĐA, MEDIN HEKIĆ, KARL<br/>BOGATIN</b><br>LOGISTIČNI CENTER SEŽANA - POSEBNOSTI IZVEDBE NOTRANJE MAB TALNE PLOŠČE | 142        |
| <b>DR. SABINA DOLENEC, DR. ALJOŠA ŠAJNA, DR. MATEJA GOLEŽ</b><br>BETON V KONTEKSTU DEDIŠČINE 20. STOLETJA  | 155        |
| <b>URH STARINA, URŠKA ŽONTA</b><br>VIDNI BETONI NA PROJEKTU MUZEJ SODOBNE UMETNOSTI BLED   | 158        |
| <b>JERNEJ GABERC</b><br>NARAVNE HIDRAVLIČNE APNENE MALTE OJAČANE S KONOPLJINIM PEZDIRJEM Z DODATKOM<br>PUCOLANSKIH MATERIALOV IN PORTLANDSKEGA CEMENTA                         | 168        |
| <b>DR. LUKA ZEVIK, MAG. JURIJ LIČEN</b><br>DIGITALNI BETON   | 185        |
| <b>DR. LUCIJA HANŽIČ, DR. LIDIJA KORAT, KATARINA ŠTER, DR. MATEJA ŠTEFANČIČ</b><br>DODAJALNE TEHNOLOGIJE NA ZAG ZA DIGITALNO GRADBENIŠTVO                                      | 196        |
| <b>MARUŠA MRAK, DR. SABINA DOLENEC</b><br>TERMODINAMSKO MODELIRANJE - UPORABNO ORODJE ZA DOLOČANJE POTEKA HIDRATACIJE S<br>PRIKAZOM RAZVOJA FAZ                                | 202        |
| <b>ZVONKO COTIČ</b><br>NOTRANJA KONTROLA BRIZGANEGA IN MIKROARMIRANEGA BRIZGANEGA BETONA V PREDORIH NA<br>DRUGEM TIRU  | 206        |
| <b>DR. ANKA ILC</b><br>VPLIV TEHNOLOGIJE GRADNJE NA IZBIRO BETONSKIH MEŠANIC ZA VIADUKTA GABROVICA IN<br>VINJAN NA DRUGEM TIRU   | 220        |
| <b>DOBITNIKI PRIZNANJ</b>  | <b>233</b> |
| <b>UTRINKI Z DOGODKA</b>   | <b>236</b> |
| <b>UTRINKI S SLAVNOSTNE PRIREDITVE</b>   | <b>250</b> |
| <b>UTRINKI S STROKOVNE ESKURZIJE</b>   | <b>258</b> |
| <b>SPONZORJI PRIREDITVE</b>  | <b>264</b> |



# Začetki Združenja za beton Slovenije

 Avtorja teksta:  
*Anton Šajna, Lojzka Reščič*

 Fotografije:  
*arhiv ZBS, DARS, Lafarge, Salonit, Ponting*

## **ZBS, ZDRUŽENJE ZA BETON SLOVENIJE JE BILO USTANOVLJENO LETA 2003 KOT STROKOVNO ZDRUŽENJE.**

V letu 1994 se je začela gradnja slovenskega avtocestnega križa. Organizacija gradnje in strokovne naloge, ki jih tak projekt zahteva, so bile velik izziv za gradbeno stroko. Da bi cestna stroka lahko uspešno podpirala uresničevanje projekta gradnje avtocest, so ustanovili strokovno združenje za ceste. Temu je sledila še ustanovitev društva asfalterjev.

Z nadaljevanjem izgradnje avtocest se je izkazalo, da bi tudi na področju proizvodnje in uporabe betona potrebovali podobno strokovno združenje, saj so bili rezultati omenjenih združenj spodbudni. Kar nekaj podobnih pristopov stroke pa je bilo tudi v tujini.

Tako je leta 2003 dozorela ideja, da se ustanovi strokovno združenje, kjer bi celovito obravnavali probleme, povezane z načrtovanjem, proizvodnjo, razvojem in uporabo betona.

Z betonom, gradivom, ki zagotavlja nosilnost, stabilnost in zanesljivost objektov, se ukvarja vrsta različnih strokovnjakov: načrtovalci, cementnarji, proizvajalci sestavin betona, gradbeni izvajalci, nadzorniki in raziškovalne družbe ter sami uporabniki. Beton zahteva celovito strokovno obravnavo tako v fazi načrtovanja, kot tudi uporabe in vzdrževanja.

Zgodaj poleti 2003 so se nekje na Krasu sestali tedanji direktor Salonita g. Funda, direktor DRI g. Di Batista in g. Anton Šajna ter se dogovorili, da ustanovijo združenje za beton. Jeseni 2003 je bila organizirana ustanovna skupščina. Izkazalo se je, da je podpora ustanovitvi združenja, ki se ukvarja z betonom, velika.

Sledili so postopki ustanovitve, registracije in oblikovanja združenja. Imenovali smo ga Združenje za beton Slovenije.

V letu 2004 je bilo združenje registrirano in je začelo delovati.

Združenje si je kot nalogo zadalo skrb za razvoj in uveljavljanje uporabe betona v praksi ter razvoj in dvig betonske stroke. Skrbi naj za izboljšanje kakovosti betona in njegove trajnosti, za uveljavljanje novih postopkov in tehnologij betonov, za zmanjšanje stroškov proizvodnje in vgradnje betona, uveljavlja naj dobre prakse in izmenjavo izkušenj. Sodeluje naj pri pripravi predpisov, tehničnih smernic in standardov ter izobraževanju strokovnjakov. Širi naj informacije, znanja in spoznanja na področju betona. Obravnava naj problematiko uporabe betona in vpliv rabe betona na okolje ter z okoljem povezano problematiko.

ZBS, Združenje za beton Slovenije naj, zato da bi uresničevalo svoje poslanstvo, organizira tečaje, posvetovanja, razprave, seminarje, konference, okrogle mize ... Izdaja naj ali sodeluje pri izdaji priročnikov, smernic, navodil, priporočil, razlag predpisov in standardov.

V ta namen naj se organizirajo strokovna srečanja, strokovne ekskurzije in posveti.

Pri svojem delu bi sodelovalo s priznanimi strokovnjaki, projektanti in načrtovalci, izvajalci in proizvajalci, vlado in vladnimi institucijami, univerzami in inštituti ter sorodnimi društvi in organizacijami. Vsi ti naj bi bili tudi člani združenja.

Formirali so se organi združenja, upravni odbor z 11 člani in svet strokovnjakov, z nalogo načrtovanja in izvedbe strokovnih programov. Za prvega predsednika je bil izbran g. Marjan Pipenbaher, za sekretarja pa g. Anton Šajna.

ZBS, Združenje za beton Slovenije je hitro zaživelo in začelo uspešno opravljati svoje poslanstvo. Do leta 2007, po štirih letih delovanja, je bilo registriranih že 114, večinoma individualnih članov.

Organizirane in dobro obiskane so bile konference: Konferenca o obstojnosti betonov v konstrukcijah, Lipica

2005, Vzdrževanje, zaščita in popravila betonskih konstrukcij, Lipica 2006, Novo na področju betona 2007, Lipica 2007, Izvajanje betonskih del, Lipica 2008, Beton 21. stoletja, Lipica 2010 in Beton v arhitekturi, Lipica 2011.

Konferenc se je povprečno udeležilo več kot 120 udeležencev. Avtorji predavanj so bili pretežno iz Slovenije in tudi iz Avstrije, Hrvaške ter Srbije. Na štirih konferencah je bilo predstavljenih več kot 90 referatov na temo betona in betonskih konstrukcij s predlogi za izboljšanje in razvoj betonske stroke. Predavanja vseh konferenc so bila izdana v zbornikih.

ZBS je v obdobju prvih štirih let pripravilo in izdalo Slovar strokovnih izrazov s področja uporabe betona ter Priročnik za preskušanje betona.

Prevedeni so bili standardi: EN 12620:2002 – Agregati za beton, EN 1340: 2003 – Betonski robniki, EN 197-1 2000/A1 – Cement, prEN 13670:2008, EN 1338-Betonski tlakovci in EN 1339-Betonske plošče za tlakovanje.

V sodelovanju s PIARC Slovenija – Svetovno cestno združenje je bila organizirana okrogla miza Perspektive betonskih vozišč v Sloveniji.

Organizirani so bili seminarji uporabe SIST EN 1026 za gradbene inšpektorje in seminarji na temo preizkušanja betona.

Združenje se je financiralo z donacijami, sponzorstvi, kotizacijami in članarinami.

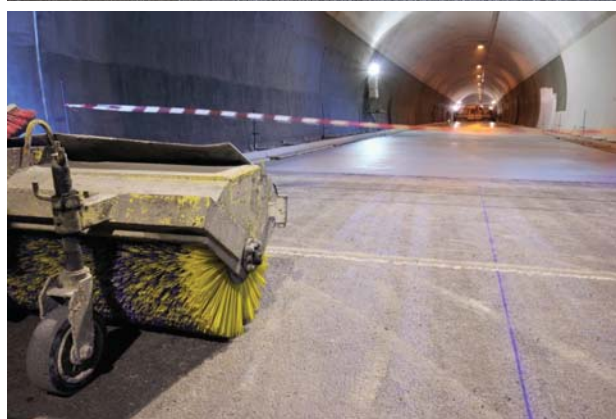
Gospodarska kriza, ki je leta 2006 izbruhnila v ZDA, je v 2009 zajela tudi slovensko gospodarstvo. Propadla je vrsta domačih podjetij. Kriza je najbolj prizadela gradbeništvo. Gradnja avtocestnega križa se je skoraj ustavila, naložbe v stanovanja niso bile poplačane, vrsta največjih gradbenih podjetij, SCT, Primorje, Kraški zidar in druga, je propadla.

Kriza je pomembno vplivala tudi na delovanje ZBS, Združenja za beton Slovenije. Potreba gospodarstva po podpori stroke ni bila več v ospredju, sredstev za podporo delovanju združenja skoraj ni bilo.

Leta 2014 je bil v ZBS pripravljen program prenove in posodobitve združenja. Predvideni so bili številni ukrepi, ki bi omogočili nadaljnje delo in razvoj.

Osveženo in dopolnjeno je bilo vodstvo združenja, ki je zavihalo rokave in poskrbelo za ponovni vzpon. Vodenje je prevzel dr. Jakob Šušteršič, vlogo sekretarke pa Lojzka Reščič.

Ključno vlogo pri prehodu iz krize je imela tudi podpora najprej obeh cementarn, v zadnjih letih pa cementarne Salonit Anhovo, kar je omogočilo profesionalno delo združenja. Z željo poudarjati pomen betona za trajnostno gradnjo objektov je združenje začelo s posveti na temo Beton in trajnostna gradnja, najprej leta 2013 skupaj z Združenjem slovenskih cementarn posvet Be-





tonska vozišča. Nato so v okviru ZBS vse do leta 2021 sledili posveti Beton v zgradbah, Beton in ekstremne podnebne razmere ter Beton in požarna odpornost, ki je bil tudi del evropskega projekta FIREXPART. Peti posvet leta 2021, Beton v krožnem gospodarstvu, je nekako zaokrožil trajnostni vidik betona.

Prav tako so potekale vse že predhodno uspešno zastavljene dejavnosti, kot je bil vsakoletni Dan ZBS z vedno zanimivimi predavanji. Ob spremembah standardov za beton EN 206 in SIST 1026 je bil v 2018 ponovno izdan Priročnik za beton in na temo sprememb standardov organizirana številna izobraževanja.

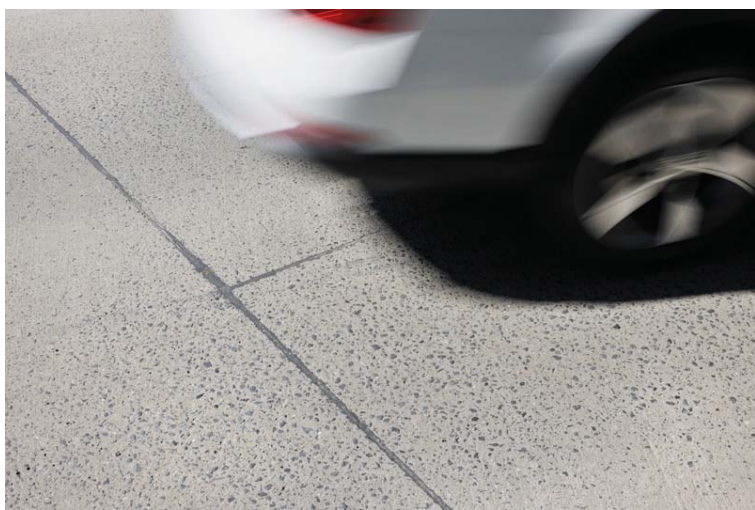
Združenje je organiziralo enkratne odmevne dogodke, "Dan betona 2017 Maribor", praktično delavnico "Izgradnja betonskega krožišča", ki je potekala v Salonitu, izdana je bila publikacija "Vozišče Ajševica – izvedeno v betonu".

Pripravita se dva filma na temo betonskih vozišč: "Betonska vozišča za potrebe industrijskih kompleksov" in "Valjan beton za vozišča". Vse to si lahko ogledamo na spletni strani združenja [www.zabeton.si](http://www.zabeton.si).

Strokovnjaki iz združenja sodelujejo pri pripravi standardov in tehničnih specifikacij, prevedli in objavili so avstrijsko smernico za brizgani beton. Sodelujejo tudi pri izgradnji prvega betonskega krožišča v Sloveniji, krožišča Ajševica.

Letos tako ZBS, Združenje za beton Slovenije praznuje 20-letnico delovanja močnejše, kot je bilo kadarkoli do zdaj. In jubilejno strokovno srečanje je spet v Lipici, kjer je bil vrsto let sedež strokovnih srečanj Združenja za beton Slovenije.

V vseh teh 20 letih je bilo v delo ZBS vloženega veliko prostovoljnega dela. Težko je oceniti, kdo je prispeval več, kdo manj. Hvala vsem! Nekaterim najzaslužnejšim članom smo se za njihov prispevek zahvali s posebnimi priznanji.



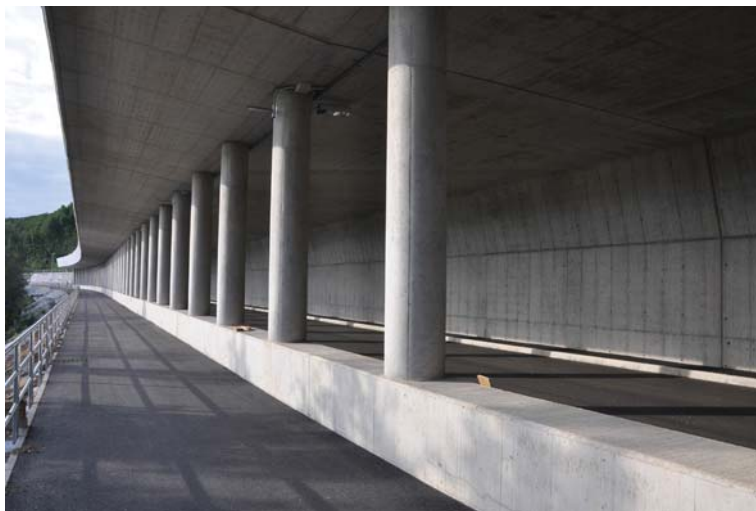
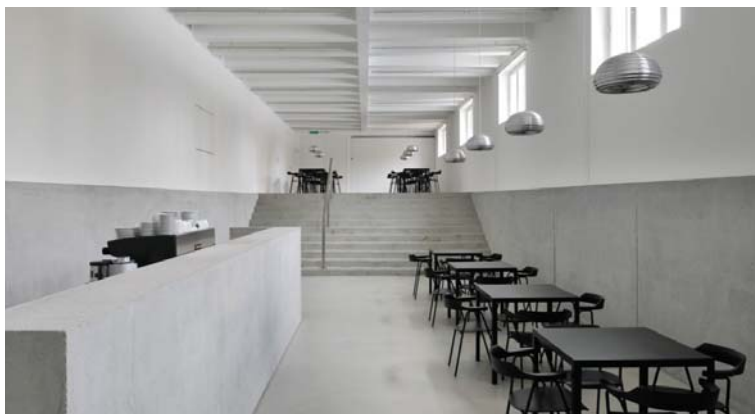














# SLAVNOSTNI GOVORI NA OTVORITVI DOGODKA

LIPICA, 24. MAJ 2023

---



**DAN ZBS 2023**

MAG.

# Andrej Rajh

DRŽAVNI SEKRETAR, MINISTRSTVO ZA  
INFRASTRUKTURO

---

**SPOŠTOVANI IN CENJENI  
GOSTJE, ZAHVALJUJEM SE VAM  
ZA PRIJAZNO MOŽNOST, DA  
VAS NAGOVORIM OB OBLETNICI  
USTANOVITVE ZDRUŽENJA ZA  
BETON SLOVENIJE.**

Kot gradbenik po svoji strokovni izobrazbi in tudi skozi svoje delovne izkušnje v različnih gospodarskih družbah seveda poznam in razumem pomen tega temeljnega gradbenega materiala, brez katerega si ne moremo predstavljati razvoja sodobnih civilizacij. Zgodovina betona kot gradbenega materiala sega celo v davne čase rimskega imperija. Ko sem se pripravljaj na ta nagovor

me je presenetil podatek da je iz betona zgrajen celo znameniti rimski Panteon. To je bil, lahko rečemo, prvi, antični beton, ki pa je že imel lastnosti, kot danes, da zagotavlja zanesljivost, varnost in trajnost konstrukcij in objektov. Rimski Panteon še vedno stoji, in privablja številne obiskovalce, ki občudujejo znanje in spretnost antičnih gradbenih mojstrov izpred tisočletij. Prav to dokazuje, da sta znanje in strokovnost vedno bistvena temelja katerekoli dejavnosti. Tako je bilo nekoč, še pred našim štetjem, in tako je tudi danes, leta 2023, v digitalni dobi. Beton ostaja material brez katerega ni modernega gradbeništva. Vaše združenje združuje strokovnjake, ki v teoriji in praksi obvladajo uporabo betona, skrbijo za njegov razvoj ter izboljšanje kakovosti in





in vedno bodo bile. Pa da ne bom preveč zašel v teme, ki niso neposredno povezane z današnjo slovesnostjo. Ob dvajset letnici Zdrženja za beton Slovenije vam iskreno čestitam in želim, da boste še naprej znali povezovati prakso in teorijo na vašem področju in tako pomembno prispevali k našemu skupnemu razvoju. Hvala lepa.

trajnosti betonskih izdelkov. Zelo pomemben se mi zdi vaš prispevek pri pripravi predpisov, tehničnih smernic, standardov in norm, skrbi za izobraževanje strokovnjakov, širjenju informacij, znanja, spoznanj na področju betona. V tej luči se mi zdi zato pomembna usmeritev, ki mu vaše združenje vse bolj poudarjeno sledi: obravnava vplivov na okolje in z okoljem povezano problematiko uporabe betona. Trajnostna usmeritev oz. usmerjenost ne sme biti zgolj modna beseda, ki jo zlasti politikim prepogosto izrečemo z lahkoto in prevečkrat, ampak mora biti ključna usmeritev razvoja naše družbe. Če ne bomo trajnostni v dejanjih kot civilizacija ne bomo preživeli. Narava nas na to neizpodbitno dejstvo žal opominja vse bolj. Pogosto v obliki poplav, suš, vremenskih ujm in drugih naravnih katastrof, ki so posledica neodgovornega odnosa do našega planeta. Spoštovani, Ministrstvo za infrastrukturo ima za investicije in vzdrževanje cestnega, železniškega in kolesarskega omrežja namenjeno približno milijardo evrov sredstev. To pomeni stotine projektov, pri katerih se tako ali drugače srečujemo z marsikom izmed vas, ki ste povezani v Zdrženju za beton. Kot državni sekretar na Infrastrukturnem ministrstvu lahko ocenim, da je naše sodelovanje dobro. Kljub občasnim težavam, s katerimi se vi in mi srečujemo pri realizacijah projektov. Včasih se mi zdi, da kot družba še nismo povsem dozoreli, da bi v celoti razumeli, da javno dobro pomeni, da znamo skupne interese postaviti nad osebne in da je treba sodelovati in iskati skupne točke, ne pa razlike med ljudmi, ki vedno so bile

PROF. DR.

# Violeta Bokan Bosiljkov

PREDSEDNICA ZBS

**“LETOS OBELEŽUJEMO 20 LET  
OD USTANOVNE SKUPŠČINE  
ZDRUŽENJA ZA BETON  
SLOVENIJE, KI JE BILA JESENI  
2003 OB GRADBIŠČU VIADUKTA  
ČRNI KAL.”**

Najlepše se zahvaljujem magistru Andreju Rajhu za te vzpodbudne besede. Sedaj pa moj nagovor.

Spoštovani mag. Andrej Rajh, državni sekretar, Ministrstvo za infrastrukturo, spoštovani častni člani Zdrženja za beton Slovenije, prvi predsednik združenja in častni doktor Univerze v Mariboru, predvsem pa svetovno znani projektant mostov in viaduktov, gospod Marjan Pipenbaher, ter eden od treh pobudnikov ustanovitve Zdrženja in prvi sekretar Zdrženja gospod Anton Šajna. Spoštovani vabljeni predavatelji plenarnih predavanj, predavatelji strokovnih predavanj, redni člani Zdrženja za beton Slovenije ter vsi ostali udeleženci Dneva ZBS 2023.

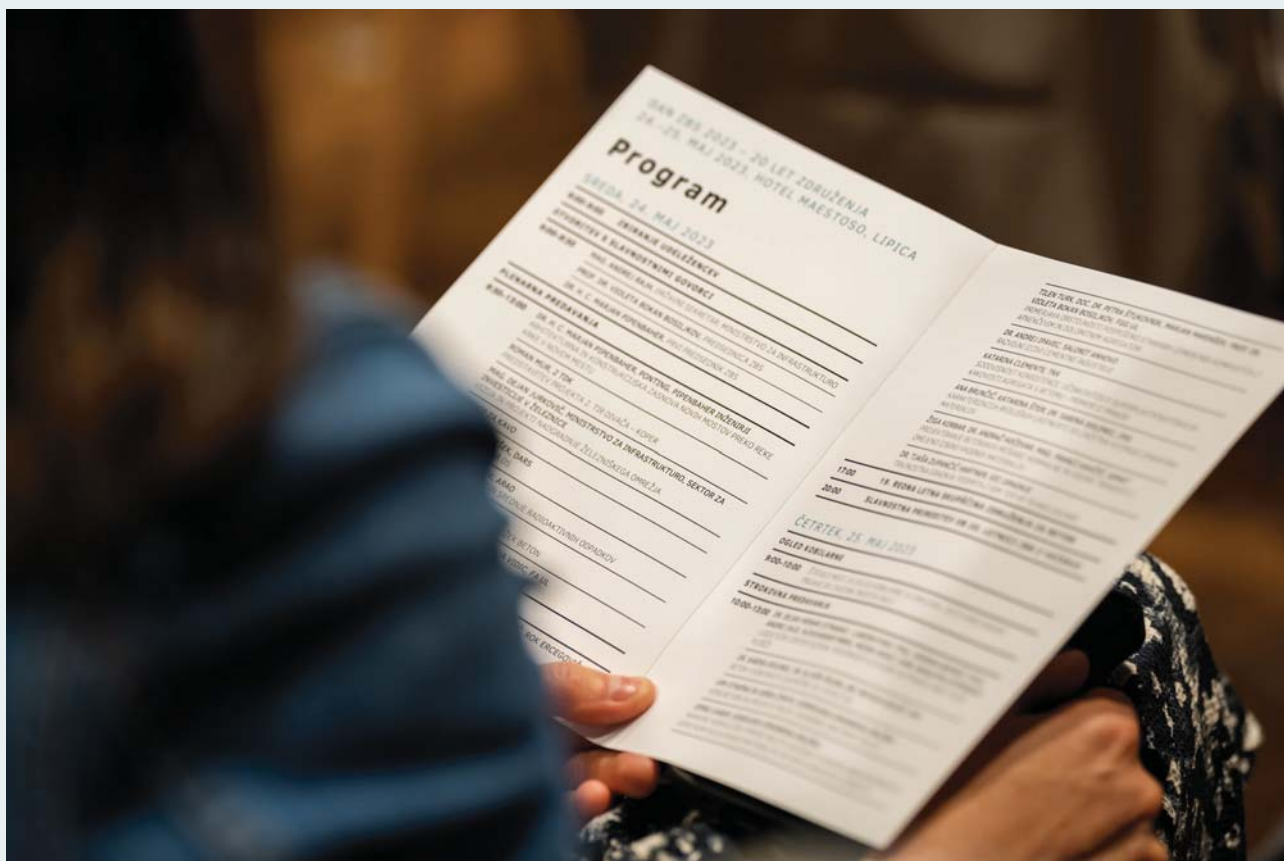
Letos obeležujemo 20 let od ustanovne skupščine Zdrženja za beton Slovenije, ki je bila jeseni 2003 ob gradbišču viadukta Črni Kal. In, če me spomin ne vara, na dan, ko so izvedli prvo vezavo voziščnih konstrukcij prostokonzolne gradnje, torej zgornje konstrukcije na velikih enojnih epsilon stebrih z voziščno konstrukcijo, zgrajeno na jeklenem odru na manjših dvojnih stebrih. Namen ustanovitve ZBS je bila skrb za razvoj in uveljavljanje uporabe betona v praksi ter razvoj in dvig betonske stroke. Zdrženje skrbi za izboljšanje kakovosti betona in njegove trajnosti, uveljavljanje novih postopkov in tehnologij priprave in uporabe betona, zmanjšanje stroškov proizvodnje in vgradnje betona, uveljavljanje dobre prakse in za izmenjavo izkušenj. Sodeluje pri pripravi predpisov, tehničnih smernic, standardov in norm, skrbi za izobraževanje strokovnjakov in širi



informacije, znanja in spoznanja na področju betona. Obravnava seveda tudi vplive na okolje in z okoljem povezano problematiko uporabe betona. Promovira beton kot material za trajnostne konstrukcije. Pri svojem delu sodeluje s priznanimi strokovnjaki, projektanti in načrtovalci, izvajalci in proizvajalci, z vlado in vladnimi institucijami ter univerzami in inštituti, kakor tudi s sorodnimi društvi in organizacijami. Veseli me, da smo se ob tem okroglem jubileju ponovno zbrali v Lipici, na dvodnevni konferenci v hotelu Maestoso. Lipica in hotel Maestoso sta gostila tradicionalne konference združenja med leti 2005 in 2011. Te konference so naslavljale takratne aktualne teme s področja betona in betonskih konstrukcij. Naj naštejem samo nekaj naslovov: Obstojnost betonov v konstrukcijah, Vzdrževanje, zaščita in popravila betonskih konstrukcij, Novo na področju betona 2007, Dosežki betonske stroke, Beton 21. stoletja

in Beton v arhitekturi. Gospodarska kriza, ki se je v Sloveniji začela leta 2009, je močno prizadela tudi gradbeništvo in okrnila delovanje Združenja za beton Slovenije. Ponovni zagon je dobilo Združenje leta 2013, ko se je povezalo z Združenjem slovenskih cementarn Slocem, pri organizaciji in izvedbi posvetov na temo beton in trajnostna gradnja. Namesto konferenc v Lipici smo začeli organizirati enodnevna izobraževanja, predvsem v Ljubljani, največkrat na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, katere poslanstvo je tudi skrb za razvoj gradbeniške stroke. Poimenovali smo jih Dan ZBS. Zanimiva in aktualna predavanja izbranih strokovnjakov ter minimalna kotizacija so zagotovili zgledno udeležbo inženirjev, ki v Sloveniji delujejo na področju betona in betonskih konstrukcij. Današnji dan ZBS 2023 ni poseben le zaradi praznovanja 20 let združenja; poseben je zaradi številnih predavanj in predavateljev, ki bodo na konkretnih projektih pokazali nepogrešljivost armiranega betona kot konstrukcijskega materiala, ki zagotavlja mehansko odpornost in stabilnost, in s tem varnost ključnih slovenskih infrastrukturnih objektov. Vendar to niso vse prednosti armiranega betona. To je tudi material, ki zagotavlja dolgo življenjsko dobo infrastrukture in varnost pred radioaktivnim sevanjem, zagotavlja sisteme za čiščenje odpadnih voda ter s pomočjo vodnih zadrževalnikov in pregrad zaloge vode tudi na območjih, kjer bi vode sicer primanjkovalo. Poleg tega ga lahko 100% recikliramo in uporabimo v novih gradbenih proizvodih. Novi kemijski dodatki nam omogočajo premoščaje izzivov, ki jih pred betonersko stroko

postavlja zeleni prehod. Napredne poskusne metode zagotavljajo kontinuirano spremljanje lastnosti cementnih kompozitov, od svežega do strjenega stanja, digitalne tehnologije pa najboljšo izrabo materiala, saj ga vgradimo samo tam, kjer optimalno prispeva k prenosu obremenitev. Po drugi strani pa ugotavljamo, da zmes kamnitih zrn v betonih ni inerten material. Še posebej to velja za dolgo življenjsko dobo konstrukcijskih elementov. Vključevanje sekundarnih surovin in različnih odpadkov, kot so na primer rudniške jalovine, pa lahko betonerski stroki povzroči nove težave in zmanjša varnost betonskih konstrukcij. Vse te vidike naslavlja današnja predavanja. Verjamem, da jim boste z zanimanjem sledili. Seveda nismo pozabili na druženje s kolegi in različnimi strokovnjaki med odmori za kavo in na današnji večerni slovesnosti z večerjo. Želim vam res poseben dogodek in upam, da se bomo v Lipici večkrat srečali tudi v prihodnje. Hvala.





DR. H. C.

# Marjan Pipenbahr

PRVI PREDSEDNIK ZBS



**“BILO JE LETO 2003. IZGRADNJA PRIMORSKEGA AVTOCESTNEGA ODSEKA IN ODSEKA TROJANE STA BILA V POLNEM RAZMAHU.”**

Spoštovani gostje, spoštovani gospod državni sekretar, spoštovane gospe in gospodje, kolegice in kolegi.

Bilo je leto 2003. Izgradnja primorskega avtocestnega odseka in odseka Trojane sta bila v polnem razmahu. Septembra 2004 pa je bila Ljubljana že povezana s Koprnikom s sodobno avtocestno povezavo. Hvala bogu, da se je leta 1994 končno pričela gradnja avtocestnega križiča, ki je predstavljal velik izziv za slovensko gradbeno stroko. In takrat je cestna stroka ustanovila strokovno združenje za ceste, asfalterji svoje strokovno združenje, ki so v bistvu podprli ta projekt avtocestnega programa.

2003 je tu dozorela ideja, da se ustanovi strokovno združenje, ki bo celovito obravnavalo problematiko načrtovanja, razvoja in uporabe betona. Poleti 2003 so se ob dobrem pršutu in svežem kraškem teranu na Krasu sestali tedanji direktor Salonita, g. Funda, bivši direktor DRI-ja Metod Di Batista in tedaj že bivši državni sekretar g. Anton Šajna in sprejeli sklep, da se ustanovi Združenje za beton Slovenije. Sledili so postopki ustanovitve in registracije združenja v letu 2004, ko je v bistvu združenje že delovalo. Združenje si je zadalo skrb za razvoj in uveljavljanje ter uporabo betona v praksi, za razvoj stroke, za izboljšanje kakovosti, trajnosti betona in seveda uveljavljanje novih postopkov in tehnologij sodobnih betonov. Sklenjeno je tudi bilo, da Združenje za beton organizira posvetovanja, razprave, seminarje, tečaje in okrogle mize. Izdajali naj bi se tudi priročniki, smernice, navodila, in vse te stvari so se v vsem tem ob-





dobju uresničile. V vsem delu se je sodelovalo s strokovnjaki, projektanti, načrtovalci in inštituti ter sorodnimi društvi in tudi organizacijami v tujini. Združenje je takrat hitro zaživelo in je imelo leta 2007 že 114 članov. V naslednjih letih so bile v Lipici redno organizirane konference, ki se jih je udeležilo do 200 obiskovalcev. Seveda je potem prišla kriza, do leta 2009, ki je pomenila upad investicij, hiter propad slovenskih podjetij, med njimi SCT, Primorje, Kraški Zidar, Gradis ... Gradnja slovenskega avtocestnega križa se je takrat praktično ustavila. To je seveda močno občutilo tudi Združenje, ampak je po letu 2014 doživelo neki preporod s programom prenove, posodobitve, začelo se je nadaljnje delo. Sedaj praznujemo 20 let. Kar me kot prvega predsednika veseli je, da je takrat združenje močno povežalo slovensko stroko in poglobilo znanje s področja betona. Tu se moram predvsem zahvaliti kolegom iz Združenja, predvsem tudi prejšnjemu in aktualnemu vodstvu, in pa zelo pomembnemu organu znotraj združenja, svetu strokovnjakov, ki so skrbeli za pripravo in izdajo priročnikov, redno organizacijo konferenc in pripravo zbornikov. Na koncu moram tudi povedati in se še posebej zahvaliti gospodu Antonu Šajni, ki je bil prvi sekretar in takrat dejansko gonilna sila tega združenja pri nastanku in uveljavitvi. Ljubezen do košarke in skrbi pri organizaciji združenja so bile tako velike, da se enostavno niti ni imel časa postarati. Vse dobro vam želim in prijetna dva dneva v Lipici. Hvala!

# PLENARNA PREDAVANJA

24. MAJ 2023

---



**DAN ZBS 2023**

DR. H. C. MARJAN PIPENBAHER

PONTING, PIPENBAHER INŽENIRJI

# Arhitekturna in konstrukcijska zasnova novih mostov preko reke Krke v Novem mestu



## POVZETEK

Prestolnica dolenjske pokrajine Novo mesto je enako kakor znamenito mesto Kostanjevica in grad Otočec objeto z reko Krka kar s treh strani. Zaradi številnih novih kolesarskih povezav ter hitro rastočega cestnega in železniškega prometa obstoječi mostovi ne zagotavljajo več ustrezne pretočnosti in prometne povezanosti z Ljubljano in Zagrebom ter z bodočo hitro cestno navezavo, ki bo direktno povezala Novo mesto s hrvaškim avtocestnim križiščem Bosiljevo.

V preteklih 3 letih so bili razpisani 4 javni natečaji, in sicer za avtocestni in peš most na vzhodni avtocestni obvoznici Novega mesta, cestni most in most za pešce na Zahodni obvoznici Novega mesta,

## ARCHITECTURAL AND STRUCTURAL CONCEPT OF NEW BRIDGES OVER THE KRKA RIVER IN THE CITY OF NOVO MESTO

### ABSTRACT

*The capital of the Dolenjska region, Novo mesto is the same as the famous city of Kostanjevica and the Otočec castle, surrounded by the Krka River on*

natečaj za most za pešce preko reke Krke v Irči vasi ter natečaj za most za pešce na kolesarski povezavi Loka – Kandija. Tako je predvideno, da bo v naslednjih petih letih zgrajenih 6 novih mostov, in sicer avtocestni most na Vzhodni obvoznici, cestni most na Zahodni obvoznici ter 4 novi mostovi za pešce, od katerih sta dva, mostova za pešce Loka – Kandija in v Irči vasi že zgrajena in sta bila predana v uporabo v sredini meseca maja.

Avtorski tim inženirjev iz podjetij Pipenbaher Consulting Engineers in Ponting je z zmago na natečajih pridobil posel za izdelavo izvedbenih projektov mostov. Različna arhitekturna in konstrukcijska zasnova mostov sledi spremenljivi morfologiji krajine in bregov reke Krke. Inventivno zasnovani mostovi bodo nedvomno predstavljali novo kvaliteto v prostoru in se bodo po izgradnji mirno vključili v prelepo krajino reke Krke.

*three sides. Due to the many new bicycle connections and the rapidly growing road and rail traffic, the existing bridges no longer provide adequate flow and traffic connectivity with Ljubljana and Zagreb and with the future high-speed road connection that will directly connect Novo mesto with the Croatian highway intersection Bosiljevo.*

*In the past three years, four public competitions were announced: the highway and pedestrian bridge on the eastern motorway bypass of Novo Mesto, the road bridge and pedestrian bridge on the Western Bypass of Novo Mesto, the competition for the pedestrian bridge over the Krka River in Irča vas and the competition for the pedestrian bridge on the cycle link Loka - Kandija. It is planned that 6 new bridges will be completed in Novo mesto over a period of five years, namely the highway bridge on the Eastern ring road, the road bridge on the Western ring road and 4 new pedestrian bridges, two of which, the Loka - Kandija and Irča vas pedestrian bridges are already completed and were open for traffic in the middle of May.*

*The author's team of engineers from the companies Pipenbaher Consulting Engineers and Ponting have been awarded the contract for the Detail design of 6 new bridges after winning the competitions. The varying architectural and structural design of the bridges follow the changeable morphology of the landscape and the banks of the Krka River. Inventively designed bridges will undoubtedly represent a new quality in the area and after construction will peacefully integrate into the beautiful landscape of the Krka River.*







- Road bridge on highway connection A2 Karavanke–Obrežje near Novo mesto till connection Maline
- Stress-ribbon footbridge over Krka river

1



- Stress-ribbon Footbridge Irča vas (completed)

2



- Footbridge Loka – Kandija (completed)

3



- Road bridge on Novo mesto western road bypass
- Suspended footbridge under road bridge

4



Ponting  
Consulting Engineers  
www.ponting.si

Marjan Pipenbafer / NEW BRIDGES OVER KRKA RIVER IN NOVO MESTO CITY

Pipenbafer  
Consulting Engineers  
www.pipenbafer-consulting.com



MAG. ROMAN MUR

2TDK

# Drugi tir Divača–Koper



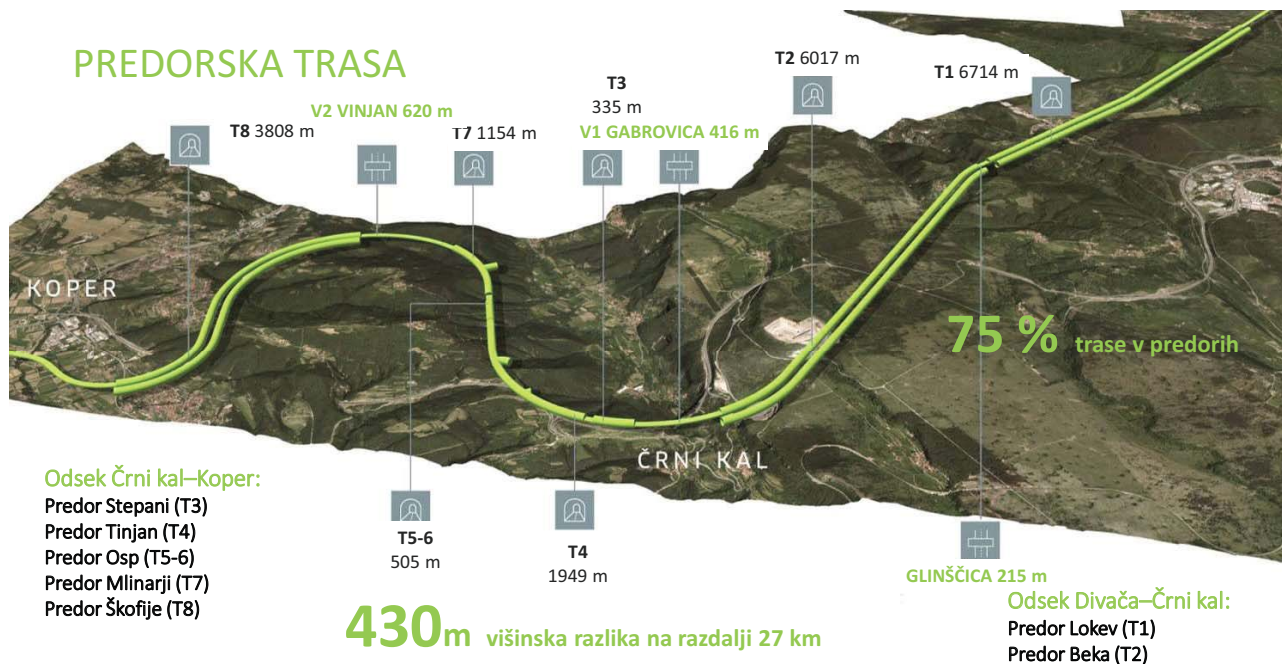
## DRUGI TIR DIVAČA–KOPER

24. maj 2023

mag. Roman MUR, univ.dipl.inž.grad.



## PREDORSKA TRASA



## DRUGI TIR V ŠTEVILKAH – 7 PREDOROV

### Odsek Divača–Črni kal:

**Predor Lokev (T1):**  
 glavna cev 6714 m  
 servisna cev 6683 m

**Predor Beka (T2):**  
 glavna cev 6017 m  
 servisna cev 6041 m

### Odsek Črni kal–Koper:

**Predor Stepani (T3)** 335 m  
**Predor Tinjan (T4)** 1949 m  
**Predor Osp (T5-6)** 505 m  
**Predor Mlinarji (T7)** 1154 m

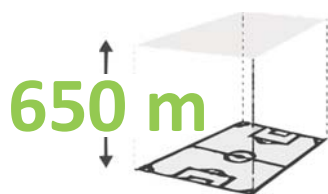
**Predor Škofije (T8):**  
 glavna cev 3808 m  
 servisna cev 3808 m



2TDK ■

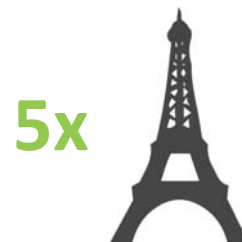
4

## DRUGI TIR V ŠTEVILKAH

Izkopi – 4.200.000 m<sup>3</sup>Transporti – 5.900.000 m<sup>3</sup>

40.000x

Jeklene armature – 35.000 ton



10.355

posajenih sadik  
lokalnih rastlin za  
ponovno ozelenitev  
ob trasi



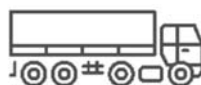
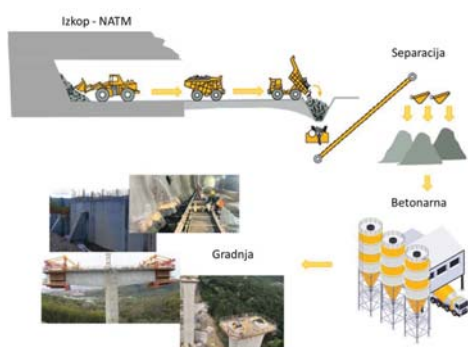
2TDK ■

5

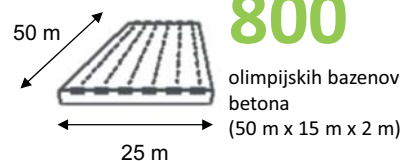
## DRUGI TIR V ŠTEVILKAH

**Agregat – 1.500.000 m<sup>3</sup>**  
(večina pridobljena s predelavo apnenca iz izkopa)

**Cement – 600.000 ton**  
(50% letne proizvodnje Cementarne Anhovo)

**Beton – 2.000.000 m<sup>3</sup>**

15.000x



## DRUGI TIR V ŠTEVILKAH

Vgrajena sidra in sulice – 2600 km

**2x**dolžina  
slovenske  
mejeveč kot  
**2000 km** električnih  
vodnikovGeotekstil + hidroizolacije – 2.350.000 m<sup>2</sup>**360x**več kot  
**300 km**  
cevi**30.000**  
popisnih postavk  
gradbenih del

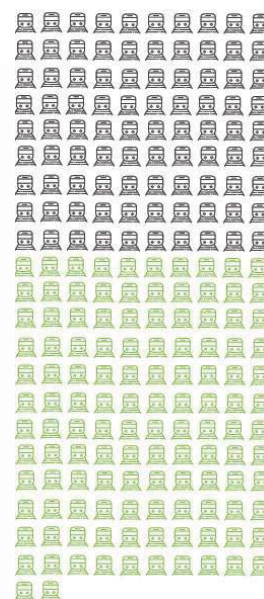
## PREDNOSTI DRUGEGA TIRA

**160 km/h**

maksimalna hitrost potniških vlakov

**17 min**potovalni čas zdaj  
45 min**120 km/h**

maksimalna hitrost tovornih vlakov

**25–35 min**potovalni čas  
zdaj 110 min**90****212**povečanje  
število  
vlakov

## VPLIV NA GOSPODARSTVO, OKOLJE, TURIZEM



FOTO: LUKA KOPER

DO 3 MILIJARDE EUR  
DODANE VREDNOSTI  
ZA SLOVENSKO GOSPODARSTVO



FOTO: LUKA KOPER

OKOLJSKI POMEN  
PREMIKA TOVORA S CEST  
NA ŽELEZNICE



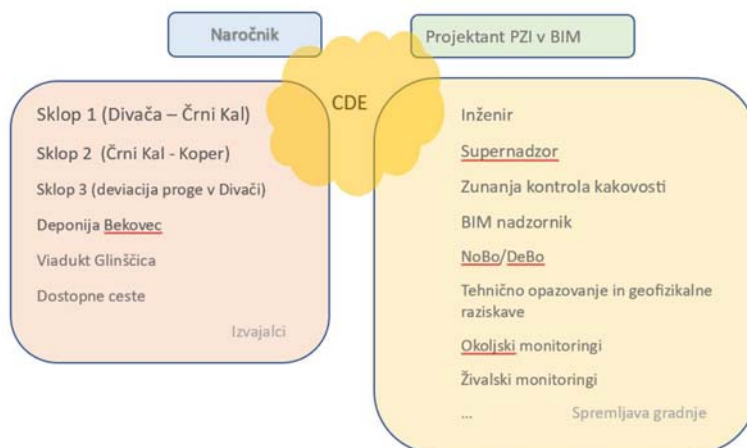
PRIVLAČNOST POTOVANJA Z  
VLAKOM NA MORJE IN NAZAJ

## STRUKTURA PROJEKTA

1. **Pripravljalna dela (izvedeno)**
  - ✓ pripravo projektne dokumentacije za izvedbo del;
  - ✓ izvedbo arheoloških izkopavanj;
  - ✓ izvedbo geološko-tehničnih in hidrogeoloških raziskav;
  - ✓ izgradnjo deviacije obstoječe proge v Divači;
  - ✓ izgradnjo dostopnih cest;
  - ✓ izgradnjo predvropa v Divači in Črnem kalu;
  - ✓ izgradnjo objektov za prečkanje reke Glinščice;
  - ✓ prestavitve komunalnih vodov.
2. **Sklop 1 & 2: Glavna gradbena dela Odsek 1 & 2 (v teku)**
3. **Sklop 3: Zgornji ustroj, železniški in predorski sistemi (razpisi)**



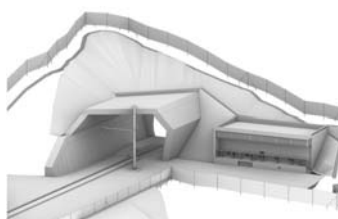
## UDELEŽENCI PRI GRADNJI



## PRIPRAVLJALNA DELA – že izvedeno



Arheološka izkopavanja



Projekt za izvedbo (PZI), recenzija



Geološke raziskave



## ŽE IZVEDENO – dostopne ceste



23 km dostopnih cest.

## ŽE IZVEDENO – Deponija Bekovec

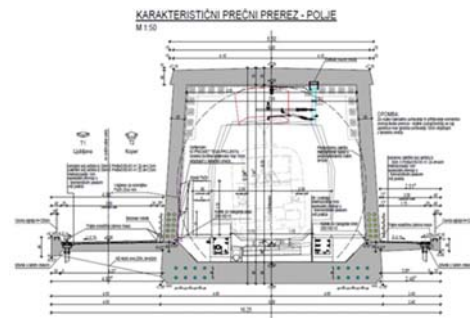
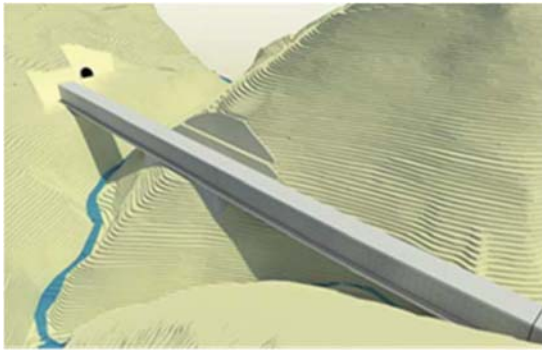


2021



2023

## ŽE IZVEDENO – viadukt Glinščica 1/3



Razpon:  $75.0 + 45.0 + 100.0 = 215.0$  m. Tehnologija gradnje - klasična na podpornem odru.

## ŽE IZVEDENO – viadukt Glinščica 2/3



februar 2021



Podporna konstrukcija



Sprememba temeljenja OP1

## ŽE IZVEDENO – viadukt Glinščica 3/3



avgust 2021



oktober 2022



avgust 2023

## GRADNJA – odprta trasa Divača



Odprta proga Divača – predor T1.



## GRADNJA – predori (izkop in primarna podgradnja)



Pričetek september 2021. Trenutno izkopano 22.000 m predorskih cevi.

## GRADNJA – preboji predorov



Predor T7, junij 2022

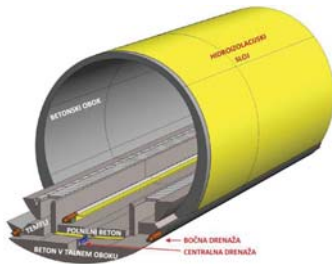


Predor T3, november 2022



Predor T8, marec 2023

## GRADNJA – notranja obloga predorov



Sistem notranje obloge



Opažni voz



Izvedba notranje obloge

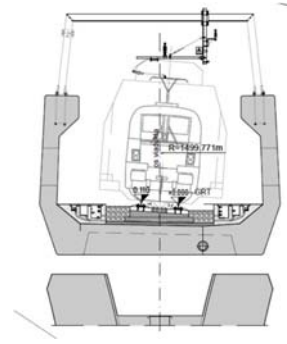
## GRADNJA – kraški pojavi



V predorih T1 in T2 smo do sedaj naleteli na 36 t.i. kraških pojavov.



## GRADNJA – viadukt V1 Gabrovica



Razpon:  $48.0 + 5 \times 64.0 + 48.0 = 416.0$  m. Tehnologija gradnje - postopno narivanje.

## GRADNJA – viadukt V1 Gabrovica



Višina stebrov 13 – 64 m

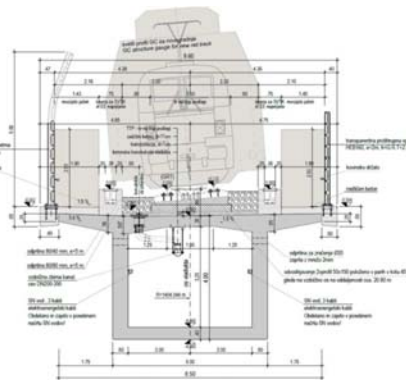


Delavnica



Narivanje 2.segmenta

## GRADNJA – viadukt V2 Vinjan



Razpon:  $60.0 + 80.0 + 4 \times 100.0 + 80.0 = 620.0$  m. Tehnologija gradnje – prosto konzolna gradnja.

## GRADNJA – viadukt V2 Vinjan



Globoko temeljenje - vodnjaki



Višina stebrov 10 - 55 m



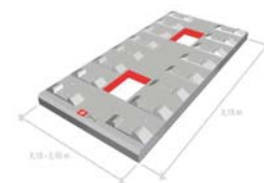
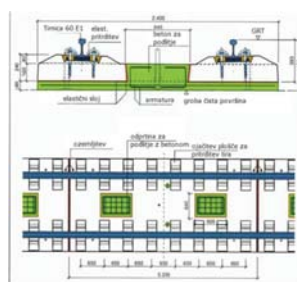
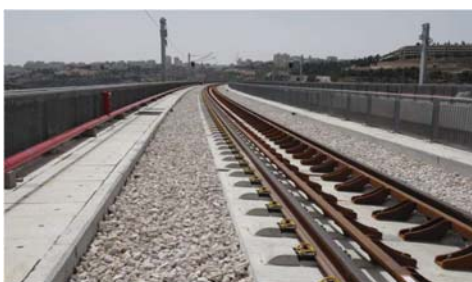
Prosto konzolna gradnja steber 7

## RAZPISI – ZGORNJI USTROJ, ŽELEZNIŠKI IN PREDORSKI SISTEMI

### SKLOP 3

- ✓ prestavitev obstoječega tira v Divači s potrebnimi prilagoditvami SV in TK naprav
- ✓ zgornji ustroj tira ter tirne naprave (23,3 dolg odsek na TTP)
- ✓ vozno omrežje (3 kV DC), ENP Črni Kal in napajanje iz 110 kV omrežja
- ✓ SV / TK naprave
- ✓ GSM-R
- ✓ sistem napajanja naprav v predorih vključno s trafo postajami v prečnikih in zunaj predorov
- ✓ servisna (varnostna) razsvetljava, video in varnostni ter nadzorni sistem
- ✓ ventilatorska postaja z dvema velikima ventilatorjema (2x 560 kW) in sistem prezračevanja

## ZGORNJI USTROJ



Izvedba tira na togi podlagi (TTP) dolžine 23,3 km.

## VENTILATORSKA POSTAJA



Namestitev ESO opreme - ventilatorja 2 x 560 kW za odsesavanje dima iz predora T1 in T2.

## ZAKLJUČEK PROJEKTA

### VKLJUČITEV NOVE PROGE V OBRATOVANJE

1. UPORABNO DOVOLJENJE (MOP na podlagi tehničnega pregleda)
2. DOVOLJENJE ZA ZAČETEK OBRATOVANJA (AŽP na osnovi dokazil, verifikacije podsistemov)



Hvala za pozornost!





MAG. DEJAN JURKOVIČ

MINISTRSTVO ZA INFRASTRUKTURO, SEKTOR ZA  
INVESTICIJE V ŽELEZNICE

# Vizija in projekti nadgradnje železniškega omrežja



 REPUBLIKA SLOVENIJA  
MINISTRSTVO ZA INFRASTRUKTURO  
DIREKCIJA REPUBLIKE SLOVENIJE ZA INFRASTRUKTURO

mag. Dejan Jurkovič

Vizija in projekti nadgradnje  
železniškega omrežja

Lipica, 24. maj 2023  
DAN ZBS 2023



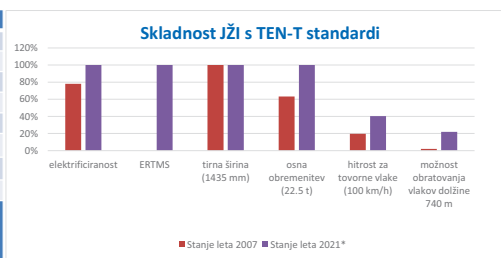
### Investicijski cikli in rezultati projektov javne železniške infrastrukture

- 1. Prvi investicijski cikel** – nadgradnja obstoječih prog prvenstveno odpravi ozkih grl in ukrepom, ki omogočajo zmogljivost za trenutni in pričakovani obseg prometa tovornih vlakov ter za doseganje TEN-T standardov – **v smislu zaostanka glede parametrov, ki jih že imajo tuje železnice**
- 2. Drugi investicijski cikel** – nadgradnja obstoječih prog za krajše potovalne čase potniških vlakov, za zagotovitev taktnega prometa v območju ter gradnja novih prog – **v smislu konkurenčnega železniškega prometa**

#### Prikaz skladnosti JŽI s TEN-T standardi in povečanja v obdobju 2007-2021

| Parameter TEN-T za jedrno omrežje        | Stanje leta 2007 |       | Stanje leta 2021* |         | Povečanje |
|--|------------------|-------|-------------------|---------|-----------|
|  | v km             | v %   | v km              | v %     | v %       |
| elektrificiranost                        | 387,7            | 78 %  | 497,2             | 100 %   | + 22 %    |
| ERTMS                                    | 0                | 0 %   | 497,2             | 100 %   | + 100 %   |
| tirna širina (1.435 mm)                  | 497,2            | 100 % | 497,2             | 100 %   | 0 %       |
| osna obremenitev (22.5 t)                | 314,6            | 63 %  | 497,2             | 100 %   | + 37 %    |
| hitrost za tovorne vlake (100 km/h)      | 97,5             | 20 %  | 200,5             | 40 %    | + 21 %    |
| možnost obratovanja vlakov dolžine 740 m | 10               | 2 %   | 109,5             | 22 % ** | + 20 %    |
| Skupaj                                   |                  | 44 %  |                   | 77 %    |           |

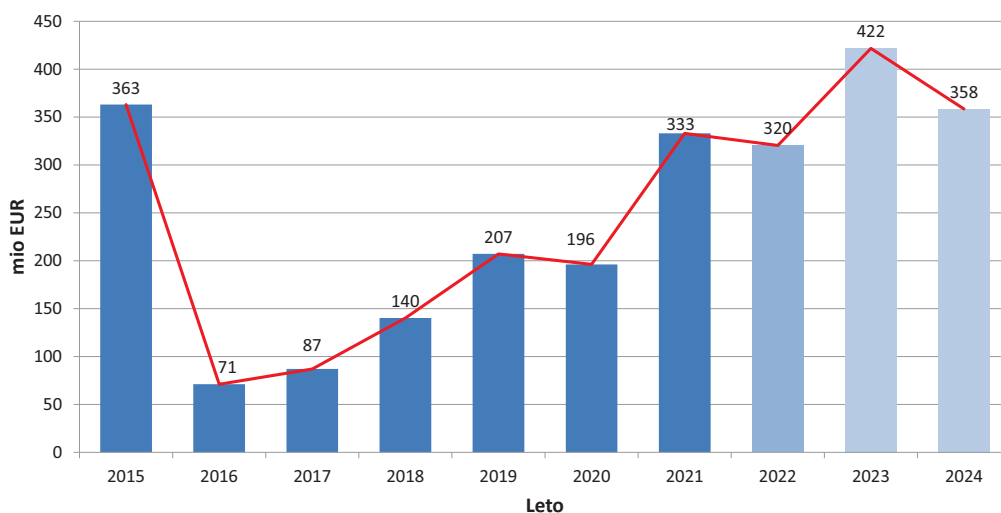
\* - vključno s projekti v izvajanju FP 2014-2021  
 \*\* - cca. 90 % če se na dvotirni progi upošteva možnost obratovanja (prehitenež, križanje) tudi na odprti progi med postajami



2

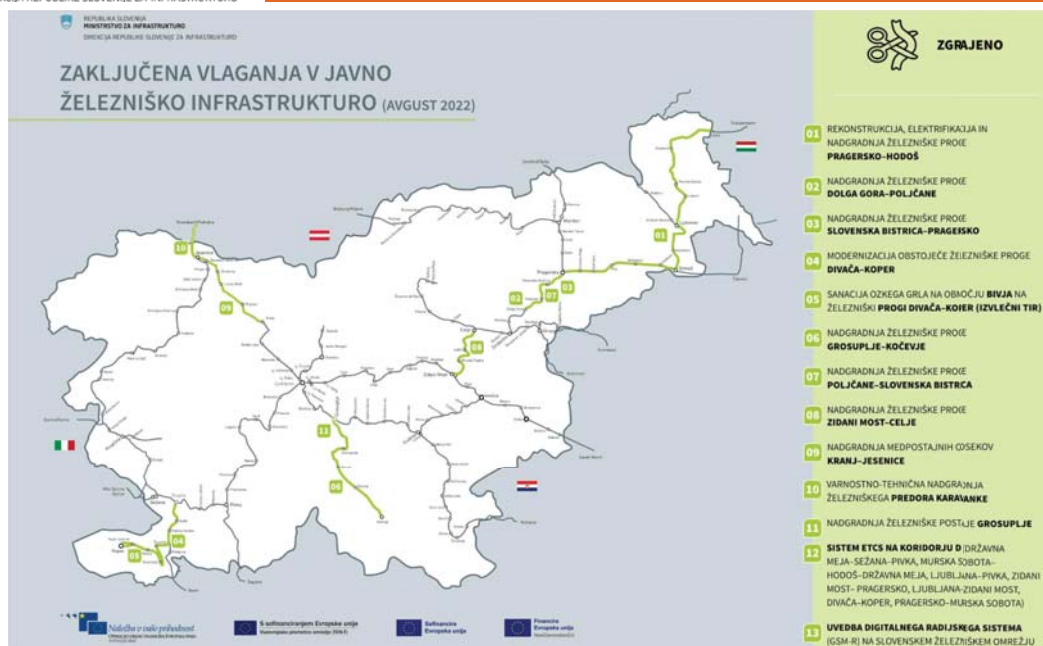
### Proračun - investicije v železniško infrastrukturo

#### Investicije v železniško infrastrukturo (v mio EUR)



3

Večji izvedeni projekti na javni železniški infrastrukturi



4

Večji izvedeni projekti na javni železniški infrastrukturi



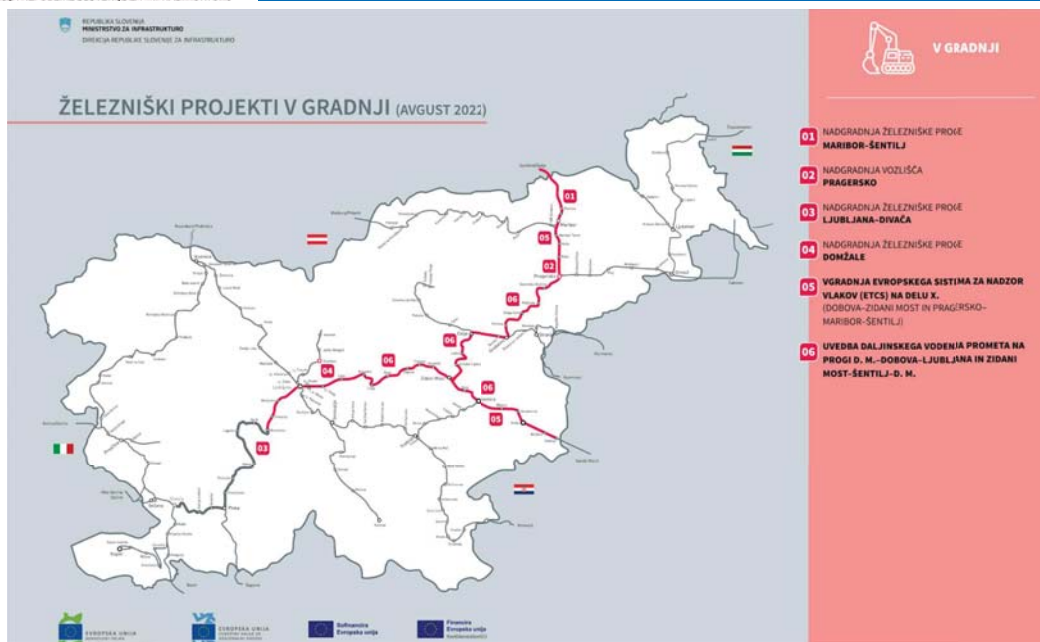
5

**Večji izvedeni projekti na javni železniški infrastrukturi**



6

**Aktualni projekti nadgradnje železniškega omrežja**



7



1. Nadgradnja železniškega območja ljubljanskih postaj
2. Nadgradnja proge Zidani Mosta–Dobova
3. Nadgradnja železniške proge Maribor–Prevalje–državna meja
4. Nadgradnja železniške proge Celje–Velenje
5. Nadgradnja železniške proge Jesenice–Sežana



8

1. SD DLN 2. tir Divača–Koper
2. Železniško vozlišče Koper – tovorna postaja
3. Nadgradnja glavne proge Ljubljana–Sežana na odseku Borovnica–Logatec
4. Nadgradnja glavne proge Ljubljana–Sežana na odseku Logatec–Postojna
5. Nadgradnja glavne proge Ljubljana–Sežana na odseku Postojna–Divača
6. Nadgradnja glavne proge Ljubljana–Sežana na odseku Divača– Sežana-d.m.
7. Nadgradnja ljubljanskega železniškega vozlišča (LŽV)
8. Nadgradnja glavne železniške proge Ljubljana–Kranj–Jesenice–d.m.
9. Nova regionalna proga Ljubljana – Letališče Jožeta Pučnika Ljubljana
10. Nadgradnja regionalne proge Ljubljana Šiška –Kamnik Graben
11. Nadgradnja regionalne proge Metlika–Ljubljana, odsek Ivančna Gorica–Ljubljana
12. Nadgradnja regionalne proge Metlika–Ljubljana, odsek Novo mesto–Ivančna Gorica
13. Nadgradnja regionalne proge Metlika–Ljubljana, odsek Metlika–Novo mesto
14. Nadgradnja železniškega vozlišča Zidani Most
15. Nadgradnja glavne proge Dobova–Ljubljana, odsek Zidani Most–Zagorje
16. Nadgradnja glavne proge Dobova–Ljubljana, odsek Zagorje–Kresnice
17. Nadgradnja glavne proge Dobova–Ljubljana, Kresnice–Ljubljana Zalog
18. Nadgradnja glavne proge Dobova–Ljubljana, Sevnica – Zidani Most
19. Nova proga Beltinci (Lipovci)–Lendava–d.m. Dolga vas
20. Strokovne podlage za konkurenčne proge
21. Projekt SHM



9



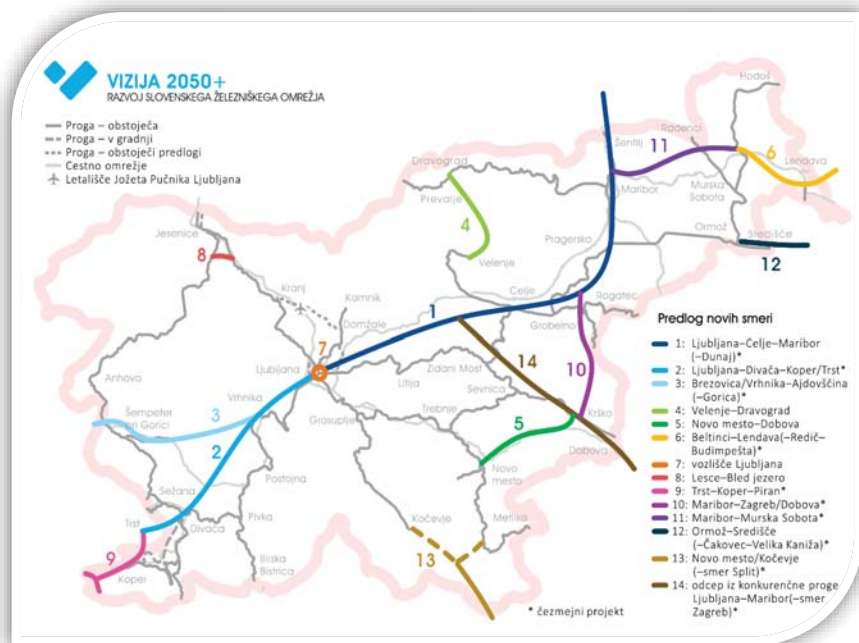
**Cilji in mejniki vizije razvoja slovenskega železniškega omrežja**

**Cilji oz. merljivi rezultati (mejniki):**

- I. **do leta 2030,**
  - a. Jedrno omrežje: prepustnost (odprava ozkih grl na omrežju) in TEN-T standardi
  - b. Regionalne proge in glavne proge: taktni promet vlakov (LUR ...)
- II. **do leta 2040:** konkurenčni potovalni časi med glavnimi točkami na jedrnem koridorju (Ljubljana – Celje - Maribor ...)
- III. **do leta 2050:** ogljična nevtralnost železniškega prometa

Scenarij 450 mio EUR za ukrepe razvoja slovenskega železniškega omrežja  
 Leta 2030 se bodo že pokazali rezultati drugega investicijskega ciklusa – skrajšanje potovalnih časov primestnega prometa LUR.

**Cilji in mejniki vizije razvoja slovenskega železniškega omrežja**



## Izzivi

- Z jasno vizijo zagotoviti stabilno financiranje kot sistemski vir, ki ne bi bil odvisen od sprejemanja letnih oz. dvo-letnih proračunov.
- Gradnja konkurenčnih železniških prog – čezmejnega pomena – prog za visoke hitrosti.
- Zagotoviti zadostno število voznih sredstev in izdelati ustrezne vozne rede, ki so del celovitega javnega potniškega prometa.
- Nakup vlakov z nagibno tehniko, ki v povprečju dosegajo cca. 20 % večje hitrosti kot "lahki" vlaki.

**HVALA ZA VAŠO  
POZORNOST**

mag. Dejan Jurkovič  
Direkcija RS za infrastrukturo

KATJA PODGORŠEK

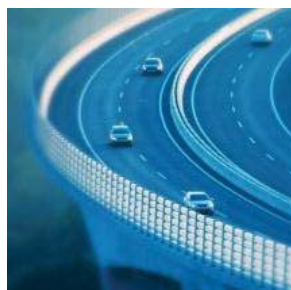
DARS

# Tretja razvojna os

---



Tretja razvojna os



DARS



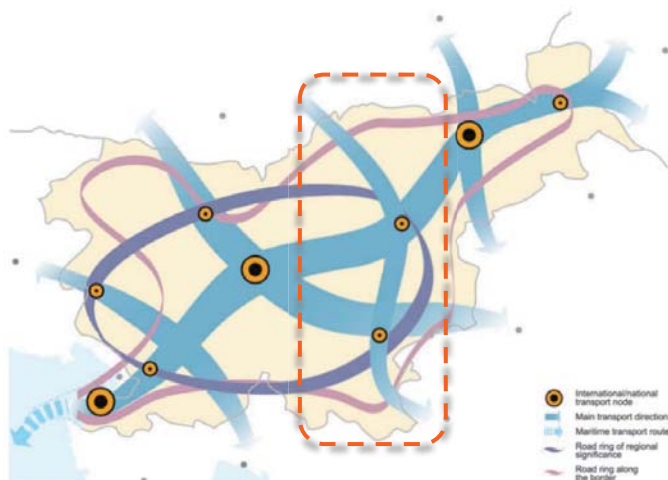
Dan ZBS 2023, Lipica, 24. 5. 2023

Katja Podgoršek, DARS, vodja službe za gradnje

DARS



## Strateška izhodišča



Map No. 5  
Concept of Transport Links

The sea border between the Republic of Slovenia (RS) and the Republic of Croatia (RC) assumed from the Treaty on the Common State Border between the RS and the RC (Annex 1) approved by both governments on 19 July 2001, and amended by the heads of negotiating groups on 25 July 2003.

- Strategija prostorskega razvoja Slovenije (SPRS)
- Resolucija o nacionalnem programu razvoja prometa v Republiki Sloveniji za obdobje do leta 2030 (ReNPRP30)

2

DARS

## Odseki tretje razvojne osi v pristojnosti DARS



### DPN

**3. RAZVOJNA OS SEVER,**  
od priključka Slovenj Gradec jug do  
Dravograda z obvoznici  
In od Otiškega Vrha do meje z  
Republiko Avstrijo na Holmcu do  
priključka Prevalje

### GRADITEV

**3. RAZVOJNA OS SEVER,**  
od priključka Šentrupert do  
priključka Slovenj Gradec jug

**3. RAZVOJNA OS JUG,**  
od priključka Novo mesto vzhod  
do priključka Maline

3

DARS

### 3. RO, sever, od priključka Šentrupert do priključka Slovenj Gradec jug



#### 2. ODSEK

Od priključka Velenje jug do priključka Slovenj Gradec jug, v dolžini 17,5 km

#### 1. ODSEK

Od priključka Šentrupert na avtocesti A1 Šentilj–Koper do priključka Velenje jug, v dolžini 14 km

4

DARS

## 1. in 2. odsek, 3. razvojna os sever – glavni tehnični elementi

#### 2. odsek :

- hitra štiri pasovna hitra cesta, dolžine 17,5 km
- navezovalna cesta v dolžini 1,9 km
- 5 priključkov
- 2 dvocevna predora (skupne dolžine ca. 2000 m)
- 1 enocevni predor (dolžine 498 m)
- 3 pokriti vkopi
- 16 viaduktov
- 6 podvozov
- 3 nadvozi
- 4 mostovi
- več podpornih in opornih konstrukcij
- več deviacij cest
- 21 regulacij vodotokov

Skupna dolžina trase HC, ki poteka na/v objektih znaša 7.024,00 m, kar je 40 % celotne trase.

#### 1. odsek :

- hitra štiri pasovna hitra cesta dolžine 14 km
- navezovalna cesta 1,5 km
- 4 priključki
- 3 dvocevni predori (skupne dolžine ca. 1.300 m)
- 3 galerije
- 1 pokriti vkop
- 10 viaduktov
- 10 podvozov
- 7 nadvozov
- 1 most, 1 podhod
- več podpornih in opornih konstrukcij
- več deviacij cest
- 20 regulacij vodotokov

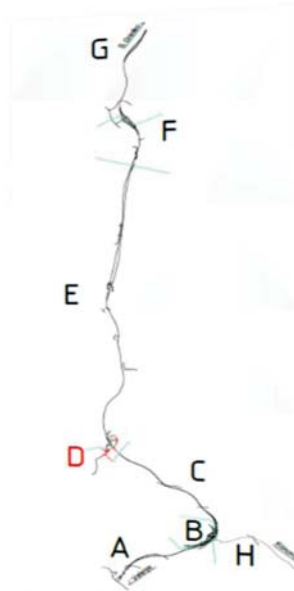
Skupna dolžina trase HC, ki poteka na/v objektih znaša 4.316,62 m, kar je 31 % celotne trase.

5

DARS

## 3. r. o. sever, 2. odsek, od priključka Velenje jug do priključka Slovenj Gradec jug

- A – VELENJE
- B – ŠKALSKO JEZERO (v gradnji)
- C – ŠKALE
- D – GABERKE (zgrajeno)
- E – VELUNJA
- F – JENINA (v gradnji)
- G – PODGORJE
- H – KONOVO (v gradnji)

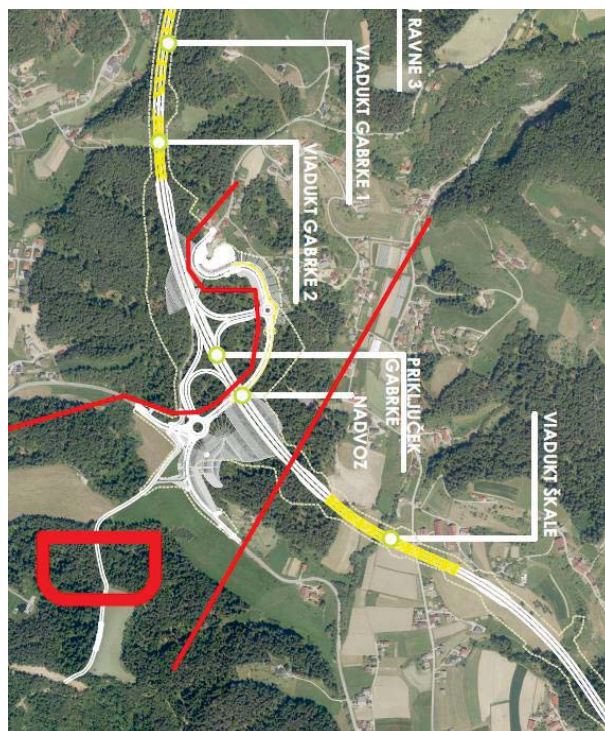


6

DARS

### Sklop D – Gaberke

- Dolžina sklopa:  
0,5 km
- Glavni elementi/objekti:  
priključek Gaberke  
nadvoz (200 m)
- Gradnja 2020-2022



7

DARS

## Sklop D – Gaberke - gradnja

- Uvedba izvajalca v delo: oktober 2020
- Zaključek del: maj 2022
- Pogodbena vrednost: 8,47 mio EUR brez DDV
- Izvajalec: JV Kolektor CPG+CGP Novo Mesto+VOC Celje

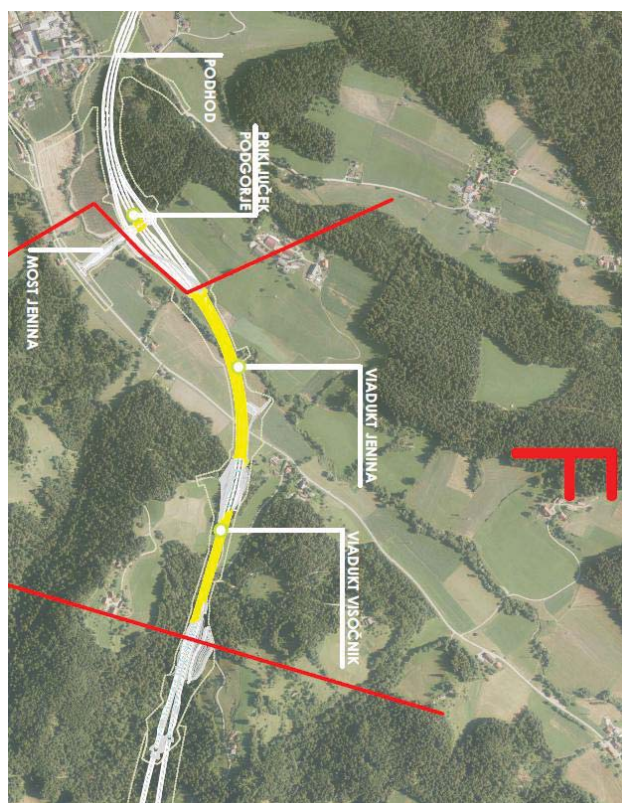


8

DARS

## Sklop F – Jenina

- Dolžina sklopa: 1,8 km
- Glavni elementi/objekti: priključek Podgorje dva viadukta (skupaj 620 m) en most
- Pričetek del avgust 2021



9

DARS



## Sklop F – Jenina - gradnja

- Uvedba izvajalca v delo: avgust 2021
- Rok:
  - betonske konstrukcije: december 2023
  - zaključna dela: junij 2024
- Pogodbeni vrednost: 37,39 mio EUR brez DDV
- Izvajalec: JV Pomgrad+GGD+Garnol+VOC
- Stanje aktivnosti:
  - Viadukt Jenina (14. takt D, 5. takt L)
  - Viadukt Visočnik (6. polje)
  - Oporne konstrukcije, deviacije prestavitve GJI



10

DARS

## Sklop F – Jenina - gradnja

- Uvedba izvajalca v delo: avgust 2021
- Rok:
  - betonske konstrukcije: december 2023
  - zaključna dela: junij 2024
- Pogodbeni vrednost: 37,39 mio EUR brez DDV
- Izvajalec: JV Pomgrad+GGD+Garnol+VOC
- Stanje aktivnosti:
  - Viadukt Jenina (14. takt D, 5. takt L)
  - Viadukt Visočnik (6. polje)
  - Oporne konstrukcije, deviacije prestavitve GJI

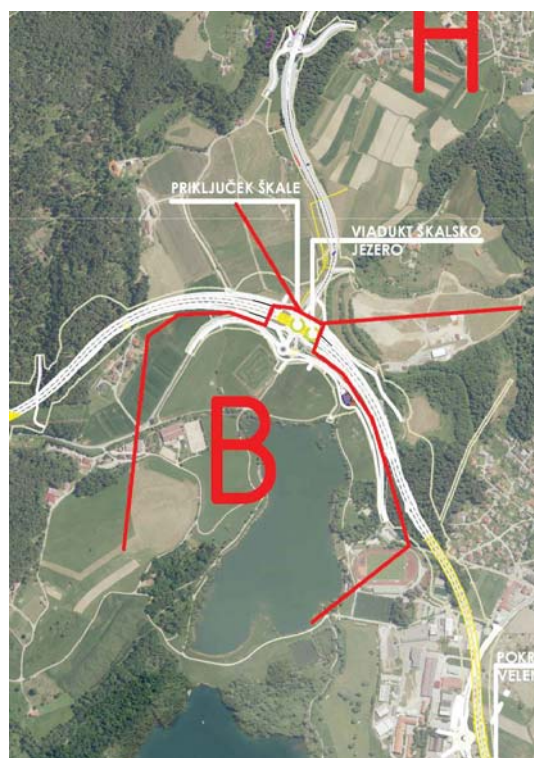


11

DARS

## Sklop B – Škalsko jezero

- Dolžina sklopa:  
0,5 km
- Glavni elementi/objekti:  
prikluček Škale  
en viadukt (110 m)  
en podhod
- Pričetek gradnje marec 2023

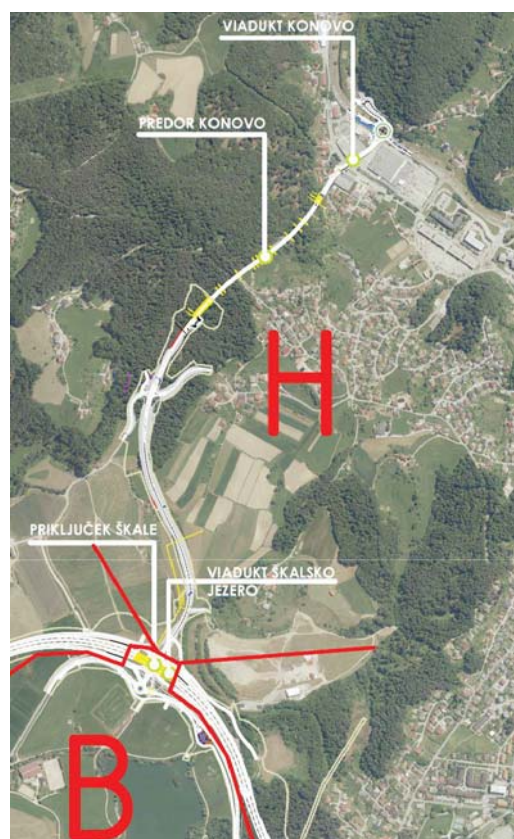


12

DARS

## Sklop H – Konovo

- Dolžina sklopa:  
1,9 km (dvopasovna navezovalna cesta)
- Glavni elementi/objekti:  
en viadukt (140 m)  
en predor ( 500 m, enocevni)  
dva mosta
- Pričetek gradnje marec 2023



13

DARS

## Sklop B in sklop H - gradnja

- Uvedba izvajalca v delo: marec 2023  
(delna uvedba, do vzhodnega portala)
- Pogodbeni rok: 30 mesecev
- Pogodbena vrednost: 55,45 mio EUR  
brez DDV
- Izvajalec: JV Strabag d.o.o.+Strabag AG
- Stanje aktivnosti:
  - Urejanje gradbiščnih poti in priprava gradbišča
  - Izvajanje sečnje in čiščenje terena

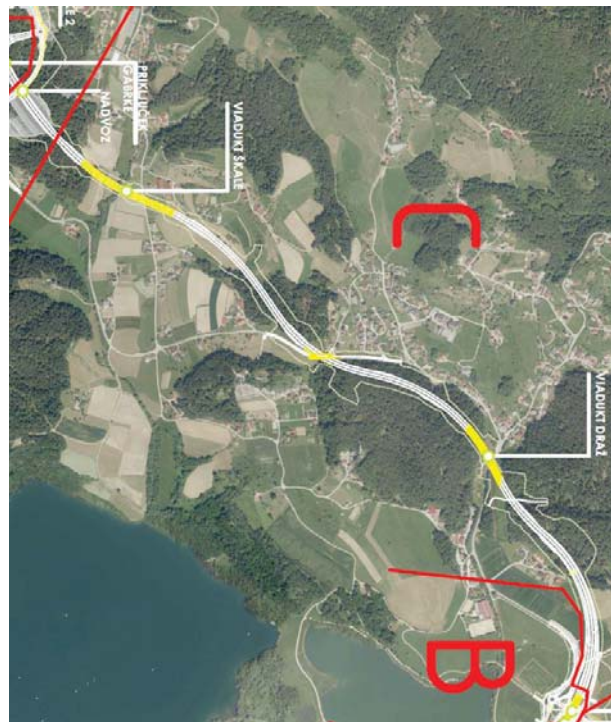


14

DARS

## Sklop C – Škale

- Dolžina sklopa:  
2,7 km
- Glavni elementi/objekti:  
dva viadukta (skupaj 540 m)  
trije podvozi
- Ocenjena vrednost (1. faza JN):  
66,0 mio EUR brez DDV
- Pravnomočno GD predvidoma Q4  
2023



15

DARS



## Sklop E – Velunja

- Dolžina sklopa:  
6,3 km
- Glavni elementi/objekti:  
deset viaduktov (skupaj 2040 m) – 4x na klasičnem podpornem odru, 3x narivanje, 3x prostokonzolna gradnja  
dva dvocevna predora (skupaj 1930 m)
- Ocenjena vrednost (1. faza JN): 269,0 mio EUR brez DDV
- Pravnomočno GD predvidoma Q4 2023



16

DARS

## Sklop G – Podgorje

- Dolžina sklopa:  
3,3 km
- Glavni elementi/objekti:  
pokriti vkop (110 m)  
en most  
dva nadvoza  
dva podvoza  
en podhod
- Ocenjena vrednost (1. faza JN): :  
71,5 mio EUR brez DDV
- Pravnomočno GD predvidoma Q4 2023
- 1. faza JN: maj 2023



17

DARS



## Sklop A – Velenje

- Dolžina sklopa:  
2,4 km
- Glavni elementi/objekti:  
priključek Velenje jug  
en viadukt (780 m)  
dva pokrita vkopa (skupaj 650 m)  
dva kesona (skupaj 320 m)  
podvoz
- Ocena GOI del iz IP:  
93,6 mio EUR brez DDV
- Pravnomočno GD predvidoma Q3 2024

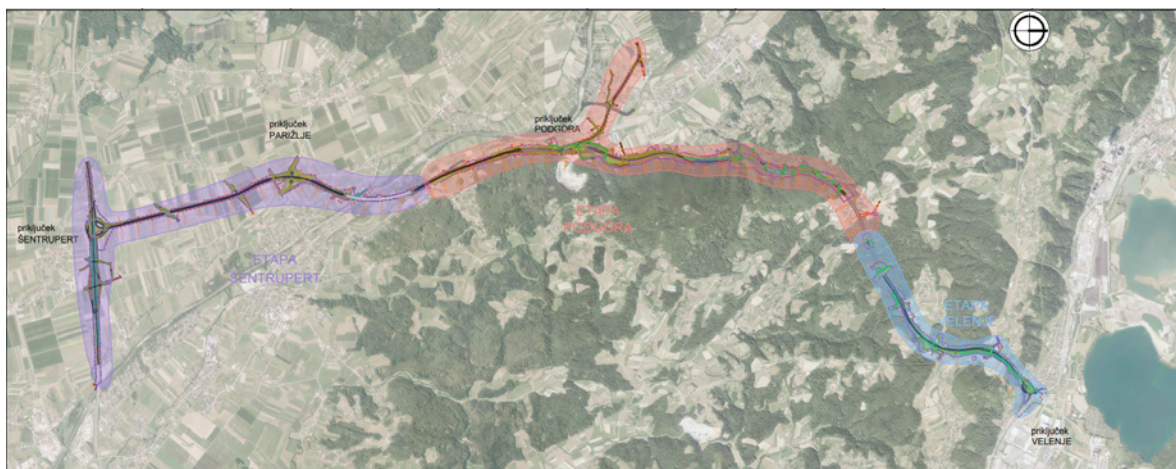


18

DARS

## 3. r. o. sever, 1. odsek, od priključka Šentrupert do priključka Velenje jug – presek stanja

- Zahteva za integralno gradbeno dovoljenje vložena 22. 4. 2022
- PZI v izdelavi
- Etape: Šentrupert, Podgora, Velenje



19

DARS

## 2. odsek 3. razvojne osi sever – glavni tehnični elementi

### Etapa Šentrupert:

- dolžina 4-pasovne ceste: 4,1 km
- 2 priključka
- 24 deviacij cest in poti
- 1 viadukt
- 8 nadvozoj
- 1 podvoz
- oporne in podporne konstrukcije

### Etapa Podgora:

- dolžina 4-pasovne ceste: 6,28 km
- 1 priključek
- 18 deviacij cest in poti
- 1 predor
- 1 galerija
- 1 pokriti vkop
- 5 viaduktov
- 5 podvozoj
- 1 podhod
- 1 most
- prepusti
- oporne in podporne konstrukcije

### Etapa Velenje:

- dolžina trase 3,14 km
- 1 priključek
- 12 deviacij cest in poti
- 2 predora
- 1 galerija
- 2 viadukta
- 3 podvozi
- 2 podhoda
- 2 mosta
- 1 brv
- prepusti
- oporne in podporne konstrukcije

Skupna dolžina trase HC, ki poteka na objektih znaša 827 m, kar je 20,2 % celotne trase.

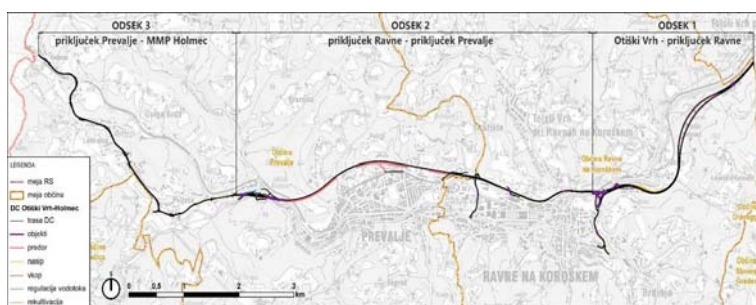
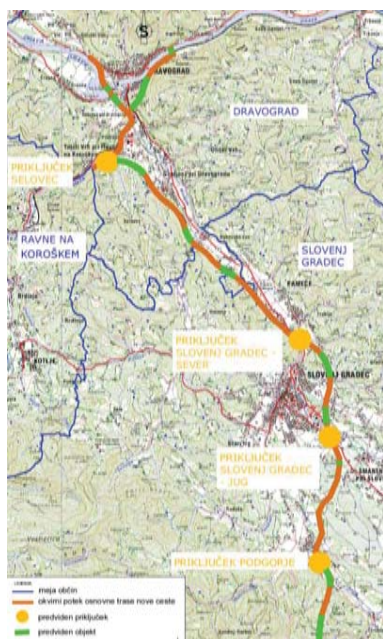
Skupna dolžina trase HC, ki poteka na objektih znaša 1945 m, kar je 31 % celotne trase.

Skupna dolžina trase HC, ki poteka na objektih znaša 1043 m, kar je 33,2% celotne trase.

20

DARS

## 3. RO, sever, Slovenj Gradec jug– Dravograd, Otiški vrh–Prevalje (priprava DPN)



21

DARS

## 3. in 4. odsek, 3. razvojna os sever – glavni tehnični elementi

### 4-pasovna cesta na odsekih:

- Slovenj Gradec–Otiški vrh, v dolžini 12 km
- Otiški vrh–Ravne, v dolžini 3,8 km

### 2-pasovna navezovalna cesta

- obvoznica Dravograd in navezovalne ceste (Dravograd–smer MMP Vič in Dravograd–smer Maribor), v dolžini 5,5 km
- Ravne–Prevalje, v dolžini 7,2 km

### Rekonstrukcija obstoječe ceste

- Prevalje–MMP Holmec, v dolžini 5,1 km

### Izvenivojski priključki: 6

### Predori: 5

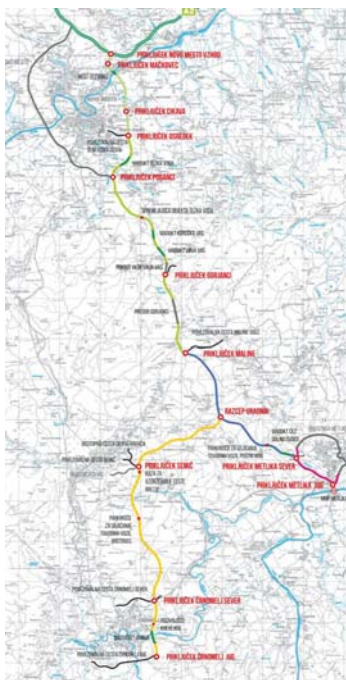
### Spremljajoči objekti:

- bencinski servis Slovenj Gradec in
- vzdrževalna baza v Podgorju

22

DARS

## 3. razvojna os jug, od AC A2 Ljubljana–Obrežje v Novem mestu do MMP Metlika in do priključka Črnomelj jug



### 1. ODSEK

od priključka na AC A2 Ljubljana-Obrežje pri Novem mestu do priključka Maline, v dolžini 17,85 km

### 2. ODSEK

od priključka Maline do MMP Metlika in priključka Črnomelj jug, v dolžini 30,5 km

23

DARS

## 1. odsek 3. razvojne osi jug – glavni tehnični elementi

### 1. in 2. etapa:

- dolžina 4-pasovne ceste: 5,05 km
- dolžina priključne ceste: 1,1 km
- izvennivojski cestni priključki: 4
- 3 mostovi (dolžin 310m, 135m in 108m)
- 2 viadukta (dolžin 170m, 138m)
- 8 nadvozov
- 4 podvozi
- 4 podhodi
- 1 nadhod

Skupna dolžina trase HC, ki poteka na objektih znaša 758 m, kar je 15 % celotne trase. Ca. 30 % trase HC poteka skozi urbani del NM.

### 3. in 4. etapa:

- dolžina 4-pasovne ceste: 12,8 km
- povezovalne ceste, v skupni dolžini 3,7 km
- izvennivojski cestni priključki: 3
- 1 dvocevni predor Gorjanci (2,3 km)
- 3 viadukti (dolžin 395m, 477m in 247m)
- 5 pokritih vkopov (dolžin 243m in 158m, 91m, 55m, 90 m)
- 6 nadvozov
- 5 podvozov
- 2 počivališča
- 42 deviacij cest

Skupna dolžina trase HC, ki poteka na/v objektih znaša 4.000 m, kar je 31 % celotne trase.

24

DARS

## 2. odsek 3. razvojne osi jug – glavni tehnični elementi

### Pododsek A:

- dolžina 4-pasovne ceste: 7,6 km
- 24 deviacij cest in poti
- 1 pokriti vkop
- 3 nadvozi
- 4 podvozi
- 2 mostova
- 2 oporna zidova
- oskrbna postaja Gradnik
- počivališče Poštni hrib za izločanje tovornjakov

Skupna dolžina trase HC, ki poteka na objektih znaša 191 m, kar je 2,5 % celotne trase.

### Pododsek B:

- dolžina 4-pasovne ceste: 2,75 km
- 22 deviacij cest in poti
- 2 izvennivojska priključka
- 1 viadukt
- 2 nadvoza
- 1 podvoz
- 8 mostov
- 1 prepust
- 1 brv

Skupna dolžina trase HC, ki poteka na objektih znaša 244 m, kar je 8,9 % celotne trase.

### Pododsek C:

- dolžina trase 15,2 km
- 3 izvennivojski priključki
- 1 razcep
- 8 nadvozov
- 1 pokriti vkop
- 8 podvozov
- 1 podhod
- 1 most
- 2 ekodukta
- počivališči Krevljica vzhod in Krevljica zahod
- dvopasovna povezovalna cesta Semič v dolžini 1,4 km
- dvopasovna povezovalna cesta Črnomelj sever v dolžini 2,5 km

Skupna dolžina trase HC, ki poteka na objektih znaša 486 m, kar je 3,2 % celotne trase.

25

DARS



## Resolucija o nacionalnem programu razvoja prometa v RS za obdobje do leta 2030 (ReNPRP30 in ReNPRP30-A)

### 3. RAZVOJNA OS SEVER

| <b>1. ODSEK</b><br>Šentrupert - Velenje jug | <b>2. ODSEK</b><br>Velenje jug - Slovenj Gradec jug | <b>3. ODSEK</b><br>Slovenj Gradec jug – Dravograd z obvoznicami | <b>4. ODSEK</b><br>Otiški vrh - Prevalje |
|---|---|---|--|
| Projekt. 2017–2024<br>Gradnja 2022–2027     | Projekt. 2017–2022<br>Gradnja 2020–2026             | Priprava 2016–2026<br>Gradnja po 2027                           | Priprava 2016–2027<br>Gradnja po 2028    |

### 3. RAZVOJNA OS JUG

| <b>1. ODSEK</b><br>Priključek NM vzhod - Maline |   | <b>2. ODSEK</b><br>Maline - MMP Metlika - priključek Črnomelj jug |                                       |
|---|---|---|---------------------------------------|
| <u>1. in 2. etapa</u>                           | 3. in 4. etapa                          | Etapa Metlika   | Preostali odsek                       |
| Projekt. 2016–2021<br>Gradnja 2021–2023         | Projekt. 2016–2023<br>Gradnja 2024–2028 | Projekt. do 2023,<br>Gradnja po 2024                              | Priprava 2016–2027<br>Gradnja po 2028 |

26

DARS

## Investicijske vrednosti

| Naziv investicije                                      | nivo stalnih cen | Stalne cene    | Tekoče cene                               | Vir              | Poroštveni zakon |
|--|------------------|----------------|---|------------------|------------------|
| <b>3. RO . JUG</b>                                     |                  |                |   |                  |                  |
| 3. r. o. jug, 1. ODSEK<br>1. in 2. etapa               | nov 2018         | 108.850.633    | 115.769.797                               | potrjen IP       | DA               |
| 3. r. o. jug, 1. ODSEK<br>3. in 4. etapa               | dec 2019         | 297.690.764    | 335.871.823                               | potrjen IP       | DA               |
| 3. r. o. jug, 2. ODSEK                                 | maj 2022         | 263.773.091    | 329.906.980                               | potrjen DIIP     | NE               |
| <b>3. R. O. SEVER</b>                                  |                  |                |   |                  |                  |
| 3. r. o. sever, 1. ODSEK                               | nov 2019         | 363.630.792    | 394.777.721                               | potrjen IP       | DA               |
| 3. r. o. sever, 2. ODSEK                               | dec 2018         | 573.990.421    | 625.749.041                               | potrjen IP       | DA               |
| 3. r. o. sever, 3. ODSEK                               | jul 2021         | 347.631.318,35 | ni podatka                                | IDP po recenziji | NE               |
| 3. r. o. sever, 4. ODSEK<br>(delež DARS: OTV-Prevalje) | mar 2020         | 293.123.620    | 362.157.437                               | potrjena ŠV/PIZ  | NE               |
| Skupaj   |                  | 2.248.690.639  | 2.164.232.799<br>(brez 3RO sever odsek 3) |                  |                  |

Opomba: Neto cene brez zemljišč, brez stroškov financiranja, brez DDV, ki je povračljiv

27

DARS

Hvala  
za pozornost.

DARS



24.5.2023

28

DARS

# Projekt odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov (NSRAO) v Sloveniji



PREDAVATELJ  
MATEJ RUPRET

## POVZETEK

Jedrska tehnologija se uporablja v različne namene. Uporabljajo jo za pridobivanje energije, v medicini, industriji, raziskovalne namene ... Pri tem nastaja majhna količina odpadkov, ki pa so radioaktivni in jih je treba ustrezno odložiti.

V prispevku je predstavljen projekt odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov v Sloveniji. Umeščanje odlagališča se je pričelo v letu 2004 in zaključilo s sprejetjem Državnega prostorskega načrta, ki je določil lokacijo in način za odlaganje nizko in srednje radioaktivnih odpadkov v Sloveniji. Sledila je faza načrtovanja in pridobivanje okoljevarstvenega soglasja in gradbenega dovoljenja. Trenutno je projekt tik pred začetkom gradnje.

## LOW AND INTERMEDIATE LEVEL WASTE DISPOSAL PROJECT IN SLOVENIA

### ABSTRACT

*The nuclear technology has very broad usage. It is used for energy production, in medicine, industry, research... All this produce a small amount of waste, which is radioactive and need to be properly disposed.*

**KLJUČNE BESEDE:**

radioaktivni odpadki, Slovensko odlagališče NSRAO, inženirske pregrade, koncept odlaganja NSRAO v Sloveniji

*In this article the work on Low and Intermediate Level Waste disposal facility project in Slovenia is presented. The siting of the disposal facility started in 2004 and ended with the adoption of the National Spatial Plan, which determined the site and disposal concept of LILW in Slovenia. This was followed by the planning phase and the obtaining of environmental approval and a building permit. Currently, the project is about to start construction.*

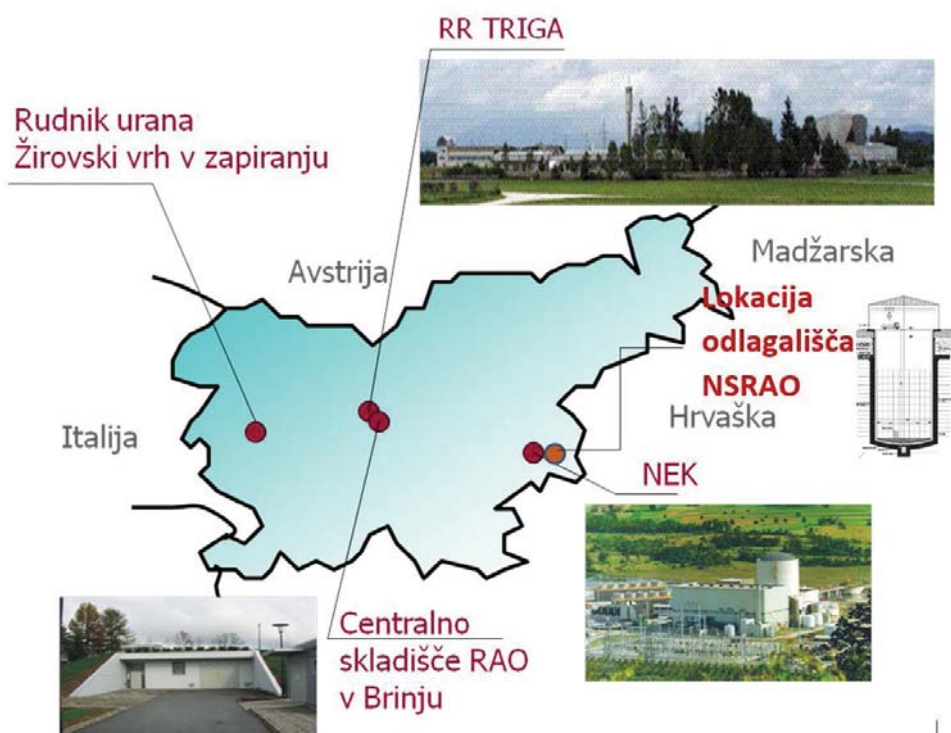
**KEY WORDS:**

*radioactive waste, Slovenian LILW repository, engineering barriers, LILW disposal concept in Slovenia*

**RADIOAKTIVNI ODPADKI V SLOVENIJI**

Pri uporabi jedrske tehnologije, ki jo uvrščajo med najbolj čiste, na žalost nastanejo tudi radioaktivni odpadki. Te v splošnem delimo na tiste, ki občutno generirajo toploto – visoko radioaktivne odpadke (VRAO), kamor v glavnem spadajo izrabljeno jedrsko gorivo in nekateri deli primarnega kroga jedrske elektrarne in tiste, pri katerih je toplota zanemarljiv faktor. Te imenujemo nizko in srednje radioaktivni odpadki (NSRAO). V članku bom termin odpadki uporabljal izključno za NSRAO, če bo govora o drugih odpadkih bo to poudarjeno. Med te odpadke v glavnem spadajo različni pripomočki, ki jih uporabljajo pri delu z radioaktivnimi snovmi in se pri tem kontaminirajo, pa tudi aktivirani ali kontaminirani deli jedrskih objektov, ki nastanejo pri razgradnji le teh. V to kategorijo pa spada tudi večina radioaktivnih odpadkov, ki nastajajo v industriji, raziskovalnih institucijah, bolnišnicah ..., pri tako imenovanih malih povzročiteljih. V Sloveniji o razvrščanju odpadkov govori 4. Člen Pravilnika o ravnanju z radioaktivnimi odpadki in izrabljenim jedrskim gorivom (JV7) [1].

Radioaktivne odpadke delimo tudi glede na to katere radionuklide vsebujejo – tako ločimo kratkožive radionuklide, ki imajo razpolovno dobo krajšo od 30 let in dolgožive radionuklide, katerih



Slika 1: Jedrski objekti v Sloveniji



razpolovna doba je daljša. Pri nastanku NSRAO se ne moremo izogniti temu, da med kratkoživimi radionuklidi ne bi bilo tudi nekaj sledi dolgoživih radionuklidov. Pravilnik zato določa kolikšna je lahko aktivnost dolgoživih radionuklidov (alfa sevalcev) v kratkoživih NSRAO.

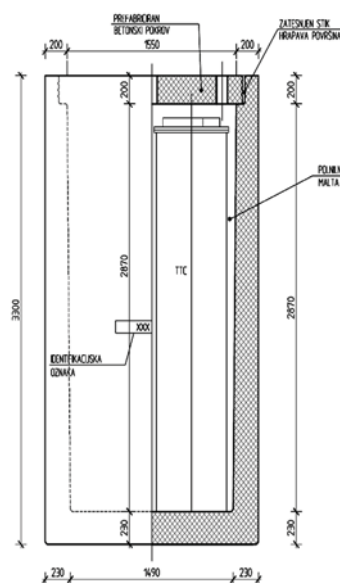
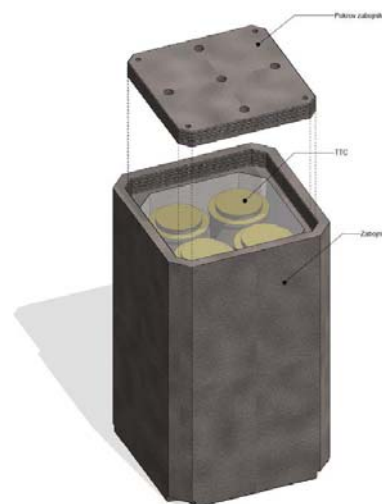
Na področju Republike Slovenije imamo 4 jedrske objekte, ki so neposredno povezani z nastajanjem in hranjenjem NSRAO. To so Jedrska elektrarna Krško, v kateri nastaja med obratovanjem manj kot 50 m<sup>3</sup> NSRAO letno, odpadki pa bodo nastali tudi po zaprtju elektrarne in njeni razgraditvi. V Žirovskem vrhu se nahaja rudnik urana, ki pa je v zapiranju. Sanacija enega jalovišča je končana in je jalovišče zaprto ter ga upravlja ARAO, drugo pa je še v fazi sanacije. V Brinju pri Ljubljani pa obratujeta Raziskovalni reaktor TRIGA in Centralno skladišče radioaktivnih odpadkov. Reaktor je namenjen v glavnem za raziskovalne namene, med tem, ko v Centralnem skladišču skladiščimo odpadke malih povzročiteljev iz cele Slovenije. Pod male povzročitelje štejemo vse inštitucije, ki pri svojem delu uporabljajo radioaktivne vire in posledično proizvajajo NSRAO.

Na območju RS je za zbiranje radioaktivnih odpadkov in njihovo skladiščenje ter odlaganje odgovorna Agencija za radioaktivne odpadke (ARAO).

## NAČRTOVANJE ODLAGALIŠČA NSRAO

Načrtovanje odlagališča se je zaključilo. Ena od pomembnejših faz tega postopka je bila faza presoje vplivov na okolje. Za ta namen je bilo pripravljeno Okoljsko poročilo in Osnutek varnostnega poročila. namen obeh dokumentov je bil opredeliti vpliv jedrskega objekta, to je odlagališča, na okolje in človeka. Vse ocene in izračuni so pokazali, da je vpliv načrtovanega objekta zanemarljiv. V okviru postopka je bila izvedena tudi celovita presoja vplivov na okolje. Postopek presoje vplivov na okolje se v letu 2021 zaključil z izdajo okoljevarstvene nage soglasja.

Pripravljeno je bilo tudi vse potrebno za pridobitev gradbenega dovoljenja. Izdelan je bil PGD projekt in pripravljeno varnostno poročilo, na podlagi katerega je Uprava Republike Slovenije za jedrsko varnost (URSV) izdala soglasje h gradnji. Gradbeno dovoljenje za jedrski objekt a odlagališča je bilo izdano v letu 2022, vendar še čaka na pravnomočnost. Gradbeno dovoljenje za ostale infrastrukturne objekte pa je pravnomočno. V vmesnem času je bil razvit tudi odlagalni zabojnik. Gre za armirano betonske zabojnike dimenzij 1,5 X 1,5 x 3,3 m, z maksimalno dovoljeno težo 40 t. V take zabojnike bodo pred odlaganjem odloženi vsi radioaktivni odpadki.



Slika 2: Odlagalni zabojnik v katerega bodo pred odlaganjem vstavljeni vsi NSRAO

Izvedene so bile tudi različne raziskave materialov potrebnih za izgradnjo odlagališča. Preiskani so bili betoni za izdelavo sekundarne obloge, to je silosa pa tudi izdelavo primarne obloge, to je diafragme, ki bo služila kot podpora pri izkopu gradbene jame. Nadaljujemo z raziskavami polnilnih malt, ki bodo uporabljene za polnjenje vmesnih prostorov, ki bodo ostali v odlagalnih zabojnikih po vložitvi radioaktivnih odpadkov.

Na ARAO pripravljamo vse potrebno za pričetek gradnje odlagališča. Poleg razpisov za samo gradnjo je treba pripraviti različne postopke in navodila, saj je odlagališče jedrski objekt in ga je treba tehnično varovati že ob pričetku gradnje. Gradnja naj bi se pričela v letu 2023. Odlagališče pa bo začelo poskusno obratovati v letu 2026. Za jedrski objekt je zahtevana faza poskusnega

obratovanja v kateri se preizkusil vse sisteme in komponente, če delujejo tako, kot je bilo načrtovano v varnostnem poročilu. Po poteku poskusnega obratovanja lahko sledi redno obratovanje.

## ZAKLJUČEK

Z izgradnjo odlagališča NSRAO bodo zagotovljeni pogoji za dolgoročno ravnanje z radioaktivnimi odpadki, kar prispeva k zanesljivemu obratovanju NEK, ki prispeva k zanesljivosti oskrbe z elektriko v Sloveniji ter varno, gospodarno in zanesljivo uporabo radioaktivnih virov v znanosti, medicini in industriji. ARAO se trudi, da na vseh področjih svojega delovanja deluje pregledno in da je vpliv objektov, za katere je odgovoren, na okolje in človeka čim manjši.



Slika 3: Vizualizacija odlagališča

## REFERENCE

- [1] Pravilnik o ravnanju z radioaktivnimi odpadki in izrabljenim gorivom /JV7/. Uradni list RS, št. 49/06.
- [2] Uredba o državnem prostorskem načrtu za odlagališče nizko in srednje radioaktivnih odpadkov na lokaciji Vrbina v občini Krško, Uradni list RS, št. 114/2009 in 50/2012.

arao

## Projekt odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov (NSRAO) v Sloveniji

Matej Rupret, Sandi Viršek

[matej.rupret@arao.si](mailto:matej.rupret@arao.si)

Dan ZBS

Lipica, 24. maj 2023



### ARAO – osnovni podatki

- Nacionalna strokovna organizacija, specializirana za ravnanje za radioaktivnimi odpadki
- Ustanovitelj Vlada RS leta 1991
  - 23 zaposlenih
  - Resorno ministrstvo – Ministrstvo za okolje, podnebje in energijo
- Viri financiranja:
  - sklad za razgradnjo NEK,
  - državni proračun in
  - v manjšem delu, iz plačil storitev malih povzročiteljev RAO

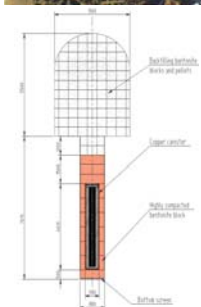
arao

## ARAO – javna gospodarska služba

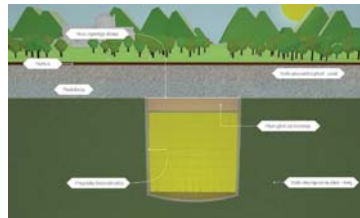
Centralno skladišče  
CSRAO



RŽV  
JAZBEC



Odlagališče  
NSRAO



Odlagališče VRAO  
in IG

Skrb za razvoj stroke na  
področju ravnanja z RAO

arao

## Načrtovanje, izgradnja in obratovanje odlagališča NSRAO



arao



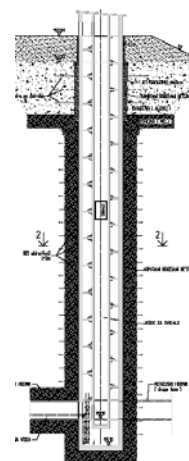
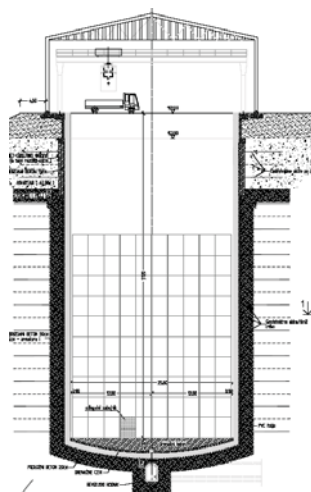
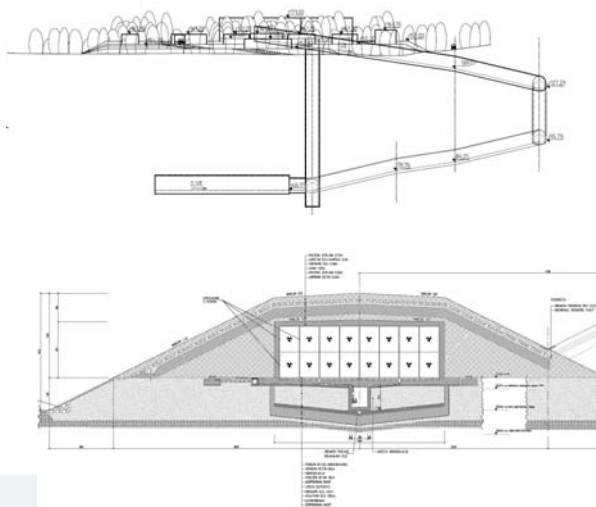
## Načrtovanje odlagališča NSRAO

- 2004 - Pričetek postopka pridobivanja lokacije za odlagališče NSRAO
- Vse občine pozvane k sodelovanju
- Ekspertna oceana 12 lokacij
- V nadaljnji postopek predlagane 3 lokacije in 3 koncepti odlaganja

arao

## Načrtovanje odlagališča NSRAO

PREREZ A-A  
M 1:100



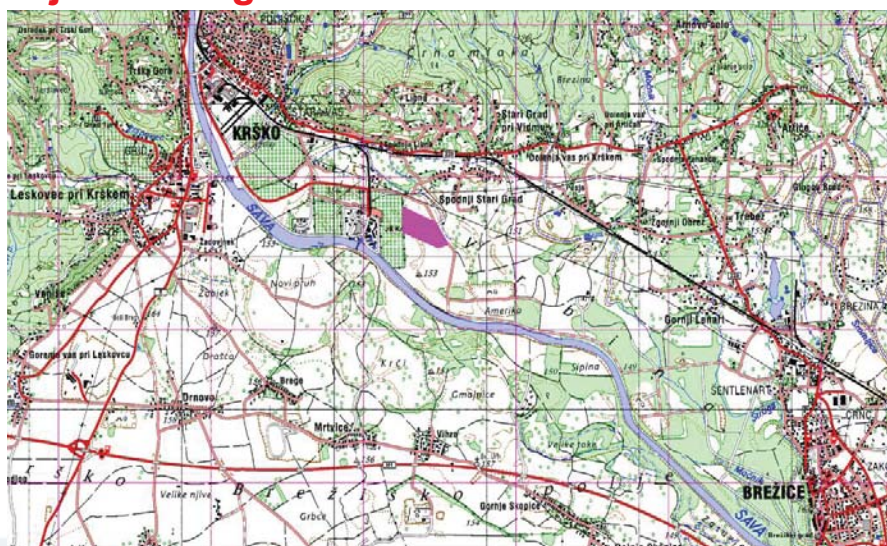
arao

## Načrtovanje odlagališča NSRAO

- December 2009, lokacija Vrbina Krško in pripovršinska silosna varianta odlagališča sta bili potrjeni s strani lokalne skupnosti in Vlade RS.
- Sprejet je bil DPN za gradnjo odlagališča NSRAO.
- Načrtovano odlagališče NSRAO temelji na modularnem konceptu gradnje. To omogoča tudi skupno rešitev v skladu z meddržavno pogodbo med RS in RH v povezavi z NEK.

arao

## Lokacija za odlagališče NSRAO



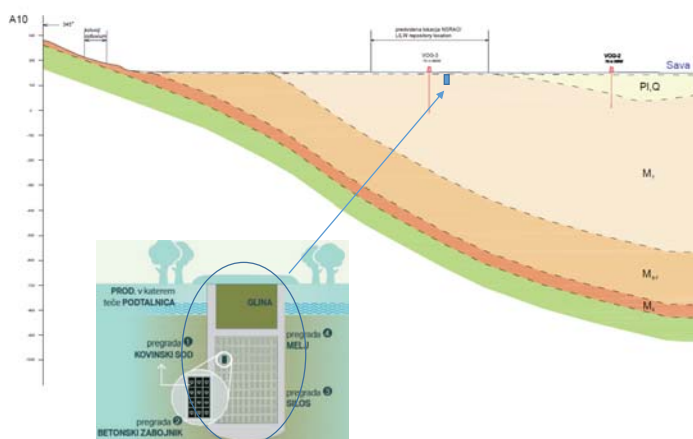
arao

## Bližina NEK



arao

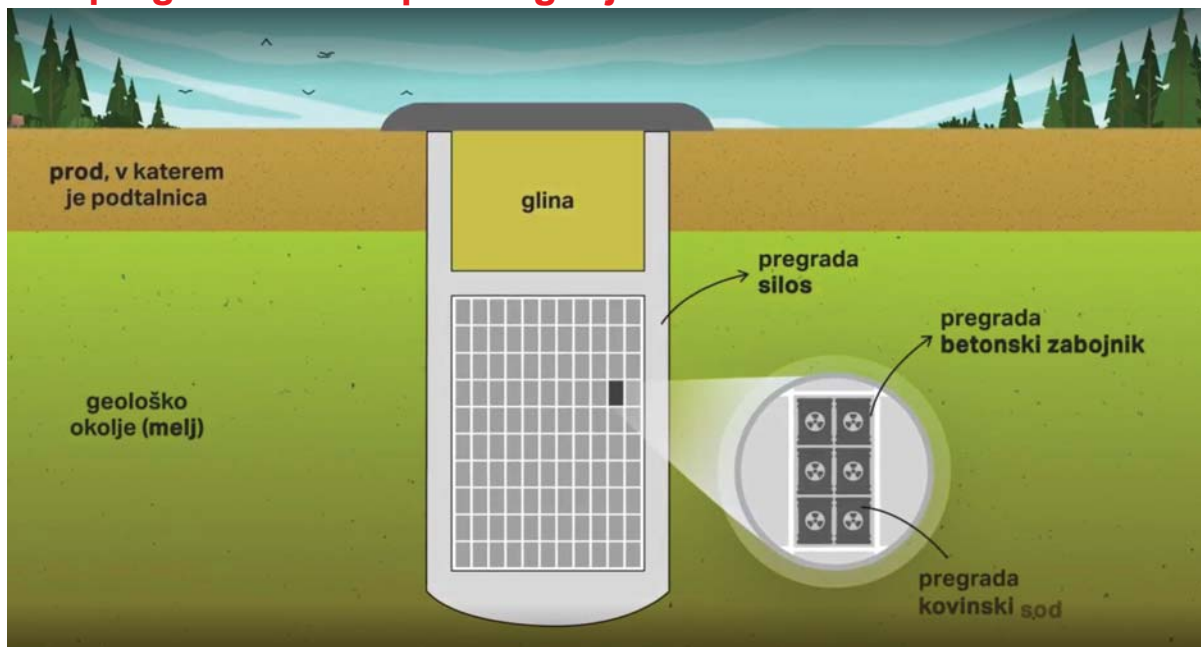
## Geologija lokacije



arao

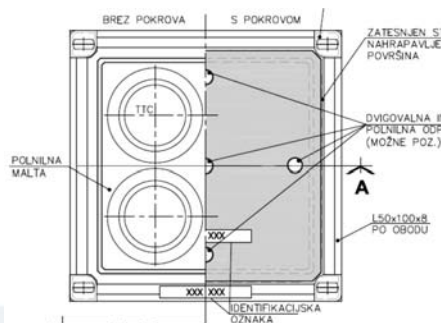


## Večpregradni koncept odlaganja NSRAO



## Odlagalni zabojnik

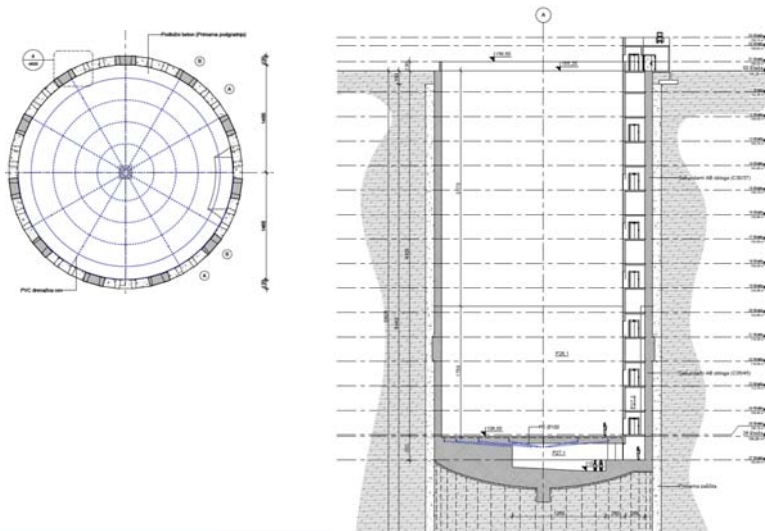
- Vsi odpadki bodo vstavljeni v zabojnike
- Kapaciteta:
  - 4 cevaste vsebnike (TTC) ali
  - 12 – 200 - ali 320-l sodov
- Dimenzije: 1.95 x 1.95 x 3.30 m (s pokrovom)
- Največja masa: 40 t
- 990 zabojnikov v enem silosu
- IP-2 zabojnik



arao

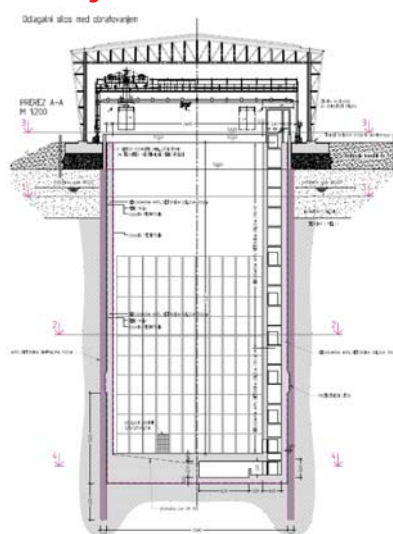


## Odlagalni silos - izgradnja



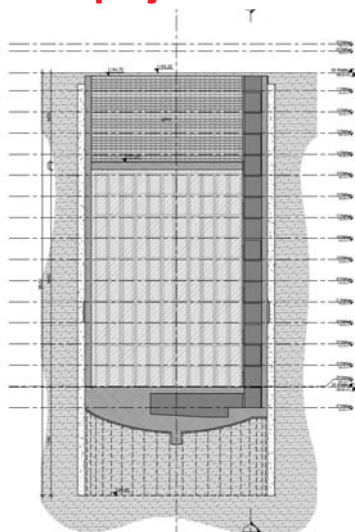
arao

## Odlagalni silos - obratovanje



arao

## Odlagalni silos – po zaprtju



arao

## Objekti odlagališča NSRAO



- Upravno servisni objekt
- Tehnološki objekt
- Odlagalni silos s halo nad silosom

arao

## Status projekta

- 2014 Zaključek terenskih raziskav
- 2015 PGD, VP, PVO
- 2017-21 Presoja vplivov na okolje, čezmejni vplivi



arao

## Status projekta

- 2023 Gradbeno dovoljenje (pravnomočno)
- 2023-26 Gradnja
- 2026 Začetek poskusnega obratovanja



arao

## Zaključek

Odlagališče NSRAO bo zagotovilo:

- izpolnjevanje mednarodnih in nacionalnih zakonskih zahtev glede obdelave in odlaganja NSRAO,
- izboljšalo pogoje za podaljšanje življenjske dobe NEK in
- predstavlja osnovo za varno, gospodarno in zanesljivo uporabo radioaktivnih virov v znanosti, medicini in industriji v Sloveniji.

arao



arao



DR. FRANC SINUR

IBE

# Suho skladiščenje izrabljenega goriva



## SUHO SKLADIŠČENJE IZRABLJENEGA GORIVA

ZDRUŽENJE ZA BETON SLOVENIJE  
**ZBS** DAN ZBS 2023

Lipica, maj 2023



Dr. Franc Sinur

IBE, d.d., svetovanje, projektiranje in inženiring

Hajdrihova ulica 4, 1001 Ljubljana, Slovenija • tel.: +386 1 477 61 00, faks: +386 1 251 05 27 • www.ibe.si

## Obstoječe stanje

- 121 gorivnih elementov v reaktorju
- Celotno jedrsko gorivo iz NEK je skladiščeno v Zgradbi za izrabljeno gorivo.



- Remont vsakih 18 mesecev
- Skladiščne kapacitete omejene
- Aktivno delovanje sistema
- Varnostna nadgradnja

2

DAN ZBS 2023, 20 LET ZDRUŽENJA, Lipica, 24.-25. maj 2023



## Suho skladiščenje

- Popolnoma pasivno delovanje
- Boljša zaščita pred namernimi in nenamernimi negativnimi vplivi človeka.



3

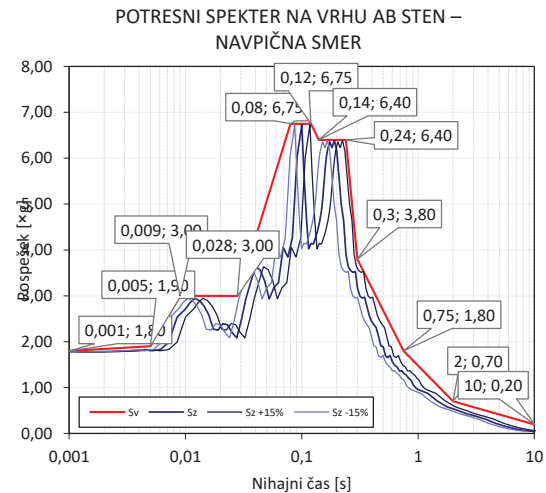
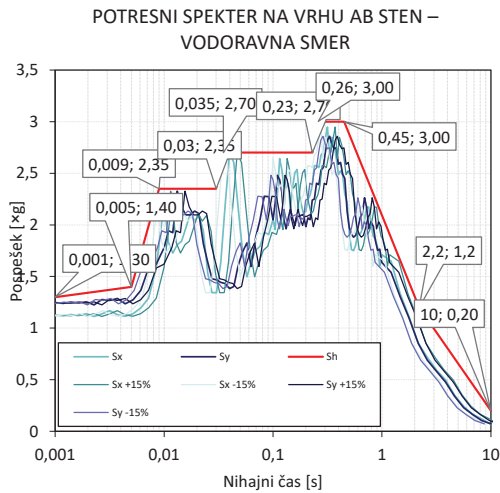
DAN ZBS 2023, 20 LET ZDRUŽENJA, Lipica, 24.-25. maj 2023



# Povečane projektne zahteve

- **Potres**

Povratna doba 10.000 let →  $a_g = 0,6g$  → dodatno povečanje →  **$a_g = 0,78g$**



4 DAN ZBS 2023, 20 LET ZDRUŽENJA, Lipica, 24.-25. maj 2023



# Povečane projektne zahteve

- Orkanski veter

240 km/h (ameriška regulativa) → 40 m/s (Evrokodi)

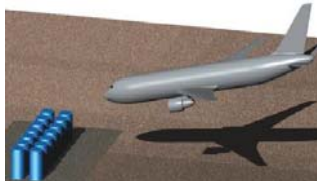
Tornado izstrelki

- Poplava

Poplavna kota +1,80 nad koto pritličja.

- Sneg

- Padec komercialnega in vojaškega letala



- Požar

- Omejene doze –  $\frac{1}{4}$  dopustne na ograji NEK

5 DAN ZBS 2023, 20 LET ZDRUŽENJA, Lipica, 24.-25. maj 2023





# Obseg potrebnih modifikacij

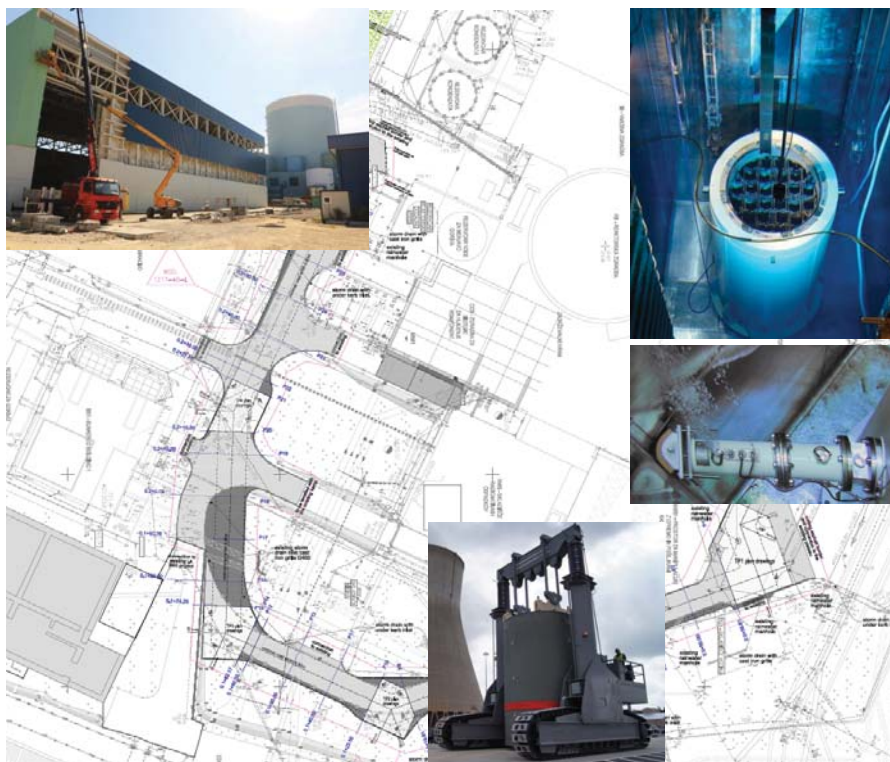
- Modifikacije v objektu FHB – prilagoditev izbrani tehnološki rešitvi

- Zagotavljanje stabilnosti vsebnika v bazenu za izrabljeno gorivo
- Modifikacije strojnih in električnih inštalacij za potrebe priprave vsebnika za prevoz do suhega skladišča z večnamenskim vsebnikom

- Transportna pot med FHB in DSB

- Suho skladišče izrabljenega goriva

- Premestitev vsebnika v skladiščni zabojnik
- Odložitev zabojnika na s projektom predvideno lokacijo



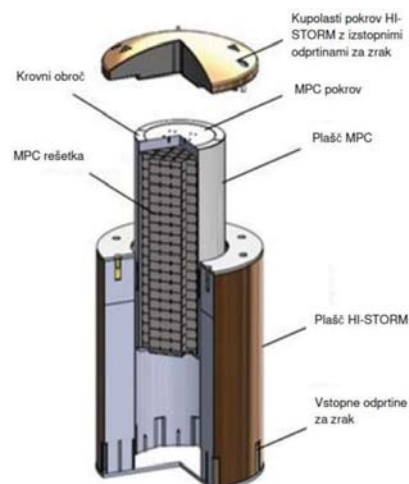
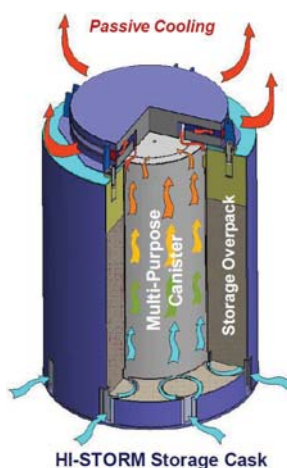
6

DAN ZBS 2023, 20 LET ZDRUŽENJA, Lipica, 24.-25. maj 2023



# Zasnova skladiščnega zabojnika

- Valjasta oblika premera 350 cm in višine 530 cm
- V jedru namenski vsebnik z gorivom
- Obod debeline 75 cm iz betona s spec. težo 4000 kg/m<sup>3</sup>
- Toplotna moč do 30 kW
- Masa cca. 200 ton



7

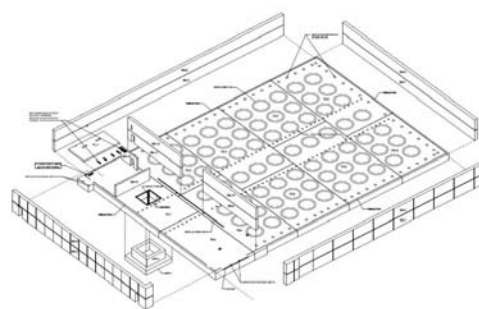
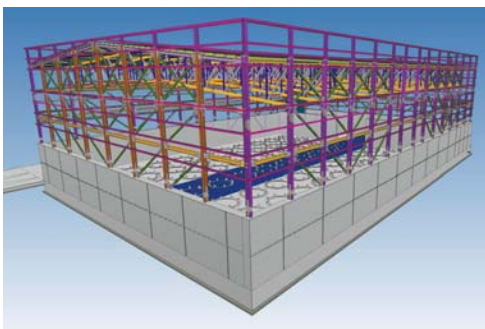
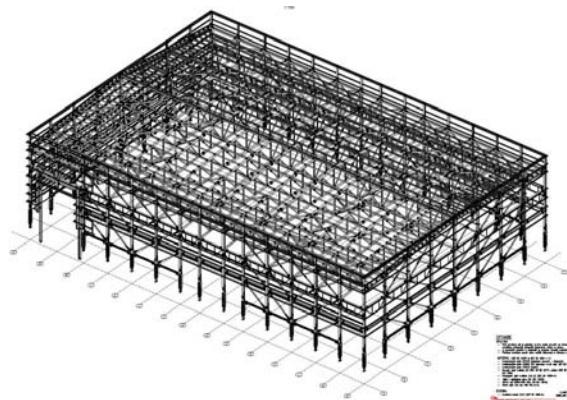
DAN ZBS 2023, 20 LET ZDRUŽENJA, Lipica, 24.-25. maj 2023





# Zgradba DSB

- 70 skladiščnih zabojnikov



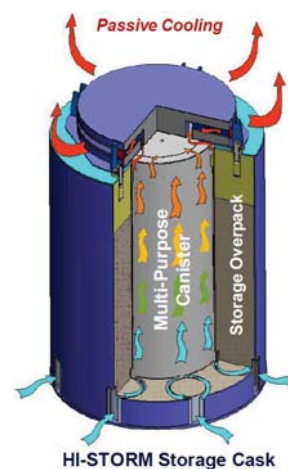
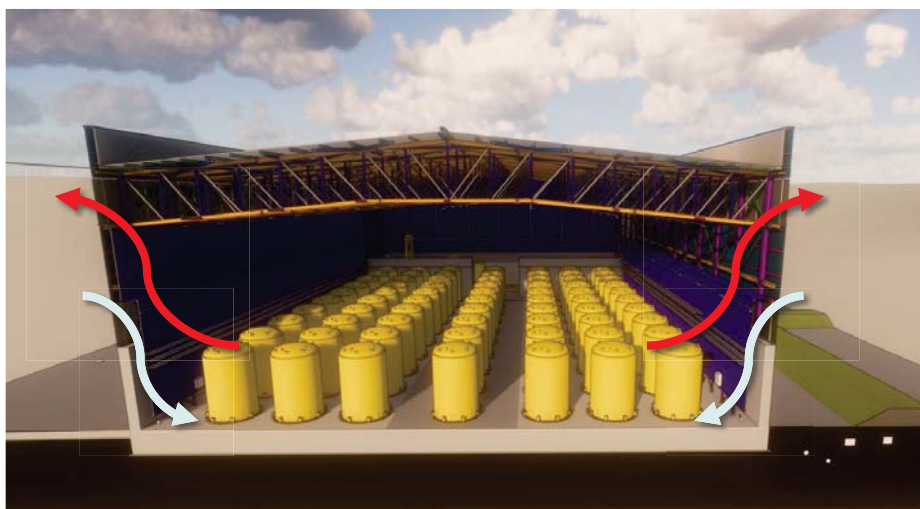
8

DAN ZBS 2023, 20 LET ZDRUŽENJA, Lipica, 24.-25. maj 2023



# Zgradba DSB

- Naravno prezračevanje







9

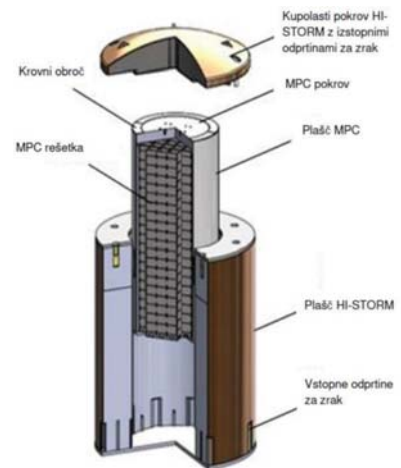
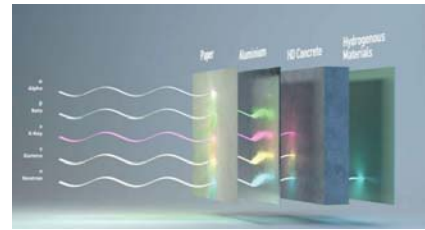
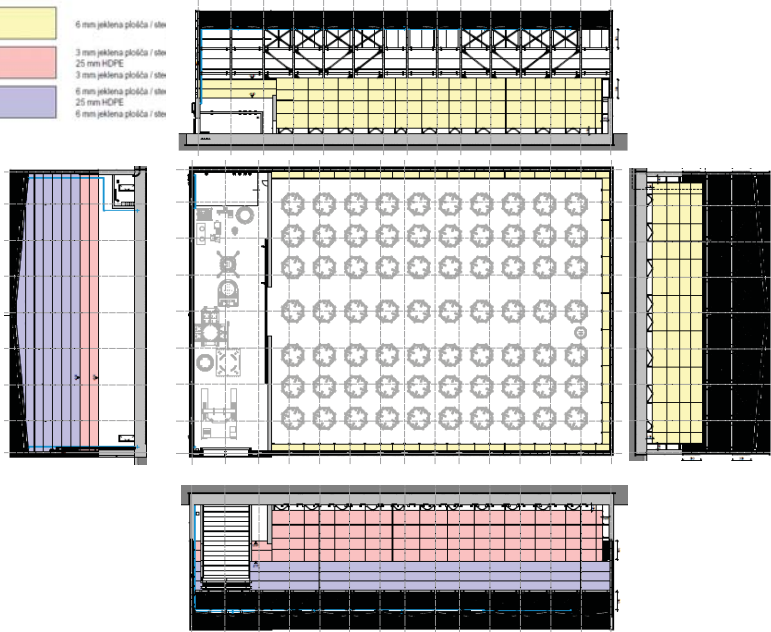
DAN ZBS 2023, 20 LET ZDRUŽENJA, Lipica, 24.-25. maj 2023



# Radiološka zaščita

LEGENDA RADIOLOŠKE ZAŠČITE

|   |  |
|---|--|
|  | 6 mm jeklena plošča / stela  |
|  | 3 mm jeklena plošča / stela<br>25 mm HDPE                                |
|  | 3 mm jeklena plošča / stela<br>6 mm jeklena plošča / stela<br>25 mm HDPE |
|  | 6 mm jeklena plošča / stela  |

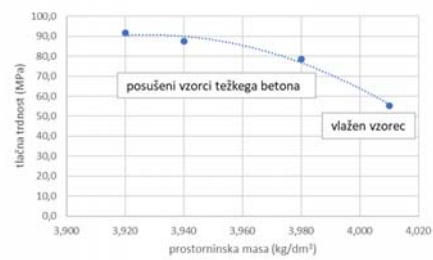


10 DAN ZBS 2023, 20 LET ZDRUŽENJA, Lipica, 24.-25. maj 2023



# Beton vgrajen v plašču in pokrovu zabojnika

- Beton gostote > 3844 kg/m<sup>3</sup>
- Magnetit z gostoto 4800 kg/m<sup>3</sup>

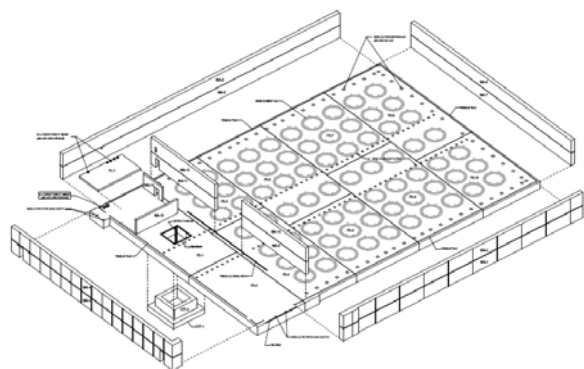


11 DAN ZBS 2023, 20 LET ZDRUŽENJA, Lipica, 24.-25. maj 2023





# Gradnja



12 DAN ZBS 2023, 20 LET ZDRUŽENJA, Lipica, 24.-25. maj 2023



# Gradnja



13 DAN ZBS 2023, 20 LET ZDRUŽENJA, Lipica, 24.-25. maj 2023





**IBE, d.d., svetovanje, projektiranje in inženiring**

Hajdrihova ulica 4, 1001 Ljubljana, Slovenija • tel. +386 1 477 61 00, faks: +386 1 251 05 27 • [www.ibe.si](http://www.ibe.si)



PROF. VASA J. PEROVIĆ, ASIST. ANJA VIDIC

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA  
ARHITEKTURO

# Življenje z betonom



PREDAVATELJ  
PROF. VASA J. PEROVIĆ

## POVZETEK

Na Fakulteti za arhitekturo v Ljubljani raziskujemo različna merila – od urbanizma, arhitekture do interierja in oblikovanja. Poleg rednega študijskega programa izvajamo s študenti tudi študentske delavnice, kjer poveujemo arhitekturno prakso, izobraževanje in industrijo. Na tak način študentom poizkušamo približati praktično izkušnjo izvedbe, dela z materialom ter kontakta s tehnologiji, izvajalci, raziskovalci itd. Menimo, da je v sodelovanju med arhitekti - v našem primeru študenti različnih letnikov - in industrijo izreden potencial.

Ukvarjali smo se s steklom, betonom ter drugimi materiali, rezultate delavnic pa prezentirali na zaključni razstavi Fakultete za arhitekturo. Študentske oblikovalske izdelke smo razstavili tudi v Muzeju za arhitekturo in oblikovanje, z velikim strokovnim in širšim odmevom, kar je za nas izhodišče za podobno ambiciozne projekte tudi v prihodnosti.

S podporo Salonita Anhovo imamo priložnost približati beton in njegovo uporabo študentom arhitekture. Delavnica Beton 2.0. je nadaljevanje delavnice Doma z betonom, na kateri so študentje oblikovali betonske

izdelke za opremo doma. Druga edicija delavnice razvija betonsko urbano opremo za izbrane javne prostore Fakultete za arhitekturo in druge potencialne lokacije. Proces se je začel z raziskovanjem alternativnih oblik priprave in obdelave betona (3d print, agregat, pre-fabrikacija, tekstilni beton ...). Njihovo oblikovitvornost se je preverilo z mnogimi prototipi, ki so bili osnova za izdelavo končnih produktov v delavnici Zevnik Laba.

Danes beton ponovno odkrivamo kot vizualno prisoten, pristen in trajen material, ki je z "zgodovinsko lekcijo" postal manj brutalen in bolj prefinjen. Današnja uporaba tega materiala razkriva njegove alkemične lastnosti in arhaični karakter ter raziskuje nove tehnološke možnosti v oblikovanju z njegovo težo in lahkostjo, grobostjo ali gladkostjo, barvo in taktilnostjo površin.

Po vrnitvi v arhitekturo tako beton, podprt z novimi tehnološkimi zmožnostmi, prihaja tudi v svet oblikovanja in s tem tudi v naše domove.



01



02



03

Beton skozi čas: 01 Betonski čoln, Pier Luigi Nervi, 1967, 02 Pantheon 125 AD, 03 L'unité d'habitation 1964



04



05



06



07



08



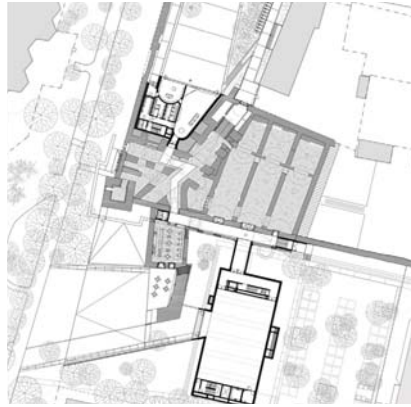
09

Bevk Perović arhitekti: 04-05 Hiša KK, Kamnik, 2015–2019, 06–07 Hiša PU, Celje, 2023, 08–09 Islamsko verski kulturni center, 2011–2020





10



11



12



13



14



15

Bevk Perović arhitekti: 10–12 Nova Galerija in Kazemate, Wiener Neustadt, 2019, 13–14 delo na Fakulteti za arhitekturo, 15 Razstava DIH\_VPIH, Muzej za arhitekturo in oblikovanje



16



17



18



19



20

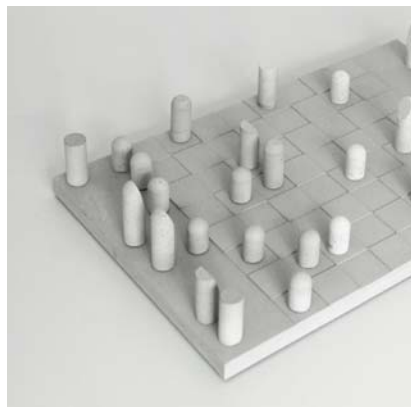


21

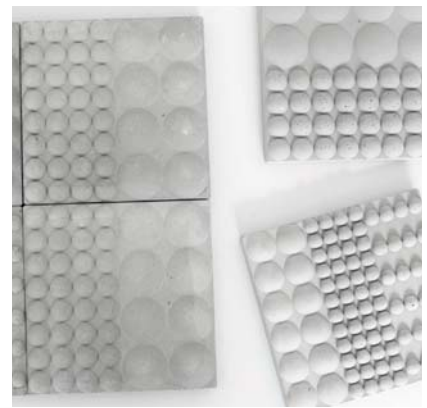
Delavnica Doma z betonom: 16 Zevnik Lab, 17 študenti pridobivajo izkušnje v delavnici, 18–19 od kalupa do produkta, 20–21 končni študentski izdelki



22



23



24



25



26



27

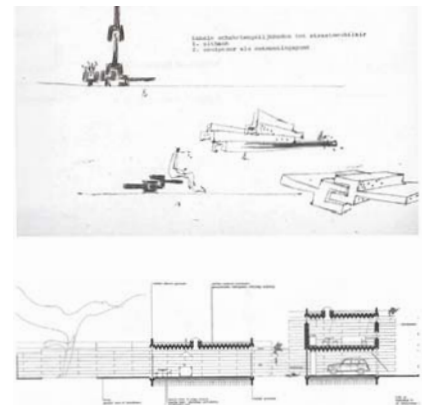
Delavnica Doma z betonom: 22–26 končni študentski izdelki, 27 zaključna razstava v Muzeju za arhitekturo in oblikovanje



28



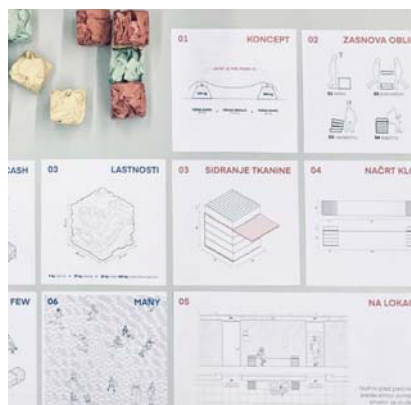
29



30



31



32



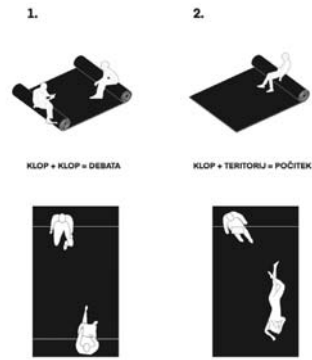
33

28 Ultra tanke strukture, 29 potencialne nenavadnosti "umetni kamen", mehko-tekoče, lahkotno, tanko ..., 30 modularnost/repeticija/prefabrikacija Julian Lampens, 31 preizkušanje nosilnosti tankega betona s karbonskimi vlakni, 32–33 raziskovanje materiala





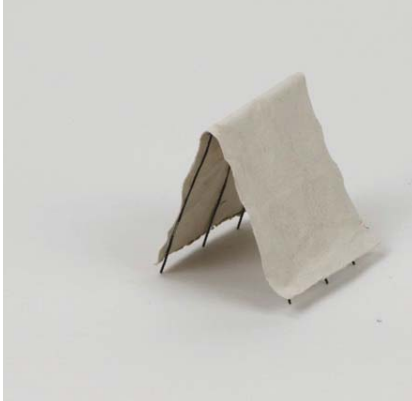
34



35



36



37



38



39

34 raziskovanje materiala, 35–36 idejna zasnova betonske klopi, 37–39 prototipi študentskih betonskih izdelkov Beton 2.0

# STROKOVNA PREDAVANJA

24.–25. MAJ 2023

---



**DAN ZBS 2023**

ANDREJ UNETIČ<sup>1</sup>, DR. JAKOB ŠUŠTERŠIČ<sup>2</sup>,  
ROK ERCEGOVIČ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> HSE-INVEST

<sup>2</sup> IRMA INŠTITUT ZA RAZISKAVO MATERIALOV  
IN APLIKACIJE

# Betoni za hidroelektrarne na spodnji Savi



PREDAVATELJ  
DR. JAKOB ŠUŠTERŠIČ

## POVZETEK

V članku so najprej podane splošne informacije o hidroelektrarnah na spodnji Savi. V nadaljevanju pa sta na kratko obravnavani dve najbolj značilni vrsti betonov hidroelektrarn, to sta hidrotehnični (masivni) beton in beton odporen proti podvodni abraziji. Pri hidrotehničnem (masivnem) betonu sta obravnavani dve značilni lastnosti: priraščanje temperature v strjujočem masivnem betonu zaradi hidratacije cementa in krčenje. Kot primer so za vsako od teh lastnosti podani rezultati enega preskusa betonov, ki so se vgradili v konstrukcijske elemente jozovnih zgrad hidroelektrarn na spodnji Savi.

## CONCRETES FOR HYDROELECTRIC POWER PLANTS ON THE LOWER SAVA RIVER

### ABSTRACT

*This paper first presents general information about the hydroelectric power plants on the Lower Sava River. In the following, the two most typical types of concrete for hydropower plants are briefly discussed: hydrotechnical (mass) concrete and*

**KLJUČNE BESEDE:**

masivni beton, beton odporen proti podvodni abraziji, temperatura strjenega masivnega betona, krčenje, povprečna globina abrazije.

*concrete resistant to underwater abrasion. Two characteristic properties of hydrotechnical (mass) concrete are discussed: temperature rise in hardening mass concrete due to cement hydration and shrinkage. As an example, for each of these properties, the results of one test are given for concretes placed in the structural elements of the dam structures of the hydroelectric power plants on the Lower Sava River.*

**KEYWORDS:**

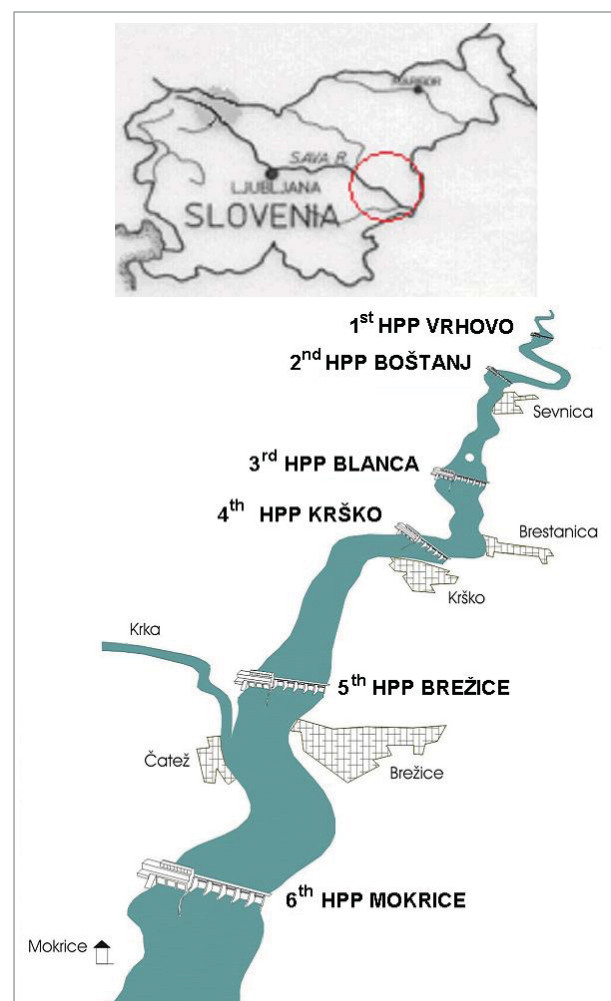
*mass concrete, concrete resistant to underwater abrasion, temperature of hardened mass concrete, shrinkage, average abrasion depth.*

**1 UVOD**

Spodnje savsko verigo sestavlja pet že zgrajenih hidroelektrarn (HE), to so: HE Vrhovo, HE Boštanj, HE Arto Blanca, HE Krško in HA Brežice (slika 1). Predvidena je še šesta HE, to je HE Mokrice.

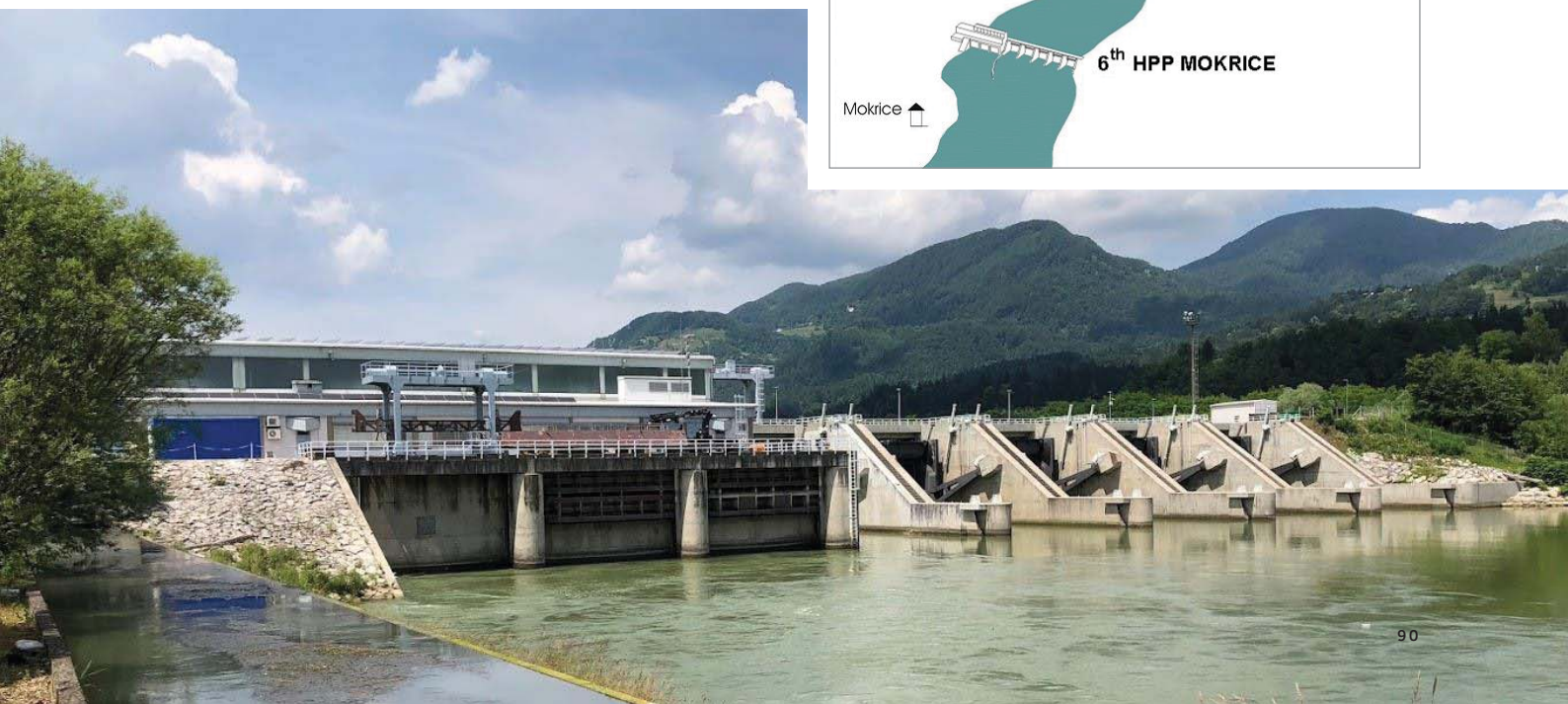
HE Vrhovo je prva v nizu hidroelektrarn spodnje savske verige (slika 2). Njena akumulacija ima vlogo čelnega bazena za spodnje savsko verigo. Po dograditvi celotne verige HE na Savi bo akumulaciji namenjena vloga vmesnega izravnalnega bazena.

HE Vrhovo se je gradila med leti 1989 in 1993. Naslednja, HE Boštanj se je začela graditi šele leta 2002 in nato je potekala kontinuirna gradnja do HE Brežice. V tem članku bodo obravnavane HE Boštanj, HE Arto Blanca, HE Krško in HE Brežice. Obravnavana bosta dva betona, ki sta značilna za gradnjo HE, to sta hidrotehnični (masivni) beton in beton odporen proti podvodni abraziji.



↓ Slika 2: HE Vrhovo

→ Slika 1: Skica spodnje savske verige





## 2 OSNOVNI PODATKI HIDROELEKTRARN

V tem poglavju so podani osnovni podatki za vse štiri zgrajene HE na spodnji Savi.

### 2.1 HE Boštanj (HEBO)



| Tip HE: pretočno akumulacijska HE              |                         |
|--|-------------------------|
| Nazivna moč                                    | 32,5 MW                 |
| Nazivni padec                                  | 7,47 m                  |
| Nazivni pretok                                 | 500 m <sup>3</sup> /s   |
| Srednji letni pretok                           | 197 m <sup>3</sup> /s   |
| Kota zaježitve                                 | 182,20 m. n. m.         |
| Višina pregradnega objekta                     | 33,50 m                 |
| Povprečna letna proizvodnja                    | 109 GWh                 |
| <b>Število agregatov</b>                       | <b>3</b>                |
| <b>Število prelivnih polj</b>                  | <b>5</b>                |
| Turbine: 3 x 10,84 MW horizontalna cevna s KG* |                         |
| Prostornina akumulacije                        | 8 mio m <sup>3</sup>    |
| Koristni volumen akumulacije                   | 1,17 mio m <sup>3</sup> |
| Največja obratovalna DB**                      | 1,0 m                   |

Gradnja: november 2002 do junij 2006 (44 mesecev);  
Gradnja v eni gradbeni jami

| Količine vgrajenih betonov           |                       |
|--------------------------------------|-----------------------|
| Hidrotehnični (masivni) betoni       | 61.539 m <sup>3</sup> |
| Betoni, odporni na podvodno abrazijo | 569 m <sup>3</sup>    |
| Klasični betoni                      | 7.722 m <sup>3</sup>  |
| Zalivni betoni opreme                | 1.115 m <sup>3</sup>  |
| Količine vgrajene armature           |                       |
|                                      | 2.748 t               |

\* KG - Kaplanovim gonilnikom

\*\* DB - denivelacija bazena

## 2.2 HE Arto Blanca (HEAB)



| Tip HE: pretočno akumulacijska HE      |                         |
|--|-------------------------|
| Nazivna moč                            | 39,12 MW                |
| Nazivni padec                          | 9,29 m                  |
| Nazivni pretok                         | 500 m <sup>3</sup> /s   |
| Srednji letni pretok                   | 201 m <sup>3</sup> /s   |
| Kota zaježitve                         | 174,20 m. n. m.         |
| Višina pregradnega objekta             | 37,65 m                 |
| Povprečna letna proizvodnja            | 148 GWh                 |
| <b>Število agregatov</b>               | <b>3</b>                |
| <b>Število prelivnih polj</b>          | <b>5</b>                |
| Turbine: 3 x 13,04 MW vertikalne s KG* |                         |
| Prostornina akumulacije                | 9,95 mio m <sup>3</sup> |
| Koristni volumen akumulacije           | 1,3 mio m <sup>3</sup>  |
| Največja obratovalna DB**              | 1,0 m                   |

Gradnja: oktober 2002 do december 2009 (51 mesecev);  
Gradnja v eni gradbeni jami

| Količine vgrajenih betonov           |                       |
|--------------------------------------|-----------------------|
| Hidrotehnični (masivni) betoni       | 76.718 m <sup>3</sup> |
| Betoni, odporni na podvodno abrazijo | 1.846 m <sup>3</sup>  |
| Klasični betoni                      | 21.646 m <sup>3</sup> |
| Zalivni betoni opreme                | 2.335 m <sup>3</sup>  |
| <b>Količine vgrajene armature</b>    | <b>4.8385 t</b>       |

\* KG - Kaplanovim gonilnikom

\*\* DB - denivelacija bazena

## 2.3 HE Krško (HEKK)



| Tip HE: pretočno akumulacijska HE      |                         |
|--|-------------------------|
| Nazivna moč                            | 39,12 MW                |
| Nazivni padec                          | 9,14 m                  |
| Nazivni pretok                         | 500 m <sup>3</sup> /s   |
| Srednji letni pretok                   | 205 m <sup>3</sup> /s   |
| Kota zaježitve                         | 164,00 m. n. m.         |
| Višina pregradnega objekta             | 39,25 m                 |
| Povprečna letna proizvodnja            | 146 GWh                 |
| <b>Število agregatov</b>               | <b>3</b>                |
| <b>Število prelivnih polj</b>          | <b>5</b>                |
| Turbine: 3 x 13,04 MW vertikalne s KG* |                         |
| Prostornina akumulacije                | 6,31 mio m <sup>3</sup> |
| Koristni volumen akumulacije           | 1,18 mio m <sup>3</sup> |
| Največja obratovalna DB**              | 1,0 m                   |

Gradnja: november 2007 do junij 2013 (68 mesecev);  
Gradnja v dveh gradbenih jamah:

4 prelivna polja = ena gradbena jama,  
strojnica + eno prelivno polje = ločena gradbena jama\*\*\*

| Količine vgrajenih betonov           |                       |
|--------------------------------------|-----------------------|
| Hidrotehnični (masivni) betoni       | 72.394 m <sup>3</sup> |
| Betoni, odporni na podvodno abrazijo | 1.846 m <sup>3</sup>  |
| Klasični betoni                      | 30.819 m <sup>3</sup> |
| Zalivni betoni opreme                | 2.335 m <sup>3</sup>  |
| Količine vgrajene armature           |                       |
|                                      | 4.398 t               |

\* KG - Kaplanovim gonilnikom

\*\* DB - denivelacija bazena

\*\*\* Gradbišče 3 x poplavljeno z visoko vodo  
(september 2007, december 2009, september 2010)

## 2.4 HE Brežice (HEBR)



| Tip HE: pretočno akumulacijska HE     |                         |
|---------------------------------------|-------------------------|
| Nazivna moč                           | 47,4 MW                 |
| Nazivni padec                         | 11,0 m                  |
| Nazivni pretok                        | 500 m <sup>3</sup> /s   |
| Srednji letni pretok                  | 207 m <sup>3</sup> /s   |
| Kota zaježitve                        | 153,00 m. n. m.         |
| Višina pregradnega objekta            | 41,8 m                  |
| Povprečna letna proizvodnja           | 161 GWh                 |
| <b>Število agregatov</b>              | <b>3</b>                |
| <b>Število prelivnih polj</b>         | <b>5</b>                |
| Turbine: 3 x 15,8 MW vertikalne s KG* |                         |
| Prostornina akumulacije               | 19,3 mio m <sup>3</sup> |
| Koristni volumen akumulacije          | 3,4 mio m <sup>3</sup>  |
| Največja obratovalna DB**             | 1,1 m                   |

**Gradnja: april 2014 do oktober 2017 (43 mesecev);  
Gradnja v eni gradbeni jami**

### Količine vgrajenih betonov\*\*\*

|                                      |                       |
|--------------------------------------|-----------------------|
| Hidrotehnični (masivni) betoni       | 70.401 m <sup>3</sup> |
| Betoni, odporni na podvodno abrazijo | 2.710 m <sup>3</sup>  |
| Klasični betoni                      | 7.475 m <sup>3</sup>  |
| Zalivni betoni opreme                | 1.543 m <sup>3</sup>  |

**Količine vgrajene armature** 4.955 t

\* KG - Kaplanovim gonilnikom

\*\* DB - denivelacija bazena

\*\*\* Nekaj manjša količina betonov od HE KK, ker je bila izvedena optimizacija betonske konstrukcije.



### 3 HIDROTEHNIČNI (MASIVNI) BETONI

#### 3.1 Definicija masivnega betona in osnovne značilnosti

Pri gradnji HE se je za masivne betone uveljavil izraz hidrotehnični betoni. Že samo ime, masivni beton, kaže na to, da gre vedno za zelo velike količine in prav tako tudi za velike količine sestavin za pripravo betona. Tehnologija masivnih betonov očitno zahteva velika vlaganja v opremo in transportna sredstva. Izbor materialov, projektiranje sestav in tehnoloških postopkov predstavlja zelo zahtevna dela, pri čemer se zahteva visoka stopnja varnosti in kontrole kakovosti del<sup>1</sup>.

ACI Concrete Terminology opredeljuje masivni beton kot<sup>2</sup> "vsaka prostornina konstrukcijskega betona, v kateri lahko kombinacija dimenzij vgrajenega elementa, robnih pogojev, značilnosti betonske mešanice in okoliških pogojev povzroči neželene temperaturne napetosti, razpoke, škodljive kemične reakcije ali zmanjšanje dolgoročne trdnosti zaradi povišane temperature betona, ki je posledica toplote pri hidrataciji".

V istih navodilih, ki jih je pripravil ACI Committee 207 je privzeta tudi razlaga izraza za klasični masivni beton, ki se na splošno uporablja za masivni beton za gradnjo, kot so jezovi, kjer so bile opažene težave z nastajanjem toplote pri zaporednem vgrajevanju velikih dimenzij, ki so zadržale veliko toplote<sup>3</sup>. Klasični masivni beton se običajno nanaša na beton, ki se uporablja za te vrste vgradnje in ima na splošno relativno nižjo vsebnost cementnih materialov, nižjo temperaturo, nižje ali poznejše zahteve glede projektne trdnosti in/ali veliko največjo zrno grobega agregata.

#### 3.2 Kratek pregled bistvenih lastnosti masivnih betonov HE na spodnji Savi

V tehničnih specifikacijah za masivne betone, ki so se vgrajevali v posamezne konstrukcijske elemente jezovnih zgradb HE na spodnji Savi so bila podana naslednja priporočila, ki so jih izvajalci del upoštevali pri projektiranju njihovih sestav:

- izbor čim večjega  $D_{max}$  kamenega agregata,
- določitev čim nižje možne vsebnosti cementa,
- določitev optimalne količine mineralnih in kemijskih dodatkov,
- pri uporabi nizkohidratacijskih cementov ali mineralnih dodatkov za upočasnitev razvoja hidratacijske toplote se za merodajno starost, pri kateri se ugotavlja lastnosti masivnega betona določi **termin 90 dni**.

Pri pregledu vgrajenega masivnega betona na HE Vrhovo, ki je bila zgrajena približno 10 let pred začetkom gradnje HE Boštanj niso bile opažene razpoke. Ugotovljenih pa je veliko odprtih delovnih stikov med posameznimi bloki (slika 7), ki so posledica visokih temperatur,

temperaturnih gradientov in krčenja strjujočega masivnega betona.

Na osnovi teh ugotovitev in dodatnih raziskav so bile v tehničnih specifikacijah za gradnjo naslednjih HE na spodnji Savi dopolnjene z naslednje zahteve za masivne betone:

- v okviru začetnih (predhodnih) preskusov se mora obvezno preskusiti **priraščanje hidratacijske toplote** strjujočega masivnega betona **v adiabatskih (pol-adiabatskih) pogojih**,
- zagotoviti dovolj počasen razvoj hidratacijske toplote in dovolj zmanjšano stopnjo krčenja – **največja dovoljena temperatura strjujočega se betona  $\leq + 55 \text{ }^\circ\text{C}$ , gradient temperature v bloku sme znašati največ  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  na  $0,5 \text{ m}$  v katerikoli smeri, pri čemer začetna temperatura svežega masivnega betona ne sme biti višja od  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,**
- povprečen skrček pri starosti betona 180 dni  $\bar{\epsilon}_{cs} \leq 0,7 \text{ }‰$ .

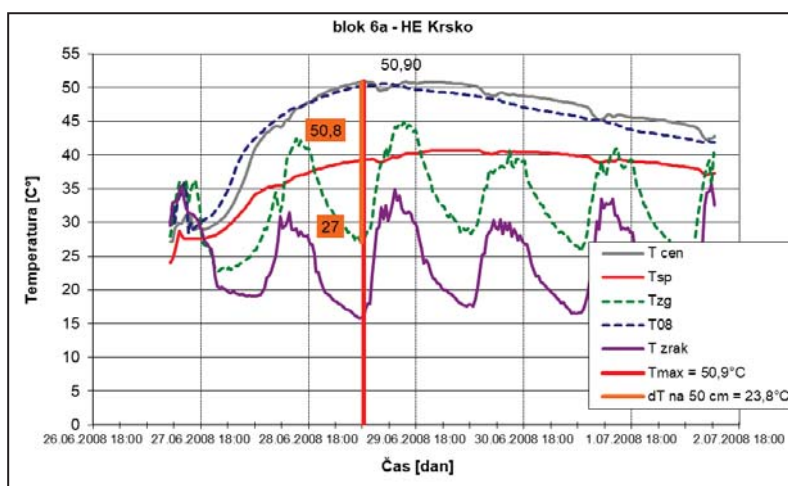
Med gradnjo vseh HE sta se izvajali tekoča kontrola izvajalcev in zunanja kontrola investitorja. S stalno prisotnostjo tekoče kontrole pri pripravi in vgrajevanju masivnih betonov in z občasno prisotnostjo zunanje kontrole je bila zagotovljena zadovoljiva kakovost svežih masivnih betonov in primerna vgrajenost v posamezne konstrukcijske elemente. S tem so bili doseženi rezultati strjenih masivnih betonov, ki so bili skladni s projektom predpisanimi kriteriji za posamezne lastnosti.



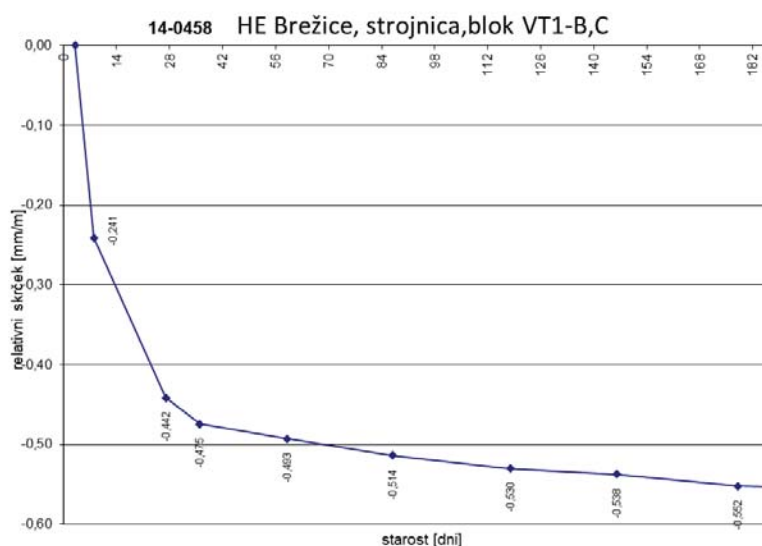
Slika 7: Odprti stik med blokoma jezovne zgradbe HE Vrhovo.

Kot primer so v sliki 8 v grafični obliki podani rezultati meritev spreminjanja temperature masivnega betona v predhodno določenih točkah bloka 6a jezovne zgradbe HE Krško. Merila se je tudi temperatura zraka. Dobljeni rezultati meritev so skladni s kriteriji, ki so podani v projektu ( $T_{\max} < 55\text{ °C}$  in  $\Delta T < 25\text{ °C}$ ).

V sliki 9 pa je prikazan potek krčenja masivnega betona, ki se je vgradil v blok VT1-B,C, v strojnici HE Brežice. Pri starosti masivnega betona 180 dni je relativni skrček  $< 0,7\text{ ‰}$ .



Slika 8: Spreminjanje temperature strujočega masivnega betona, ki je bil vgrajen v blok 6a jezovne zgradbe HE Krško.



Slika 9: Krčenje v odvisnosti od starosti masivnega betona, ki se je vgradil v blok VT1-B,C, v strojnici HE Brežice.

## 4 BETON, ODPOREN PROTI PODVODNI ABRAZIJI

### 4.1 Definicija podvodne abrazijske odpornosti in ocena obremenitve betonskih površin s sedimenti v spodnji Savi

Definicija za splošno abrazijsko odpornost betona<sup>4</sup>: abrazijska odpornost je sposobnost betona, da se upira abrazijskim obremenitvam, ki se pojavijo zaradi trenja, obrabe, brušenja, kotaljenja, udara, visokih lokalnih napetosti ali zaradi delovanja tekočin, ki vsebujejo abrazivne medije.

Odpornost proti podvodni abraziiji je sposobnost betona, da prenese abrazijske obremenitve, ki jih povzročata vodni tok s trdnimi delci, ki jih prenaša voda.

Reka Sava ima hudourniški značaj z značilnimi ekstremnimi pretoki: od  $40\text{ m}^3/\text{s}$  v sušnem obdobju do več kot  $3.000\text{ m}^3/\text{s}$  v deževnem obdobju (slika 10).

Prenos sedimentov doseže do  $100.000\text{ m}^3/\text{s}$  suspendiranega tovora na leto (večinoma apnenec). Jezovi so zasnovani tako, da vzpostavijo naravni režim odtoka pri ekstremnih pretokih. Konstrukcije za odvajanje vode so neposredno izpostavljene abraziiji, zato je bila pri načrtovanju posebna pozornost namenjena zaščiti pred abraziijo na izpostavljenih delih konstrukcije jezov. Pri načrtovanju oblog, odpornih proti podvodni abraziiji, je bilo treba rešiti številna vprašanja, povezana z ustrezno sestavo betona, da bi lahko določili ustrezne raziskovalne metode, uporabo na terenu in nenazadnje preverjanje odpornosti materiala med obratovanjem<sup>5,6</sup>.

Zaradi zgoraj opisanih obremenitev se je na vsa prelivna polja vseh HE na spodnji Savi vgradil beton odporen proti podvodni abraziiji v debelini 30 cm.



Slika 10: Posnetka (a - levo) in (b - desno) prelivnega polja HE Vrhuvo, ko je znašal pretok Save približno 2.500 m<sup>3</sup>/s.

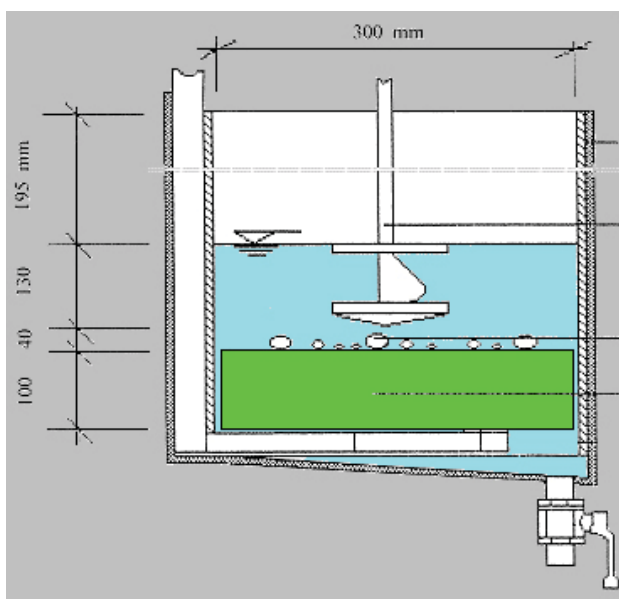
#### 4.2 Preskusna metoda in ocena odpornosti betona proti podvodni abraziji

Podvodno abrazijsko delovanje delcev, nošenih z vodo, je zelo dobro ponazorjeno s podvodno preskusno metodo, ki je podana v standardu ASTM C 1138 M - 19. To metodo so razvili v Structures Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station<sup>7-9</sup>.

Naprava za merjenje podvodne abrazijske odpornosti ima jekleno cilindrično posodo, v katero se vstavi preskušavec betona s prečnim premerom 29,5 cm in višino 10 cm (slika 11).

Voda, ki kroži zaradi vrtenja mešala, nosi po površini betonskega preskušanca jeklene brusne kroglice, s čimer povzroča abrazijo. V standardu se predpisuje 72 urno trajanje preskusa, pri čemer se vsakih 12 ur izvede meritev izgube mase oziroma prostornine in izračuna povprečna globina abrazije.

Izvedena je bila obširna raziskovalna naloga, katere glavni namen je bil opredeliti možnost napovedovanja procesa obrabe betonskih oblog na konstrukcijah jezov na reki Savi na podlagi standardnih postopkov preskušanja odpornosti proti podvodni abraziji<sup>10</sup>. Raziskovalno delo je temeljilo na primerjavi laboratorijskih rezultatov z meritvami odpornosti betona proti podvodni abraziji v naravnih razmerah, ki so bile opravljene na testnih površinah v zadrževalnem bazenu HE Vrhuvo. Na osni rezultatov teh raziskav in številnih rezultatov preskusov



Slika 11: Skica prečnega prereza cilindrične posode za preskus odpornosti betona proti podvodni abraziji po standardu ASTM C 1138 M - 19.

betonov različnih sestav je bil podan kriterij za oceno odpornosti betona proti podvodni abraziji: ocenjuje se, da je beton odporen proti podvodni abraziji, če je posamezni rezultat meritve povprečne globine abrazije po ASTM C 1138 M – 19 po 72 urah preskusa  $ADA_{75} \leq 3,0$  mm, pri starosti betona 90 dni.

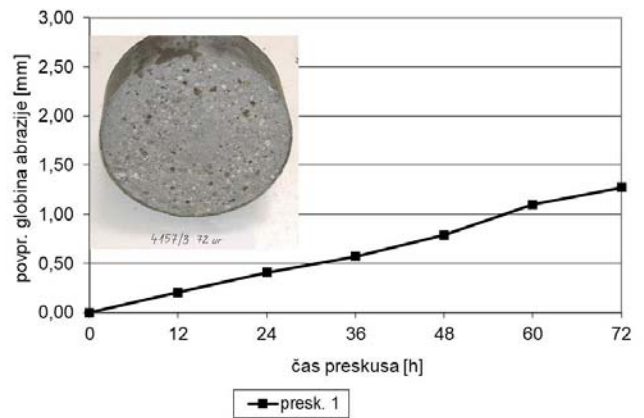
Kot primer so v sliki 12 podni rezultati preskusa podvodne abrazijske odpornosti betona, ki se je vgradil v bloka S2-5 in S3-5 v stebru prelivnega polja HE Boštanj. Po 72 urah preskusa je bila dobljena povprečna globina abrazije  $ADA_{75} = 1,3$  mm < 3,0 mm.

## 5 SKLEP

Na osnovi velikega števila rezultatov preskusov posameznih lastnosti betonov hidroelektrarn na spodnji Savi se lahko sklepa, da so vgrajeni betoni dosegli s projektom predpisane kriterije kakovosti in da so relativno dobro vgrajeni v konstrukcijske elemente jezovnih zgradb.

V okviru rednih kontrolnih pregledov so ugotovljene le manjše napake, ki se sprti popravljajo.

Z novimi spoznanji na področju tehnologije betona in uporabo novih materialov ter sodobnih merskih metod lahko upravičeno pričakujemo še večjo kakovost in obstojnost vgrajenih betonov ter trajnost jezovnih zgradb hidroelektrarn, ki se bodo gradile na slovenskih rekah.



Slika 12: Rezultati preskusa podvodne abrazijske odpornosti betona, ki se je vgradil v bloka S2-5 in S3-5 v stebru prelivnega polja HE Boštanj.

## LITERATURA

1. Ukrainczyk, V., *Tehnologija masivnih betonov*. Zbornik gradiv in referatov. 6. Slovenski kolokvij o betonih. Hidrotehnični betoni. Ljubljana 1999. IRMA. str. 1–9.
2. ACI Committee 207 (2022): *Mass Concrete - Guide*, ACI PRC-207.1-21, American Concrete Institute, ACI Farmington Hills.
3. Bartojay, K., *Thermal Properties of Reinforced Structural mass Concrete*, Report DSO-12-02, Dam Safety Technology Development Program, U.S. Department of the Interior, Denver, CO, 68 str.
4. Alexander, M.G., *Towards standard tests for abrasion resistance of concrete, Report of limited number of tests studied, with a critical evaluation* (pripravljen kot predlog za RILEM CPC-14 Concrete Permanent Committee, junij 1984). *Materiaux et Constructions*. Vol. 18 – No 106. str. 297 do 307.
5. Kryžanowski A., Šušteršič J., *Performance of concrete exposed to long-term underwater abrasion loading*. Commission Internationale Des Grands Barrages, Vingt et unième Congrès Des Grands Barrages, Montréal, June 2003, Q.82-R.13, str. 207–218.
6. Kryžanowski, A., Šušteršič, J., *Performance of concrete exposed to the underwater abrasion loading*. Proceedings. 11th International Congress on Polymers in Concrete, 2nd - 4th June, 2004, at BAM, Berlin, Germany. Berlin: BAM, 2004. str. 45–52.
7. Liu, T.C., *Maintenance and Preservation of Concrete Structures: Report 3, Abrasion Erosion Resistance of Concrete*. Technical Report No. C-78-4. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Vicksburg. julij 1980. 129 str.
8. Liu, T.C., *Abrasion Resistance of Concrete*. *ACI Journal*, sept. okt. 1981. str. 341 350.
9. Liu, T.C., in McDonald, J.E., *Abrasion-Erosion Resistance of Fiber-Reinforced Concrete*. *Cem. Con. and Aggr.*, 2 (3), 1981. str. 93–100.
10. Kryžanowski, A., Mikoš, M., Šušteršič, J., Ukrainczyk, V., Planinc, I., *Testing of concrete abrasion resistance in hydraulic structures on the lower Sava River*. *Strojniški vestnik*. apr. 2012, vol. 58, no. 4, str. 245–254.



TILEN TURK<sup>1</sup>, DOC. DR. PETRA ŠTUKOVNIK<sup>1</sup>,  
MARJAN MARINŠEK<sup>2</sup>,  
PROF. DR. VIOLETA BOKAN BOSILJKOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup> UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA  
GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

<sup>2</sup> UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA KEMIJO  
IN KEMIJSKO TEHNOLOGIJO

# Primerjava obstojnosti pospešeno staranih cementnih kompozitov z apnenčevim in dolomitnim agregatom



PREDAVATELJ  
TILEN TURK

## POVZETEK

Priprava obstojnega betona ne zmanjša le stroškov vzdrževanja konstrukcij ampak tudi pomembno doprinese k zmanjšanju okoljskega vpliva betona zaradi njegovega daljšega življenjskega cikla. Ugotovljeno je bilo, da dolomitni agregat v alkalnem okolju betona propada, vpliv takšne reakcije na zmrzlinško obstojnost ob prisotnosti talilnih soli in sulfatni napad betona ni znan. V delu bomo zato preučevali vpliv agregata, cementa in pogoje pospešenega staranja na obstojnost cementnih kompozitov proti zmrzovanju/tajanju ob prisotnosti kloridnih soli in sulfatnih soli. Glede na meritve spremembe mase, dinamičnega E-Modula in upogibnih ter tlačnih trdnosti smo ugotovili, da je na cikle zmrzovanja/tajanja in kloride najbolj obstojen pospešeno staran dolomitni agregat z žilindrinim vezivom. Pri sulfatnem napadu se kot najbolj obstojen izkaže apnenčev agregat s Portlandskim vezivom, zaradi nižjega padca E-Modula ter delne obnovitve trdnosti po 210 ciklih.

## 1 UVOD

Beton je najbolj razširjen material na svetu zaradi njegove dokaj enostavne priprave in dobre obstojnosti v življenjskem ciklu 40 let. Zaradi njegove razširjenosti ni presenetljivo, da proizvodnja takšnega kompozita pomembno doprinese k izpustom toplogrednih plinov, zato je za podaljšanje njegovega življenjskega cikla treba poznati njegove mehanizme propadanja. Znano je, da na obstojnost betona vplivajo mehanski, fizikalni in kemijski vplivi (ki v okolju delujejo vzporedno drug z drugim).

V zimskem času je beton pogosto izpostavljen temperaturam pod lediščem, zato se za preprečitev poledenosti betonske površine uporabljajo talilne soli. Uporabljene talilne soli so pogosto ionske soli kloridov, kot so NaCl, CaCl<sub>2</sub>, KCl, ki so v gradbeništvu nezaželjene predvsem zaradi iniciacije korodiranja armature. Izkazalo se je, da kloridni ioni ne povzročijo le rjavenja armature temveč tudi interagirajo s cementnimi hidratacijskimi produkti, kar povzroča kemijsko propadanje betona. Številne študije so ugotovile, da se v prisotnosti klorida ta lahko veže kemijsko z nastankom Friedel soli iz monosulfoaluminata in aluminatnih ionov, ali pa se adsorbira med sloje C-S-H gela [1]. Nastanek Friedel soli nima ekspanzijskih lastnosti, zato številne študije preučujejo vezno kapaciteto klorida z namenom upočasnjevanja transporta klorida proti armaturi in posledično njeno rjavenje [2]. Študije opisujejo tudi tvorbo sekundarnega etringita zaradi zamenjave sulfatnih ionov s kloridnimi ioni v kalcijevem monosulfoaluminatu, ki je produkt pri razpadu etringita [3], [4].

Izpostavljenost sulfatnim ionom naj bi povzročilo nastanek sekundarnega etringita, ki povzroča ekspanzijo in pokanje betona, ter tvorbo gipsa, ki ima majhno tlačno trdnost [5], [6]. Pri temperaturah nižjih od 9 °C naj bi se ob prisotnosti sulfatnih ionov tvoril tavmazit, ki ima gobasto strukturo in zato poruši integriteto betona [7].

Študije, ki so preučevale vpliv agregata, uporabljenega pri pripravi betona, so ugotovile, da dolomitni agregat v alkalnem okolju razpada na kalcit, brucit in CaCO<sub>3</sub><sup>2-</sup> ione, ki s portlanditom tvorijo sekundarni kalcit. Z napredovanjem reakcije naj bi prihajalo tudi do razpada

in regeneracije C-S-H gela, nastala produkta takšnih reakcij sta hidrotalcit in klinoklor. Omenjena reakcija se imenuje alkalno karbonatna reakcija [8]–[10].

Zaradi kompleksnosti alkalno karbonatne reakcije smo v nadaljevanju želeli preveriti njen vpliv na obstojnost cementnih kompozitov. Kot referenčni agregat smo uporabljali apnenčev agregat (L), kot preizkušane pa smo uporabili dolomitni agregat (R). Vzorce smo pospešeno starali 6 mesecev pri pogojih 1M NaOH 60 °C, 1M NaOH 40 °C in v deionizirani vodi pri 20 °C. Cementne kompozite smo nato izpostavili 3 % raztopini NaCl in ciklom zmrzovanja tajanja ter 3 % Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ter ciklom sušenja in vlaženja.

## 2 MATERIALI IN METODE

### 2.1 Priprava mešanic

Uporabili smo apnenčev agregat (L) in dolomitni agregat (R). Volumsko razmerje agregat: vezivo je znašalo 60:40. Vodocementno razmerje mešanic je znašalo 0,45. Za doseg primerne vgradljivosti smo uporabili superplastifikator. Uporabljena sta bila dva cementa; čisti Portlandski cement (CEM I) in žilindrin cement (CEM III). Cementno mešanico smo vgradili v kalupe dimenzij 40 mm x 40 mm x 160 mm. Pripravljene cementne kompozite smo pred pospešenim staranjem 28 dni negovali v pitni vodi.

### 2.2 Pospešeno staranje

Vzorce smo pospešeno starali v 1 M NaOH pri temperaturah 60 °C (NH60) in 40 °C (NH40). Ravno tako smo vzorce starali v deionizirani vodi pri 20 °C (H<sub>2</sub>O). Po staranju smo kompozite izpostavili 3 % NaCl in 3 % Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Cikel zmrzovanja je trajal 16 ur pri temperaturi -20 °C, cikel taljenja pa 8 ur pri temperaturi 20 °C. Odpornost proti zmrzovanju in tajanju je bila preverjena skladno s standardom CEN/TS 12390-9 [11]. Pri sulfatnem napadu je cikel sušenja trajal 16 ur in cikel vlaženja 8 ur pri sobnih pogojih. V nadaljevanju bomo vzorce poimenovali po načinu: LC1NH60, kar pomeni cementni kompozit z apnenčevim agregatom, CEM I, staran v 1 M NaOH pri 60 °C.

### 2.3 Laboratorijske preiskave

Vsem preizkušancem smo tedensko spremljali spremembo mase in dinamičnega E-Modula. Vsakih 10 ciklov smo opravili preiskavo upogibne in tlačne trdnosti.

#### 2.3.1 Dinamični E-Modul

Transmisijski čas prehoda ultrazvočnih valov smo merili z ultrazvokom Proceq Pundit PL-200 s Proceq 54 kHz longitudinalnimi in Proceq 45 kHz strižnimi sondami. Dinamični E-Modul smo izračunali s programom Proceq PL-Link. Meritve so bile opravljene na 3 vzorcih.

#### 2.3.2 Tlačna in upogibna trdnost

Tlačna in upogibna trdnost sta bili določeni skladno z relevantnim standardom skupine SIST-EN 12390. Število testiranih vzorcev je pri meritvah tlačne trdnosti znašalo 6, pri upogibni trdnosti pa 3.

## 3 REZULTATI IN DISKUSIJA

### 3.1 Odpornost proti ciklom zmrzovanja in tajanja ob prisotnosti talilne soli

Odpornost apnenčevega agregata proti ciklom zmrzovanja in tajanja je slabša kot odpornost dolomitnega agregata. Izguba mase cementnih kompozitov po 30 ciklih zmrzovanja/tajanja z apnenčevim agregatom si sledi LC3NH40 (0,18 %), LC3NH60 (1,27 %), LC1NH60 (2,34 %), LC1H20 (9,72 %), LC3H20 (9,72 %) in LC1NH40 (17,73 %). Opazimo, da je obstojnost kompozita z žilindrinim cementom boljša kot tista s portlandskim cementom. Največja izguba dinamičnega E-Modula glede na začetno stanje je bila pri kompozitu LC1NH40 (32,7 %), LC3H20 (30,8 %), LC1NH60 (7,7 %), LC1H20 (7 %), LC3NH40 (-1,8 %). Takšen padec E-Modula pri kompozitu LC3H20 je verjeten zaradi počasnejše reakcije žilindre. Izguba upogibne trdnosti (glede na začetno stanje) je bila najvišja pri kompozitu LC3H20 (30,9 %), sledi kompozit LC1NH40 (11 %) nato LC3NH60 (2,5 %). Ostali kompoziti so po 30 ciklih pridobili na upogibni trdnosti. Izpostavljenost zmrzovanju in tajanju ter talilni soli je imelo vpliv na tlačne trdnosti. Izgube tlačne trdnosti glede na začetno stanje so sledeče: LC3H20 69,3 %, LC1H20 40,8 %, LC1NH40 23 %, LC3NH60 9,8 %, LC1NH60 6,2 % in LC3NH40 5,0 %. Opazimo lahko, da je negativen vpliv

zmrzovanja in tajanja na tlačno trdnost največji pri zgodnjih starostih betona. S časom namreč zreagirajo vsi delci cementa, zato se trdnost in posledično obstojnost kompozita poveča. Iz meritev trdnosti opazimo, da je obstojnost kompozitov z vezivom CEM III boljša v primerjavi z vezivom CEM I. Boljša obstojnost žilindrinega cementa pospešeno staranih vzorcev (NH60 in NH40) je lahko posledica v celoti zreagiranih delcev žilindre, ki v alkalnem okolju tvorijo C-S-H gelu podobno fazo.

Dolomitni agregat je v splošnem izgubil manj mase v primerjavi z enako starajočimi se kompoziti z apnenčastim agregatom. Največjo izgubo mase je imel kompozit RC1H20 (6,1 %), sledil mu je kompozit RC3H20 (1,8 %). Kompoziti RC1NH60, RC3NH60, RC1NH40 in RC3NH40 so izgubili maso po sledečem vrstnem redu 0,3 %, 0,3 %, 0,05 %, 0,1 %. Vrednosti so v primerjavi z apnenčevim agregatom nižje. Trend dinamičnega E-Modula vseh cementnih mešanic z dolomitnim agregatom nakazuje nenaden padec, ki se proti koncu ciklanja vzpostavi na vrednost enako ali višjo od začetne. Takšen padec bi lahko nakazoval prekristalizacijo hidratacijskih produktov, ki so glede na vrednosti dinamičnega E-Modula stabilne in ne vplivajo na mehanske lastnosti kompozita. Vrednosti dinamičnega E-Modula za testirane mešanice so predstavljene v tabeli 1.

Vidimo, da je kompozit s cementom CEM III, podobno kot pri apnenčevem agregatu, bolj podvržen propadanju pri zgodnjih starostih betona. V tabeli 2 so predstavljene tlačne in upogibne trdnosti cementnega kompozita označene s  $f_c$  in  $f_r$ .

Opazimo lahko, da se v primeru RC1H20 pojavljajo velika odstopanja med vzorci, kar je lahko posledica alkalno karbonatne reakcije. Nehomogenost lahko pov-

Tabela 1: Dinamični E-Modul cementnega kompozita z dolomitnim agregatom po 0 in 30 ciklih

| Mešanica | $E_{D,0}$ [GPa] | $E_{D,30}$ [GPa] |
|----------|-----------------|------------------|
| RC1NH60  | 44,0            | 44,3             |
| RC3NH60  | 53,7            | 54,5             |
| RC1NH40  | 59,3            | 59,6             |
| RC3NH40  | 56,2            | 57,2             |
| RC1H20   | 48              | 53,9             |
| RC3H20   | 52,3            | 44,1             |

| Mešanica | $f_{r,0}$ [MPa] | $f_{r,30}$ [MPa] | $f_{c,0}$ [MPa] | $f_{c,30}$ [MPa] |
|----------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| RC1NH60  | 15,1 ± 2,4      | 14,2 ± 0,7       | 92,1 ± 2,6      | 89,2 ± 4,6       |
| RC3NH60  | 15,8 ± 1,3      | 13,4 ± 0,5       | 83,5 ± 4,9      | 87,3 ± 4,5       |
| RC1NH40  | 9,8 ± 0,5       | 16,6 ± 1,0       | 106,7 ± 0,6     | 93,9 ± 9,9       |
| RC3NH40  | 13,9 ± 0,8      | 14,8 ± 0,6       | 97,2 ± 1,9      | 96,0 ± 1,2       |
| RC1H20   | 14,7 ± 0,7      | 12,3 ± 1,3       | 83,5 ± 7,2      | 64,6 ± 19,7      |
| RC3H20   | 12,9 ± 0,6      | 7,6 ± 0,6        | 85,6 ± 3,9      | 72,8 ± 3,1       |

Tabela 2: Tlačne ( $f_c$ ) in upogibne ( $f_r$ ) vrednosti cementnega kompozita z dolomitnim agregatom po 0 in 30 ciklih.

zroči tudi reakcija s kloridom, katerega penetracija je odvisna predvsem od kvalitete vgradnje betona. Med vzorci, izpostavljenimi ciklom zmrzovanja in tajanja ter talilni soli, so se ne glede na pogoje staranja najbolj izkazali vzorci z dolomitnim agregatom. Opazili smo, da so vzorci s CEM III pri zgodnjih starostih bolj dovzetni za propad, njihova obstojnost pa se časovno povečuje. Obstojnost apnenčevega agregata je lahko slabša, zaradi različne granulacijske sestave, opazili smo namreč, da apnenčev agregat vsebuje manjši delež praškastih delcev v primerjavi z dolomitnim agregatom. Vsekakor je potrebna dodatna kemijska in petrografska analiza, s katerimi bi pridobili vpogled in razumevanje procesov propadanja.

### 3.2 Obstojnost na sulfatni napad

Vzorci starani pri pogojih NH60 z apnenčevim agregatom in Portlandskim cementom (LC1NH60) so na začetku preiskave izkazovali povišanje mase. Po 15 ciklih se je pričela izguba mase za 0,2 % glede na prejšnje stanje. Najvišja izguba mase je bila po 35 ciklih, in sicer 0,5 % glede na najvišjo izmerjeno spremembo mase po 10 ciklih. Po 210 ciklih se je masa vzorcev ponovno zvišala na najvišjo raven. Sprememba dinamičnega E-Modula vzorcev ni bila statistično pomembna. Najvišji padec dinamičnega E-Modula je bil po 210 ciklih, vrednost pa je bila 2,1 GPa nižja od začetnega stanja. Upogibna trdnost mešanic se med ciklanjem ni pomembno spremenila. Najnižjo tlačno trdnost smo zabeležili po 30 ciklih in je znašala  $57,53 \pm 2,4$  MPa, kar je 23,89 MPa manj od začetnega stanja. Zanimivo je, da je po 30 ciklih mešanica dosegla najvišji dinamični E-Modul (48,43 GPa). Po 210 ciklih se je tlačna trdnost nekoliko povišala, na vrednost  $68,19 \pm 4,7$  MPa.

Vzorci s pospešeno staranim žlindrinim cementom in apnenčevim agregatom (LC3NH60) so prvič izgubili maso po 15 ciklih, in sicer za 0,07 % glede na prejšnje stanje. Ponovna izguba mase je bila po 35 ciklih, in sicer za 0,03 % glede na prejšnje stanje. Med ostalimi cikli je vzorcem masa naraščala. Po 210 ciklih se masa vzorcev ponovno dvigne na najvišjo doseženo raven. Pri mešanici LC3NH60 je E-Modul naraščal do 30 cikla (49,01 GPa), nato pa po 35 ciklih strmo padel na vrednost 37,75 GPa. Upogibna trdnost se je pri mešanici povečala, v primerjavi z začetno vrednostjo, najvišja upogibna trdnost je bila po 30 ciklih in je znašala  $14,0 \pm 0,5$  MPa. Vrednost upogibne trdnosti sovпада tudi z vrednostjo dinamičnega E-Modula. Tlačna trdnost na začetku je znašala  $71,4 \pm 1,0$  MPa in je dosegla najvišjo raven po 30 ciklih ( $82,4 \pm 6,3$  MPa). Po 210 ciklih je tlačna trdnost padla na  $74,2 \pm 2,1$  MPa, na enako vrednost, kot je bila na začetku ciklanja.

Mešanica LC1H20 je na začetku izkazovala povišanje mase, ki je po 20 ciklih padla za 0,02 %. Masa se je v nadaljnjih ciklih ponovno povečevala in ponovno padla pri 35 ciklu (za 0,6 % glede na cikel 30). Po 210 ciklih je pridobitev mase najvišja. Dinamični E-Modul se je do

20 cikla povečeval (48,19 GPa) in po 25 ciklih padel na vrednost 40,41 GPa. Podobna vrednost dinamičnega E-Modula je nato vse do 35 cikla. Po 210 ciklih se dinamični E-Modul ponovno poveča na vrednost 48,12 GPa, kar je podobna vrednost kot na začetku. Upogibna trdnost se med ciklanjem ni spreminjala in je znašala  $13,7 \pm 1,07$  MPa. Sprememba tlačne trdnosti je s ciklanjem očitna – po 30 ciklih znaša tlačna trdnost  $75,67 \pm 0,96$  MPa, kar je 9,58 MPa manj kot na začetku. Po 210 ciklih je tlačna trdnost primerljiva z začetno trdnostjo in znaša  $85,11 \pm 3,04$  MPa.

Masa mešanice LC3H20 se je tekom ciklanja povečevala. Vrednost dinamičnega E-Modula je dosegla najmanjšo vrednost po 35 ciklih (36,04 GPa) in predstavlja padec za 12,03 GPa v primerjavi z dinamičnim E-Modulom pri 30 ciklih. Pri 210 ciklih je dinamični E-Modul najvišji in znaša 46,97 GPa. Upogibna trdnost kompozita je bila najvišja po 30 ciklih in je po 210 ciklih ostala nespremenjena. Tlačna trdnost kompozitov se je po 30 ciklih znižala na vrednost  $75,43 \pm 1,10$  MPa, kar je 5,7 MPa manj kot začetna vrednost. Po 210 ciklih je tlačna trdnost primerljiva s tlačno trdnostjo po 30 ciklih in znaša  $75,62 \pm 4,78$  MPa.

Mešanica starana pri NH60, pripravljena s Portland cementom (CEM I) in dolomitnim agregatom (RC1NH60) je pri 15 ciklih izgubila 0,07 % mase v primerjavi z 10 cikli. Po kratkem naraščanju mase je mešanica ponovno izgubila maso pri 30 in 35 ciklu. Največji padec je bil pri 35 ciklu, kjer je mešanica izgubila 0,4 % mase glede na 25 cikel. Dinamični E-Modul pri omenjeni mešanici narašča do 15 cikla (55,27 GPa) in pade pri 15 ciklu (45,08 GPa). Pri ciklu 20, 25 in 30 je dinamični E-Modul narasel na 49,03 GPa. S 35 ciklom dinamični E-Modul ponovno pade na vrednost 42,15 GPa. E-Modul po 210 ciklih znaša 56,25 GPa in je 6,07 GPa višji od začetnega stanja. Upogibne trdnosti kompozita po 30 ciklih padejo na vrednost  $14,53 \pm 0,52$  MPa, kar je 4,5 MPa nižje od začetnega stanja. Upogibna trdnost po 210 ciklih ostane nespremenjena. Tlačna trdnost na začetku je znašala  $127,89 \pm 3,94$  MPa in je po 30 ciklih padla na  $94,62 \pm 2,30$  MPa. Po 210 ciklih se tlačna trdnost nekoliko poveča in znaša  $100,8 \pm 0,5$  MPa.

Kompozitu RC3NH60 se je masa v času eksperimentov povečevala – najvišjo maso so imeli kompoziti po 210 ciklih. Dinamični E-Modul se je kompozitu znižal po 15 ciklih in je znašal 42,65 GPa, kar je 10,7 GPa manj od izmerjenega dinamičnega modula po 10 ciklih. Pri ciklih 20, 25 in 30 se dinamični E-Modul povečuje do vrednosti 51,3 GPa in nato pri ciklu 35 ponovno pade na vrednost 41,04 GPa. Po 210 ciklih je dinamični E-Modul mešanice večji kot na začetku in znaša 54,19 GPa. Upogibna trdnost kompozita se med prisotnostjo sulfatnih anionov ni spremenila. Statistično značilen padec je pri tlačni trdnosti, kjer po 30 ciklih kompozit zdrži  $67,36 \pm 1,04$  MPa. Začetna vrednost tlačne trdnosti je bila 86,1  $\pm 4,79$  MPa, tlačna trdnost merjena po 210 ciklih pa je znašala  $96,27 \pm 0,88$  MPa.



Kompozitom ki so bili starani v deionizirani vodi in so vsebovali dolomitni agregat in Portlandski cement (CEM I) (RC1H20), se je masa večala do 30 cikla. V 35 ciklu je masa kompozita padla za 0,03 % in se nato ponovno povečala po 210 ciklih. Dinamični E-Modul se je kompozitu s cikli zviševal. Pri 30 ciklu se pojavi padec E-Modula na vrednost 50,7 GPa, kar predstavlja znižanje za 5 GPa. Dinamični E-Modul pri ciklu 35 ostane na isti vrednosti kot pri ciklu 30. Po 210 ciklih E-Modul znaša 55,62 GPa in je za 2,44 GPa višji od začetnega stanja. Upogibna trdnost se kompozitom med ciklanjem ni spreminjala. Tlačna trdnost je od začetne vrednosti  $100,63 \pm 2,98$  MPa po 30 ciklu padla na  $87,98 \pm 0,76$  MPa. Po 210 ciklih se tlačna trdnost povrne na isto vrednost kot na začetku.

Pri žlindrinem cementu mešanice RC3H20 se je masa tekom ciklanja povečevala. Dinamični E-Modul je pri ciklu 20 naraščal do vrednosti 58 GPa in padel na vrednost 48,07 GPa pri ciklu 25. Dinamični E-Modul se je pri ciklu 35 še dodatno zmanjšal na vrednost 45,31 GPa. Po 210 ciklih je dinamični E-Modul zavzemal vrednost 55,07 GPa, kar predstavlja 5,56 GPa višjo vrednost od začetne vrednosti. Upogibna trdnost se je s ciklanjem zmanjševala. Začetna upogibna trdnost je znašala  $15,23 \pm 1,09$  MPa, po 30 ciklih  $13,7 \pm 0,83$  MPa in po 210 ciklih  $12,30 \pm 1,03$  MPa. Tlačna trdnost začetnega kompozita je znašala  $108,67 \pm 1,69$  MPa, po 30 ciklu  $75,43 \pm 1,10$  MPa in po 210 ciklu  $75,62 \pm 4,78$  MPa.

Opazimo, da imajo sulfatni ioni drugačen vpliv glede na način staranja, izbiro cementa in izbiro agregata. Pri pospešenem staranju pri 1M NaOH opazimo, da je padec tlačne trdnosti pri Portlandskem cementu večji v primerjavi z vodostaranimi vzorci. Padec tlačne trdnosti pri žlindrinem cementu pri vzorcih staranih v deionizi-

rani vodi pa je višji. To bi lahko pripisali nepopolno zreagirani žlindri. Opazimo tudi, da so cementni kompoziti s CEM I bolj odporni proti sulfatnemu napadu, kar kaže povrnitev tlačne trdnosti in dinamičnega E-Modula. Pomembno vlogo pri takšnem "samoceljenju" ima lahko zadostna bazičnost cementnega kamna, ki zagotovi nemoten potek hidratacije. Apnenčev agregat je, glede na naše raziskave, bolj obstojen pri sulfatnem napadu, saj je padec E-Modula enkratni proces – bodisi zaradi porabe celotnega C3A ali Afm. Pri dolomitnem agregatu pa se je izkazalo, da so vzponi in padci E-Modula pogostejši zaradi, morebitnih interakcij sulfatnih ionov s produkti alkalnokarbonatne reakcije, zato pričakujemo nadaljnji padec tlačne trdnosti ali pa utrujanje materiala.

## 4 ZAKLJUČEK

Obstojnost cementnih kompozitov je odvisna od starosti, izbranega veziva in agregata. V raziskavi, kjer smo preučevali obstojnost cementnih kompozitov proti zamrzovanju in tajanju ob prisotnosti talilnih snovi, se je kot najboljša kombinacija izkazala žlindrino vezivo in dolomitni agregat. Takšna mešanica namreč izkazuje najmanjšo izgubo mase in dinamičnega E-Modula, kar dolgoročno preprečuje ali vsaj močno ovira prodiranje kemijskih onesnaževal v notranjost kompozita. Pri sulfatnem napadu je pri dolomitnem agregatu prihajalo do ciklov naraščanja in padanja dinamičnega E-Modula, kar nakazuje na neobstojnost kompozita in je vodilo k utrujanju materiala. Pri sulfatnem napadu se je kot najbolj optimalna mešanica izkazal Portlandski cement in apnenčev agregat, saj kljub padcu dinamičnega E-Modula in trdnosti nakazuje trend samopopravljivosti.

## 5 LITERATURA

- [1] R. Wang, Q. Zhang, and Y. Li, "Deterioration of concrete under the coupling effects of freeze–thaw cycles and other actions: A review," *Construction and Building Materials*, vol. 319. Elsevier Ltd, Feb. 14, 2022. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126045.
- [2] S. Sui *et al.*, "Quantification methods for chloride binding in Portland cement and limestone systems," *Cem Concr Res*, vol. 125, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.105864.
- [3] S. Ekolu, F. Solomon, and G. Rakgosi, "Chloride – induced delayed ettringite formation in Portland cement mortars," *Constr Build Mater*, vol. 340, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127654.
- [4] F. Althoey, "Compressive strength reduction of cement pastes exposed to sodium chloride solutions: Secondary ettringite formation," *Constr Build Mater*, vol. 299, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123965.
- [5] M. Z. Y. Ting, K. S. Wong, M. E. Rahman, and M. Selowara Joo, "Cyclic compressive behavior of limestone and silicomanganese slag concrete subjected to sulphate attack and wetting-drying action in marine environment," *Journal of Building Engineering*, vol. 44, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.103357.
- [6] G. J. Yin, Z. Q. Shan, L. Miao, Y. J. Tang, X. B. Zuo, and X. D. Wen, "Finite element analysis on the diffusion-reaction-damage behavior in concrete subjected to sodium sulfate attack," *Eng Fail Anal*, vol. 137, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106278.
- [7] I. Galan, A. Baldermann, W. Kusterle, M. Dietzel, and F. Mittermayr, "Durability of shotcrete for underground support – Review and update," *Construction and Building Materials*, vol. 202. Elsevier Ltd, pp. 465–493, Mar. 30, 2019. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.151.
- [8] T. Katayama, "How to identify carbonate rock reactions in concrete," in *Materials Characterization*, Nov. 2004, pp. 85–104. doi: 10.1016/j.matchar.2004.07.002.
- [9] T. Katayama, "The so-called alkali-carbonate reaction (ACR) – Its mineralogical and geochemical details, with special reference to ASR," *Cem Concr Res*, vol. 40, no. 4, pp. 643–675, Apr. 2010, doi: 10.1016/j.cemconres.2009.09.020.
- [10] P. Štukovnik, V. B. Bosiljkov, and M. Marinšek, "Detailed investigation of ACR in concrete with silica-free dolomite aggregate," *Constr Build Mater*, vol. 216, pp. 325–336, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.04.260.
- [11] Inštitut za standardizacijo, "CEN/TS 12390-9: Testing hardened concrete – Part 9: Freeze–thaw resistance – Scaling – Complementary element".

DR. ANDREJ IPAVEC

SALONIT ANHOVO D.D.

# Razvojni izzivi cementne industrije



Cementna industrija igra ključno vlogo pri zagotavljanju strateško pomembne surovine za gradnjo družbene infrastrukture in bivalnih okolij. Vendar pa se sooča s številnimi razvojnimi izzivi, ki jih je treba nasloviti za doseganje bolj trajnostne in okolju prijazne proizvodnje cementa. Ta prispevek predstavlja štiri stebre razvoja v srednjeročnem obdobju, ki so: opuščanje klasičnih fosilnih goriv, uvajanje alternativnih surovin, proizvodnja električne energije iz obnovljivih virov ter zmanjševanje povprečnega deleža klinkerja v cementu. Dolgoročni cilj industrije pa je doseči ogljično nevtralno proizvodnjo cementa, saj cementna industrija prispeva približno 7 % antropogenih emisij CO<sub>2</sub>.

#### KLJUČNE BESEDE:

cementna industrija, razvojni izzivi, ogljični odtis, zajemanje CO<sub>2</sub>, trajnostni razvoj

## SREDNJEROČNI RAZVOJNI IZZIVI

Raba alternativnih goriv v proizvodnji cementa predstavlja pomemben korak k zmanjšanju okoljskega vpliva industrije. Uporaba goriv iz odpadkov ima potencial zmanjšanja emisij toplogrednih plinov ter zmanjšanja odvisnosti od fosilnih goriv. Ta praksa omogoča zamenjavo tradicionalnih goriv, kot so premog in petrolkoks, z alternativnimi gorivi, kot so industrijski odpadki, biomasa, gume in drugi energetsko bogati odpadki. Sprejetje in implementacija te tehnologije zahtevata skrbno upravljanje odpadkov, kakovostno nadzorovanje in prilagoditve proizvodnih procesov. Poleg zmanjšanja emisij ogljikovega dioksida ta praksa prispeva k učinkovitejši rabi virov in zmanjšanju količine odpadkov, ki končajo na odlagališčih. Vzpostavitev ustrezne zakonodaje in regulative ter sodelovanje med industrijo, vladami in lokalnimi skupnostmi so ključni dejavniki za uspešno izvajanje in sprejetje uporabe alternativnih goriv v cementni industriji.

Uporaba alternativnih surovin v cementni proizvodnji je pomemben izziv, saj lahko prispeva k zmanjšanju odvisnosti od naravnih virov in zmanjšanju vpliva na okolje. To lahko vključuje recikliranje betona, industrijskih

stranskih proizvodov, kot so pepel ali žindra ter uporabo drugih mineralnih surovin.

Prehod na proizvodnjo električne energije iz obnovljivih virov je pomemben korak v zmanjševanju ogljičnega odtisa energetske intenzivne cementne industrije. Vključevanje obnovljive energije, kot so sončna, vetrna ali hidroenergija, v proizvodne procese lahko prispeva k zmanjšanju emisij toplogrednih plinov.

Klinker je ključna sestavina cementa, vendar njegova proizvodnja prispeva k visokim emisijam CO<sub>2</sub>. Zmanjševanje deleža klinkerja v cementu je zato ključnega pomena za zmanjšanje ogljičnega odtisa industrije. Raziskave in inovacije v razvoju alternativnih veziv, kot so mešani cementi z nižjimi deleži klinkerja, predstavljajo pomemben korak v tej smeri.

Projekcija rabe vrst cementov v prihodnosti nakazuje jasen premik v smeri zmanjševanja deleža klinkerja v cementu. V letu 2022 je bil izdan nov standard EN 197-5, ki je vpeljal dve novi vrsti cementov: CEM II/C-M in CEM VI. Obe vrsti cementov imata nižje deleže klinkerja, kar predstavlja korak naprej v zmanjševanju ogljičnega odtisa. Cement CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N, ki ga je nedavno razvila družba Salonit Anhovo, predstavlja optimalno izbiro:

- kjer je zaželeno nižje krčenje betona in zmeren razvoj trdnosti s počasnim sproščanjem hidratacijske toplote,
- v zahtevnih industrijskih tlakih ter masivnih konstrukcijah, kjer je pomembno doseganje visokih trdnosti in trajnosti,
- za proizvodnjo nizkoogljicnih transportnih razredov do trdnostnega razreda C30/37 (v poletnem času do C35/45).

## TEHNOLOGIJA ZAJEMANJA OGLJIKOVEGA DIOKSIDA IN SHRANJEVANJA (CCS) OZIROMA UPORABA (CCU)

Tehnologija zajemanja in skladiščenja ogljikovega dioksida (CCS) je postopek, ki se načrtuje uporabljati za zajemanje CO<sub>2</sub> iz industrijskih virov, kot je cementna industrija, ter njegovo varno shranjevanje pod zemljo. Postopek CCS običajno vključuje naslednje korake: zajemanje, transport in skladiščenje. Zajemanje se izvaja s pomočjo posebnih naprav, ki ločijo CO<sub>2</sub> od izpustov dimnih plinov ali drugih virov. Zajeti CO<sub>2</sub> se nato stisne in transportira do primernih lokacij za skladiščenje.

Skladiščenje CO<sub>2</sub> se običajno izvaja pod zemljo v geoloških formacijah, kot so stari naftni in plinski rezervoarji ali porozne plasti kamnine. CO<sub>2</sub> se vbrizga pod zemljo, kjer ostane dolgo časa zadržan in varno shranjen.

Poleg tega se lahko zajeti CO<sub>2</sub> uporabi tudi za proizvodnjo sintetičnih goriv ali kot surovina za druge indu-

strijske procese, kar se imenuje zajemanje in uporaba ogljikovega dioksida (CCU). To lahko prispeva k zmanjšanju uporabe fosilnih goriv in zmanjšanju odvisnosti od naravnih virov.

Vendar pa se tako CCS kot CCU tehnologija soočata z izzivi, kot so visoki stroški, potrebna infrastruktura za shranjevanje in transport CO<sub>2</sub> ter druge tehnične omejitve. Kljub temu se ti pristopi štejejo za obetavne in potencialne rešitve za zmanjšanje ogljičnega odtisa cementne industrije.

## NAČRTI ZA RAZOGLIČENJE PROIZVODNJE CEMENTA V SLOVENIJI

V zadnjem delu prispevka so opisani načrti družbe Salonit Anhovo glede razogličjenja proizvodnje cementa v Sloveniji. Med njimi so postavitev sončnih elektrarn za proizvodnjo obnovljive energije, koriščenje odpadne toplote za pridobivanje električne energije, vgradnja najnovejših tehnologij čiščenja dimnih plinov, opustitev uporabe klasičnih fosilnih goriv, uvajanje alternativnih mineralnih surovin ter končni korak vpeljava tehnologij zajemanja in shranjevanja CO<sub>2</sub>.

Družba Salonit Anhovo na področju razogličjenja izvaja konkretne aktivnosti, kot so razvoj in študije izvedljivosti zajemanja CO<sub>2</sub>, preučevanje možnosti transporta CO<sub>2</sub> v regiji (Slovenija, Avstrija, Italija, Hrvaška), razvoj infrastrukture za shranjevanje CO<sub>2</sub> v Italiji in Hrvaški. Sodeluje tudi v projektu Severnojadranske čezmejne vodikove doline (North Adriatic Hydrogen Valley). Vključena pa je tudi v mednarodni razvojni projekt vzpostavitve vrednostne verige CCUS na področju severne Italije in v Grčiji.

Industrija cementa se zaveda, da bo potrebno intenzivno delo in prizadevanja za doseg klimatske nevtralnosti. Prihajajoči cikel razvoja bo izveden v skladu z načeli trajnostnega razvoja, pri čemer bodo v ospredju inovacije, raziskave ter uvajanje novih tehnologij za zmanjšanje ogljičnega odtisa cementne industrije.

Skupno prizadevanje industrije, vključno z raziskovalnimi institucijami, vladami in drugimi deležniki, je ključno za doseg ciljev razogličjenja in trajnostnega razvoja v cementni industriji. Le s celovitim pristopom, tehnološkimi inovacijami ter sodelovanjem lahko dosežemo dolgoročno ogljično nevtralno proizvodnjo cementa ter prispevamo k ohranjanju okolja in zmanjšanju vpliva na podnebne spremembe.



# Razvojni izzivi cementne industrije

Dr. Andrej Ipavec

Lipica, 24.5.2023

DRUŽBA SKUPINE **Alpacem**  
by Wietersdorfer

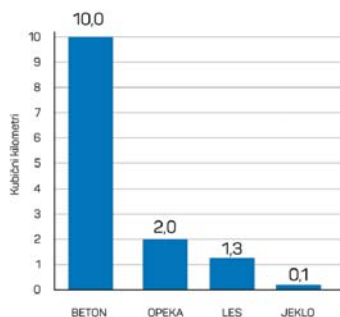
## Vsebina



- Cement kot strateški material prihodnosti
- Razvojne usmeritve panoge: končni cilj in srednjeročni ukrepi
- Projekcija rabe vrst cementov v prihodnosti
- Cementi vrste CEM II/C
- Ogljični odtis klinkerja in cementa – Status
- Evropska strategija razogličjenja cementne industrije
- Pot do ogljično nevtralne proizvodnje cementa v Sloveniji



## Cement - vseprisoten strateški material prihodnosti



| Material | Vloček energije pri proizvodnji (MJ/t) |
|----------|--|
| Beton    | 700                                    |
| Les      | 500                                    |
| Steklo   | 15 700                                 |
| Jeklo    | 21 000                                 |
| Aluminij | 164 000                                |
| Plastika | 80 000                                 |



DRUŽBA SKUPINE **Alpacem**

## Strateške razvojne usmeritve industrije

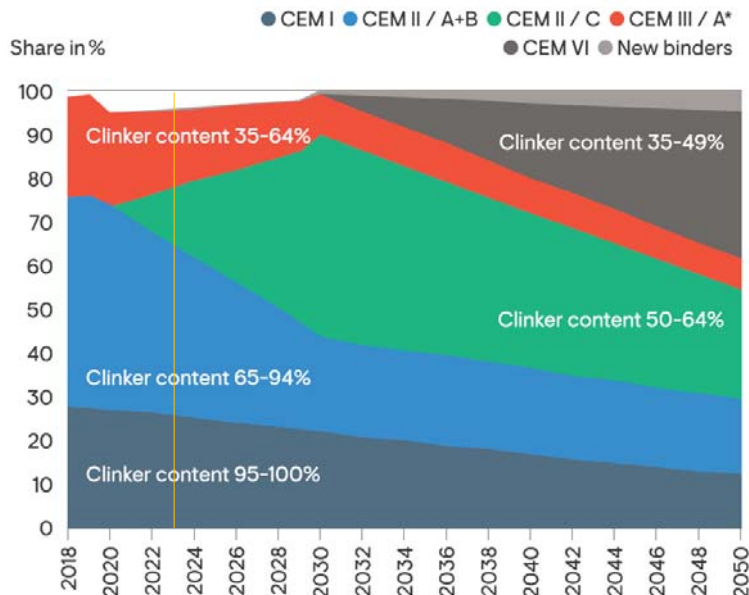


- Osrednji cilj: ogljično nevtralna proizvodnja cementa
- 4 stebri razvoja v srednjeročnem obdobju:
  - Opuščanje klasičnih fosilnih goriv
  - Uvajanje alternativnih surovinskih virov
  - Proizvodnja električne energije iz obnovljivih virov
  - Zmanjševanje povprečnega deleža klinkerja v cementu

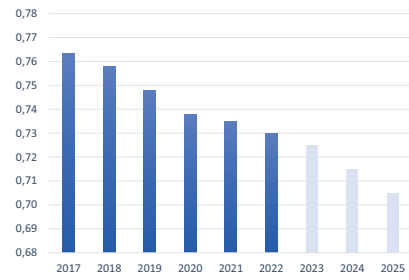


DRUŽBA SKUPINE **Alpacem**

## Projekcija rabe vrst cementov v prihodnosti



Povprečen delež klinkerja v cementih Salonita Anhovo



Vir: Združenje nemške cementne industrije.

DRUŽBA SKUPINE **Alpacem**

## SIST EN 197-5:2021 in dve novi vrsti cementov



- EN 197-5 uvaja nov tip portlandskega mešanega cementa CEM II/C-M in novo vrsto mešanih cementov CEM VI.
- Gre za nizkoogljične cemente z nižjimi deleži klinkerja.
- CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N predstavlja optimalno izbiro:
  - kjer je zaželeno nižje krčenje betona in zmeren razvoj trdnosti s počasnim sproščanjem hidratacijske toplote.
  - v zahtevnih industrijskih tlakah ter masivnih konstrukcijah, kjer je pomembno doseganje visokih trdnosti in trajnosti.
  - za proizvodnjo nizkoogljičnih betonov za širši spekter aplikacij.

### SIST EN 197-5: 2021

Table 1 — Portland-composite cement CEM II/C-M and Composite cement CEM VI

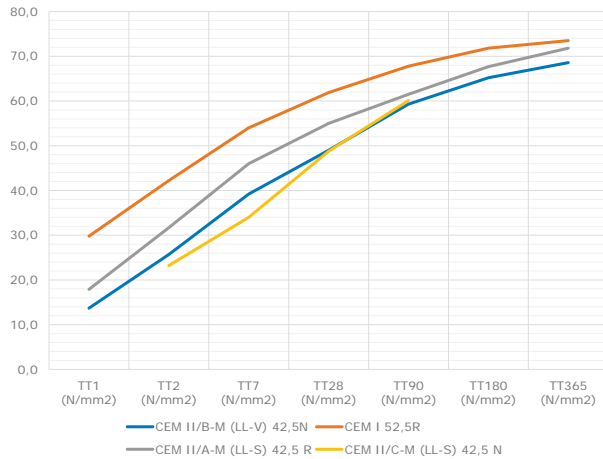
| Main types | Notation of the products (types of cement) |               | Composition (percentage by mass a) |                    |             |                   |                            |                   |                    |                |                 |      |      |                               |     |
|------------|--|---------------|------------------------------------|--------------------|-------------|-------------------|----------------------------|-------------------|--------------------|----------------|-----------------|------|------|-------------------------------|-----|
|            |  |               | Main constituents                  |                    |             |                   |                            |                   |                    |                |                 |      |      | Minor additional constituents |     |
|            |  |               | Clinker                            | Blast furnace slag | Silica fume | Pozzolana natural | Pozzolana natural calcined | Fly ash siliceous | Fly ash calcareous | Burnt shale    | Limestone       |      |      |                               |     |
| Type name  | Type notation                              | K             | S                                  | D <sup>b</sup>     | P           | Q                 | V                          | W                 | T                  | L <sup>c</sup> | LL <sup>c</sup> |      |      |                               |     |
| CEM II     | Portland-composite cement d                | CEM II/C-M    | 50-64                              | 36-50              |             |                   |                            |                   |                    |                |                 |      |      |                               | 0-5 |
| CEM VI     | Composite cement                           | CEM VI (S-F)  | 35-49                              | 31-59              | -           | 6-20              | -                          | -                 | -                  | -              | -               | -    | -    | 0-5                           |     |
|            |  | CEM VI (S-V)  | 35-49                              | 31-59              | -           | -                 | -                          | 6-20              | -                  | -              | -               | -    | -    | 0-5                           |     |
|            |  | CEM VI (S-L)  | 35-49                              | 31-59              | -           | -                 | -                          | -                 | -                  | -              | -               | 6-20 | -    | 0-5                           |     |
|            |  | CEM VI (S-LL) | 35-49                              | 31-59              | -           | -                 | -                          | -                 | -                  | -              | -               | -    | 6-20 | 0-5                           |     |

<sup>a</sup> The values in the table refer to the sum of the main and minor additional constituents.  
<sup>b</sup> In case of the use of silica fume, the proportion of silica fume is limited to 6-10 % by mass.  
<sup>c</sup> In case of the use of limestone, the proportion of limestone (sum of L, LL) is limited to 6-20 % by mass.  
<sup>d</sup> The number of main constituents other than clinker is limited to two and these main constituents shall be declared by designation of the cement (for example, see Clause 6).

## Lastnosti CEM II/C-M (S-LL) 42,5N



Tlačne trdnosti na standardni recepturi betona  
(v/c = 0.5, 360 kg/m<sup>3</sup>)

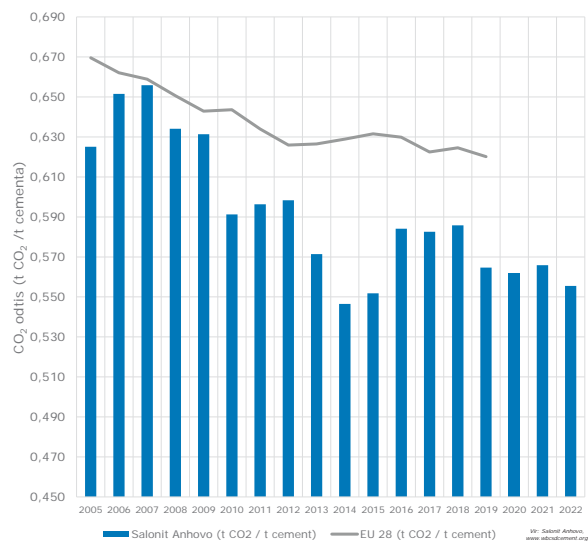
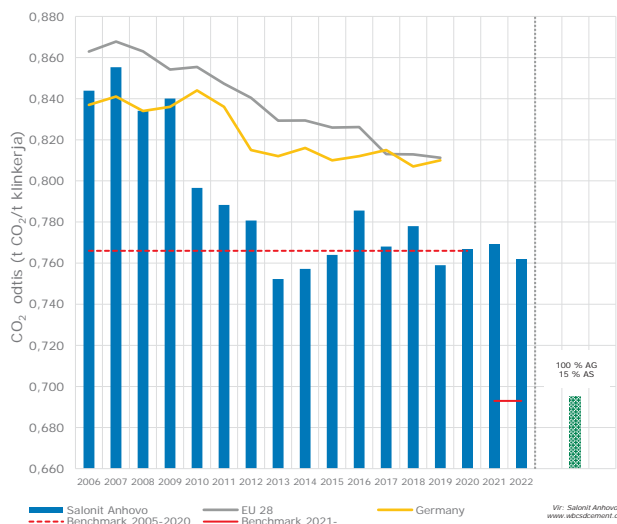


- **Nizko krčenje betona:** krčenje je nižje neposredno zaradi nižje vsebnosti klinkerja in višje vsebnosti mineralnih dodatkov (predvsem žilindre) in posredno zaradi nižje potrebe cementa po vodi
- **Zmeren razvoj tlačnih trdnosti:** zmeren razvoj pomeni kontroliran razvoj hidratacijskih produktov, s tem manjša možnost pojava razpok in posledično večja trajnost konstrukcij. Zaželjen povsod tam, kjer niso eksplicitno zahtevane visoke zgodnje trdnosti zaradi razopaževanje;
- **Nizko sproščanje hidratacijske toplote:** cement je primeren za izvedbo tudi masivnejših sten, saj v procesu hidratacije sprošča manj toplote in posledično prihaja do manjših notranjih napetosti v betonu.
- **Proizvodnja nizkoogljčnih betonov:** Njegov ogljični odtis znaša približno 410 kgCO<sub>2</sub>/t (povprečje EU: 674 kgCO<sub>2</sub>/t) in je najnižji med proizvodi SA (z izjemo CEM III) in med najnižjimi na trgu. Kljub temu omogoča proizvodnjo praktično vseh betonov do trdnostnega razred C35/45 v poletnem času. (Pozimi za razred C30/37 navzgor priporočamo Special)
- **Dobra obdelavnost transportnih betonov:** zaradi nizke vsebnosti klinkerja je proces hidratacije v začetnih fazah (prvih 2-3 urah) manj intenziven, s čimer je izguba konsistence betonov nižja. Na dobro obdelavnost vpliva tudi višja vsebnost mineralnih dodatkov.
- **Boj ugodna struktura por:** zaradi visoke vsebnosti mineralnih dodatkov ima strjena cementna pasta v betonu nižjo kapilarno poroznost in s tem večjo odpornost proti prodiranju škodljivih snovi iz okolja.
- **Manjša eflorescenca in siganje** (primeri drenaž) kot posledica manjše vsebnosti apna v cementnem kamnu

23.05.2023, Stran 7

DRUŽBA SKUPINE **Alpacem**

## Ogljični odtis\* klinkerja in cementa – Status



\* Prikazan je ogljični odtis na osnovi direktnih emisij CO<sub>2</sub> iz proizvodnje cementnega klinkerja.

DRUŽBA SKUPINE **Alpacem**

## Pot v ogljično nevtralnost

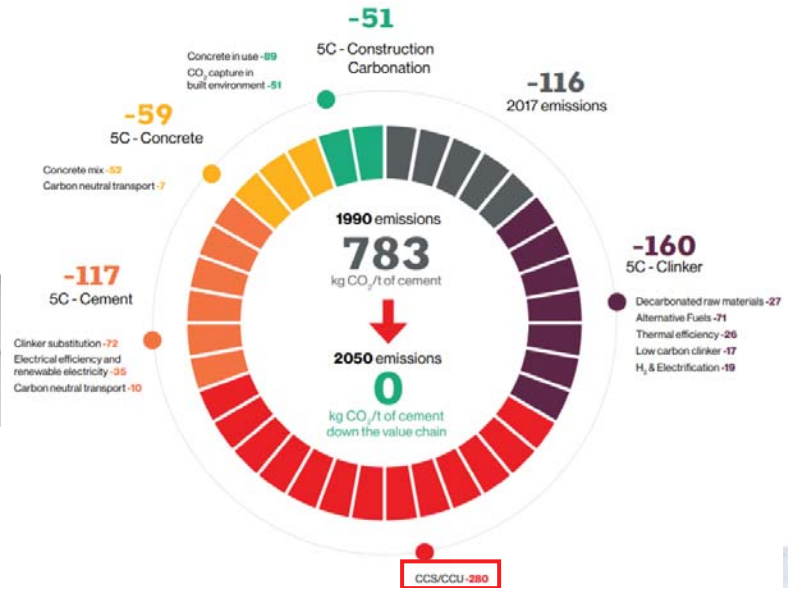


### Cementing the European Green Deal

REACHING CLIMATE NEUTRALITY ALONG THE CEMENT AND CONCRETE VALUE CHAIN BY 2050



CLINKER  
CEMENT  
CONCRETE  
CONSTRUCTION  
CARBONATION



## Koncept ogljično nevtralne proizvodnje cementsa





## Pot do oglično nevtralne proizvodnje cementa z minimalnim vplivom na okolje



AG: alternativna goriva, AS: alternativne surovine, t/l: ton na leto, CCUS: Zajem in pretvorba oz. hranjenje CO<sub>2</sub>

DRUŽBA SKUPINE **Alpacem**

## Glavne aktivnosti na področju CCUS



- Razvoj in študije izvedljivosti zajemanja CO<sub>2</sub>.
- Možnosti transporta CO<sub>2</sub> v regiji (SLO, AUT, ITA, HR).
- Infrastruktura za shranjevanje CO<sub>2</sub> (ITA, HR).
- Vodikov ekosistem (S Jadranska vodikova dolina).
- CCUS vrednostna veriga (EU projekt, ITA, GR).



Načrtovanje „tovarne“ za zajem CO<sub>2</sub>



Opcije skladiščenja CO<sub>2</sub>

DRUŽBA SKUPINE **Alpacem**

# Trajnostni razvoj



KATARINA CLEMENTE, VEDRAN BEKRIĆ,  
MATIC PEVEC, MILOŠ IŠLJAMOVIĆ

TKK

# Soodvisnost konsistence, učinkovitosti superplastifikatorja in kakovosti agregata v betonu – primeri iz prakse



PREDAVATELJICA  
KATARINA CLEMENTE

## POVZETEK

Bistvena lastnost svežega betona je njegova konsistenca, ki omogoča njegovo črpanje, vgradnjo in kompaktiranje. Z izborom superplastifikatorja vplivamo na te lastnosti. Superplastifikatorji na osnovi polikarboksilatnih estrov učinkovito dispergirajo tako cementna zrna, kot tudi fine delce iz agregata

## ABSTRACT

*The essential property of fresh concrete is its consistency, which enables its pumping, casting and compaction. These properties can be influenced by the selection of superplasticizer. Superplasticizers based on polycarboxylate esters effectively disperse both cement grains and fine particles from*

in polnila, zato je izbor agregata (zlasti finega agregata) in polnila zelo pomemben. Kljub robustnosti superplastifikatorjev, ti ne morejo kompenzirati vseh nihanj v drugih materialih, zato je za konstantno proizvodnjo betona pomembno tudi zagotavljanje stalnosti deleža finih delcev v agregatu.

**KLJUČNE BESEDE:**

agregat, fini delci, superplastifikator, konsistenca

aggregate and filler. Thus the selection of aggregate (especially fine aggregate) and filler is very important. Despite the robustness of superplasticizers, they cannot compensate for all the fluctuations in other materials, so ensuring a constant proportion of fine particles in the aggregate is also important for constant concrete production.

**KEYWORDS:**

aggregate, fine particles, superplasticizer, consistency

**UVOD**

Pri proizvodnji betona ne glede na to, za katero vrsto betona gre, pogosto prihaja do nihanja obdelavnosti betona, kar je posledica tega, da za pripravo betona uporabljamo naravne materiale, katerih lastnosti niso in ne morejo biti konstantne. V zadnjih desetletjih se za lažjo vgradnjo svežega betona in doseganje zahtevanih mehanskih lastnosti uporabljajo zelo učinkoviti superplastifikatorji, ki prav zaradi svoje učinkovitosti, ta nihanja naredijo še bolj očitna. To bomo pokazali na nekaterih primerih iz prakse.

**BETON**

Strjen beton sestavlja najmanj dve osnovni komponenti:

- kamen, ki ga običajno poznamo pod imenom agregat (fini in grobi agregat), in
- cementna matrica, ki obdaja in povezuje posamezna zrna agregata. Cementno matrico v svežem stanju imenujemo cementna pasta (cement in voda), v strjenem stanju pa cementni kamen.

Da bi dosegli želene oz. zahtevane lastnosti svežega in strjenega betona, osnovnim komponentam dodajamo še kemijske in mineralne dodatke, polnila ter polimerna in jeklena vlakna. Ključna faza za proizvodnjo kvalitetnega betona je priprava recepture betona, t.j. določitev deležev komponent, kjer se pogosto srečamo s paradoksalno situacijo, saj so želene lastnosti za sveži beton v nasprotju z zahtevami za strjen beton. [1]

**KEMIJSKI DODATKI ZA BETON**

Kemijski dodatki za beton so proizvodi, ki jih dodajamo sveži betonski mešanici tik pred oz. med mešanjem. To so običajno tekočine, ki jih dodajamo v majhnih količinah (do 5 % na maso cementa) z namenom izboljšanja lastnosti betonske mešanice v svežem ali/in strjenem stanju. Dozajico kemijskih dodatkov običajno podajamo v masnih % glede na cement.

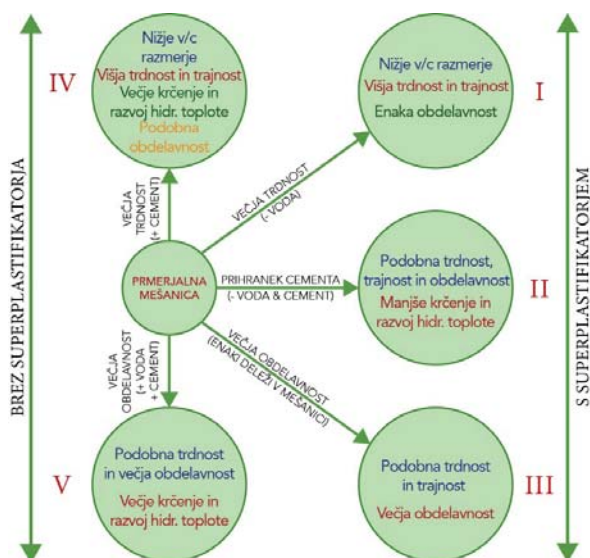
Standard SIST EN 934-2 pozna 12 skupin kemijskih dodatkov, od katerih so plastifikatorji in superplastifikatorji daleč najbolj uporabljeni kemijski dodatki.

**Plastifikatorji in superplastifikatorji**

Skupini plastifikatorjev (P) in superplastifikatorjev (SP) predstavljata več kot 50 % proizvodnje vseh kemijskih dodatkov za beton, ne le v TKK, temveč tudi globalno. [2] Če pa ocenimo delež znotraj teh dveh skupin, je proizvodnja P : SP približno 40 : 60. V zadnjih nekaj letih je proizvodnja SP na osnovi polikarboksilatnih estrov (PCE) skoraj popolnoma izpodrinila SP na osnovi polinaftalen sulfonatov (NPS) in melamin sulfonatov (MS), medtem, ko proizvodnja P ostaja praktično konstantna.

Začetek uporabe SP predstavlja najpomembnejši napredek v tehnologiji betona v zadnjih 40 letih. [1]

Številne izboljšave, ki jih nudi uporaba SP shematično prikazuje slika 1.



Slika 1: Shematični diagram učinkovitosti SP na sveži in strjeni beton [1]



Ko SP uporabimo kot reduktor vode pri dani obdelavnosti, se izboljšajo lastnosti strjenega betona: višje tlačne trdnosti, nižja kapilarna poroznost in permeabilnost, torej boljša trajnost, kar je vse posledica nižjega v/c razmerja.

Če ob uporabi SP znižamo tako vsebnost vode, kot tudi cementa, bodo karakteristike svežega in strjenega betona ostale na ravni referenčnega betona: SP deluje kot reduktor cementa, zniža se hidratacijska toplota, kar je pomembno pri masivnih betonih in v klimatskih razmerah z visokimi temperaturami. V tem primeru dosežemo tudi manjše krčenje zaradi višjega razmerja agregat/cement.

Če dodamo SP brez sprememb v količini vode in cementa, pa dosežemo močno izboljšanje obdelavnosti sveže betonske mešanice, kar je pomembno za lažjo vgradnjo, boljše zalivanje armature in opažev.

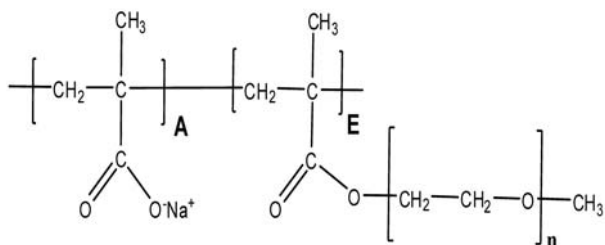
Plastifikatorji so naravni polimeri, medtem ko so superplastifikatorji industrijsko pripravljene polimeri. Zlasti SP na osnovi PCE so izjemno učinkoviti.

Plastifikatorji in superplastifikatorji (tako na osnovi PNS, MS ali PCE) so površinsko aktivne snovi. Preko glavne verige (negativno nabitih funkcionalnih skupin) se vežejo na pozitivno nabite delce (cement in fini delci) in jih dispergirajo [2]:

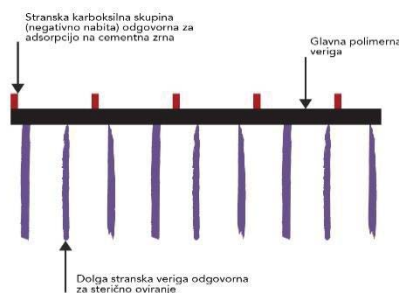
- plastifikatorji preprečujejo združevanje delcev predvsem zaradi svojega negativnega naboja
- superplastifikatorji na osnovi PNS in MS so učinkovitejši zaradi dvojnega delovanja: imajo negativen naboj in stranske verige, ki ovirajo združevanje (sterično oviranje)
- superplastifikatorji na osnovi PCE so praktično nevtralni, združevanje delcev preprečujejo s steričnim oviranjem zaradi dolgih stranskih verig.

### Superplastifikatorji na osnovi PCE

PCE je skupno ime za široko skupino superplastifikatorjev – polimernih molekul z glavno verigo na osnovi poliakrilatov ali polimetakrilatov in stranskimi verigami na osnovi etilenoksida ali propilenoksida. [2]



Slika 2: Kemijska struktura formula superplastifikatorja na osnovi PCE [2]

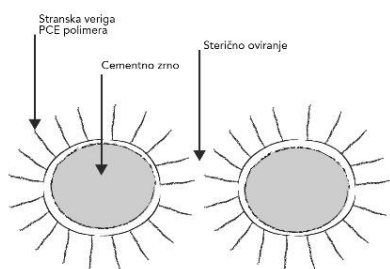


Slika 3: Shematski prikaz strukture polimerne molekule superplastifikatorja [1]

Molekula PCE je kompleksna – t. i. arhitektura molekule je lahko zelo raznolika. Parametri polimera (**A**, **E** in **n**) vplivajo na hitrost adsorpcije, na sposobnost redukcije vode in na sposobnost zadrževanja konsistence in tako določajo namen uporabe superplastifikatorja. [2]

Sposobnost dispergiranja delcev lahko spremljamo z merjenjem zeta potenciala v suspenziji, hitrost adsorpcije pa s t. i. TOC analizatorjem, kar je izredno zahtevno, zato jo pogosto ocenimo tako, da določimo čas, ko malta/pasta doseže največjo konsistenco. [1, 2]

Plastifikatorji in superplastifikatorji v samo reakcijo hidratacije ne vstopajo. Nanjo vplivajo z omejevanjem transportnih pojavov in tako zavlačujejo čas začetka in konca vezanja [2] – pri tem imajo pomemben vpliv kemijska struktura PCE ter njegova koncentracija in sposobnost redukcije vode.



Slika 4: Sposobnost dispergiranja cementnih delcev s steričnim oviranjem [1]



Slika 5: Lastnosti PCE določajo njegov namen uporabe [3]

### Redukcija vode in vpliv na konsistenco betona

Obdelavnost betona je lastnost, ki opisuje sposobnost svežega betona, da je mobilni in ga lahko kompaktiramo. Mobilnost omogoča njegov transport, črpanje, vgrajevanje in oblivanje jeklene armature v opažu, sposobnost kompaktiranja pa je pomembna, da lahko izženemo ujete žepe zraka ob armaturi in tako omogočimo močno vezavo betona in armature.

Optimalna obdelavnost svežega betona je torej ena od najpomembnejših karakteristik betona in za transportni beton je izguba obdelavnosti največji problem.

V praksi z uporabo P zmanjšamo delež vode za okoli 10 %, s superplastifikatorji na osnovi PCE pa za 20 % ali več in to vpliva na reološke lastnosti sveže betonske mešanice. Z večanjem redukcije vode se poslabšuje stabilnost sistema in proti pričakovanjem se slabšata črpnost in vgradljivost betona – ta postane "težak" in lepljiv. Dozacija PCE, ki jo uporabimo za doseganje določene redukcije vode, močno vpliva na ostale lastnosti. Načeloma velja: boljše kot je sposobnost redukcije vode in manjša kot je dozacija PCE, slabše bo zadrževanje konsistence, slabša bo robustnost (t.j. zmožnost dodatka, da kompenzira spremembe v cementu, agregatu in v/c razmerju) in primernost za uporabo pri visokih temperaturah, ali za dolge Transporte [3] in obratno.

Glede na obliko polimerne molekule PCE, ti torej lahko učinkujejo kot izredno učinkoviti (trenutni) reduktorji vode ali kot izjemni zadrževalci konsistence. Kemijski dodatki, ki so dostopni na trgu, so formulirani na tak način, da se poskuša optimizirati lastnosti superplastifikatorja za določen namen uporabe.

## CEMENT IN VODA

Cement in voda sta bistveni sestavini betona, saj med njima poteka hidratacija, ki omogoča, da se cementna pasta strdi in nastane cementni kamen.

### Cement

Skladno z zahtevami standarda SIST EN 206: Beton – Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost, se v slovenskem prostoru za proizvodnjo betona uporabljajo običajni cementi (SIST EN 197-1), čeprav proizvajalci cementa, predvsem zaradi okoljevarstvenih razlogov, pospešeno razvijajo mešane/kompozitne portlandske cemente, ki bodo/so skladni s SIST EN 197-5.

To pomeni, da bodo v cementih naraščali deleži inertnih polnil in mineralnih dodatkov s pucolanskimi lastnostmi, posledično bo interakcija med cementnimi delci in PCE drugačna. Žal pa razvoj novih cementov poteka ločeno od industrije kemijskih dodatkov, čeprav je uporaba cementa v betonu z njimi neobhodno povezana. [3]

### Voda

Bistvo pri pripravi betona je uporaba ustrezne količine vode, saj s tem vplivamo na:

- konsistenco svežega betona in
- v/c razmerje ter s tem na tlačno trdnost in trajnost vgrajenega betona.

Standard SIST EN 206 določa trdnostni razred in maksimalno v/c razmerje za posamezne stopnje izpostavljenosti. Ob upoštevanju Lysejevega pravila in Abramsovega zakona, naj bi bilo mogoče izračunati potrebno količino zamesne vode, ki bi hkrati zadovoljila:

- zahteve gradbišča po ustrezni obdelavnosti betona in
- zahteve projektanta po ustrezni tlačni trdnosti in trajnosti. [1]

## AGREGAT IN FINI DELCI

Agregat zavzema približno dve tretjini volumna betona. Daje mu volumsko stabilnost, kakovost agregata pa vpliva tudi na njegovo trajnost.

Najbolj očitna lastnost agregata je njegova zrnavost (fini agregat, grobi agregat). Izvor agregata je, med drugim, povezan z obliko zrn – naravni agregat ima gladka okroglasta zrna, drobljenec pa ima zrna nepravilnih oblik z grobo površino. Pomembna lastnost agregata je tudi njegova poroznost, saj vpliva na vpijanje vode, posledično pa tudi na obdelavnost svežega betona, trdnost in trajnost.

Agregat je običajno kemijsko inerten in med hidratacijo ne vstopa v nobeno izmed reakcij.

Agregat, sprejemljiv za uporabo v betonu ne sme vsebovati kloridov, sulfatov, alkalno reaktivnega kremenca, gline, organskih substanc in poroznih mineralov (npr. skrilavec). Za betone, ki bodo izpostavljeni zmrzovanju uporabimo zmrzlinško odporen agregat.

### Sestava agregata

Primerna sestava agregata omogoča, da drobnejši agregat zapolni prazna mesta med večjimi zrni. Na ta način se formira skelet agregata s čim manj prazninami, ki jih zapolni cementna pasta, ki po strditvi spremeni agregat iz skupka prostih delcev v monoliten material – beton.

Maksimalno gostoto agregata v betonu dobimo, če sledimo Fullerjevi enačbi (idealna sestava agregata). Ker pa takih agregatov v praksi praktično ni, se poslužujemo kombiniranja agregatov z različnimi velikostmi delcev (frakcijami), da se približamo idealni krivulji.

Tabela 1: Razredi glede na maksimalni delež finih delcev (povzeto po Tabeli 8 standarda SIST EN 12620, za fini agregat)

| Agregat      | Sito 0,063 mm<br>(delež materiala, ki gre skozi sito v %) | Razred<br>f  |
|--------------|---|--------------|
| Fini agregat | ≤ 3   | f3           |
|              | ≤ 4   | f4           |
|              | ≤ 5   | f5           |
|              | ≤ 6   | f6           |
|              | ≤ 7   | f7           |
|              | ≤ 10  | f10          |
|              | ≤ 16  | f16          |
|              | ≤ 22  | f22          |
|              | > 22  | fDeklarirano |
| Ni zahteve   |   | fNR          |

Kakovost finih delcev v finem in all-in agregatu se oceni in deklarira na sledeč način:

- Če delež finih delcev v drobnem agregatu ali all-in agregatu velikosti 0/8 ni večji od 3 %, nadaljnje testiranje ni potrebno
- Če je ta delež večji, je treba ugotoviti, ali so ti fini delci za beton neškodljivi, tako da naredimo analizo ekvivalenta peska (SE)

Tabela 2: Razredi vrednosti minimalnega ekvivalenta peska (povzeto po Tabeli 9 standarda SIST EN 12620)

| Ekvivalent peska | Razred (0/2 mm)<br>SE10    | Razred (0/4 mm)<br>SE4    |
|------------------|----------------------------|---------------------------|
| ≥ 65             | SE10 <sub>65Declared</sub> | SE4 <sub>65Declared</sub> |
| ≥ 60             | SE10 <sub>60</sub>         | SE4 <sub>60</sub>         |
| ≥ 55             | SE10 <sub>55</sub>         | SE4 <sub>55</sub>         |
| ≥ 50             | SE10 <sub>50</sub>         | SE4 <sub>50</sub>         |
| ≥ 45             | SE10 <sub>45</sub>         | SE4 <sub>45</sub>         |
| ≥ 40             | SE10 <sub>40</sub>         | SE4 <sub>40</sub>         |
| ≥ 35             | SE10 <sub>35</sub>         | SE4 <sub>35</sub>         |
| ≥ 30             | SE10 <sub>30</sub>         | SE4 <sub>30</sub>         |
| < 30             | SE10 <sub>Declared</sub>   | SE4 <sub>Declared</sub>   |
| Ni zahteve       | SE10 <sub>NR</sub>         | SE4 <sub>NR</sub>         |

Večje kot je maksimalno zrno uporabljenega agregata, manjša bo potreba po vodi za določeno obdelavnost. To pomeni, da se v primeru zmanjšanja maksimalnega zrna agregata potreba po vodi poveča, če želimo ohraniti enak posed. In še: zato, da zadržimo konstantno tlačno trdnost, moramo proporcionalno povečati dozo cementa.

Če pa je maksimalno zrno konstantno, lahko na potrebo po vodi vpliva sprememba v razporeditvi delcev (sejalna analiza).

### Fini delci

Del agregata, ki gre skozi sito velikosti 0,063 mm imenujemo fini delci. V tem članku bomo pokazali, da je delež finih delcev v agregatu in njihov značaj zelo pomemben za obnašanje svežega betona.

Fini delci iz agregata kažejo podobno interakcijo s PCE kot cement. To smo zelo enostavno preverili z interno metodo, kjer merimo razlez vodne suspenzije. Pripravili smo suspenzijo iz kamene moke (KM) in vode (V) v razmerju  $V : KM_2 = 0,3$ . Tako pripravljene suspenziji smo dodali superplastifikator na osnovi PCE v dozaciji 0,4 %. Razleza obeh vodnih suspenzij prikazuje slika 6. Vidimo, da je razlez suspenzije samo z vodo približno 155 mm, razlez z dodatkom superplastifikatorja pa približno 370 mm (na meji segregacije).



Slika 6: Razlez suspenzije kamene moke v vodi brez in z dodatkom PCE pri enaki količini vode

Kakovost agregata preverjamo s sejanjem (suho in mokro sejanje), izračunom modula zrnivosti, določanjem vpijanja, ekvivalenta peska in vrednosti metilen modrega. S temi analizami razvrstimo agregat v razrede (Tabele 1, 2, 3, 4).

Delež finih delcev je največji v finem agregatu granulacije 0/4, zato je za doseganje ustrezne konsistence in v/c razmerja v betonu ta frakcija agregata najpomembnejša. Ko se delež finih delcev v agregatu poveča, se s tem poveča razpoložljiva aktivna površina – dozirana količina PCE je premajhna, da bi lahko učinkovito dispergirala vse delce (cement in fine delce iz agregata). To pomeni manjšo redukcijo vode v svežem betonu in hkrati hitrejšo izgubo obdelavnosti. Če torej v primeru, ko imamo delež finih delcev povečan, želimo obdržati enake parametre svežega betona (posed, v/c razmerje, čas obdelavnosti), moramo ustrezno dvigniti dozacijo PCE.

Če je povečanje deleža finih delcev znatno, lahko ob močno povečani dozaciji PCE pride do občutnih reoloških sprememb svežega betona – beton postane lepljiv, težko vgradljiv. V tem primeru je treba dvigniti količino zamesne vode in hkrati tudi dozo cementa.



Tabela 3: Razredi maksimalne vrednosti metilen-modrega (povzeto po Tabeli 10 standarda SIST EN 12620)

| Agregat      | Vrednost metilen-modrega (MB) | Razred MB               |                        |
|--------------|-------------------------------|-------------------------|------------------------|
| Fini agregat | MB vrednost g/kg              | MB <sub>0/0,125</sub>   | MB <sub>0/2</sub>      |
|              | ≤ 1                           | MB <sub>F1</sub>        | MB <sub>1</sub>        |
|              | ≤ 1,5                         | MB <sub>F1,5</sub>      | MB <sub>1,5</sub>      |
|              | ≤ 2                           | MB <sub>F2</sub>        | MB <sub>2</sub>        |
|              | ≤ 2,5                         | MB <sub>F2,5</sub>      | MB <sub>2,5</sub>      |
|              | ≤ 3                           | MB <sub>F3</sub>        | MB <sub>3</sub>        |
|              | > 3                           | MB <sub>FDeclared</sub> | MB <sub>Declared</sub> |
|              | Ni zahteve                    | MB <sub>FNR</sub>       | MB <sub>NR</sub>       |

\*Opomba: MBA merimo kot MB frakcije 0/2 mm, podajamo kot 0/Dmm

Tabela 4: Razred maksimalnih vrednosti za vodovpojnost (SIST EN 1097-6)

| Vodovpojnost (utežni %)  | Razred WA <sub>24</sub> |
|--|-------------------------|
| ≤ 1  | WA <sub>24</sub> 1      |
| ≤ 2  | WA <sub>24</sub> 2      |
| Opomba: preiskava ni uporabna za plavžno žlindro in porozni bazalt |                         |

Nasprotno, v primerih, ko delež finih delcev zaniha navzdol, primanjkuje površine, kamor bi se molekule lahko adsorbirale, dozacija PCE na količino cementa je velika, posledično prihaja do prevelikih posedov ali celo segregacije betona.

## PRIMERI IZ PRAKSE

### Primer 1

Transportni beton z oznako: C30/37 XC4 XD2 XF4 D<sub>max</sub>16 S4

Receptura betona

|                                 |                             |
|---------------------------------|-----------------------------|
| <b>Cement CEM II/A-S 42,5 N</b> | <b>400 kg/m<sup>3</sup></b> |
| SP PCE HP266 (0,5 %)            | 2 kg/m <sup>3</sup>         |
| A Eta S06 (0,08 %)              | 0,32 kg/m <sup>3</sup>      |
| Voda (v/c <sub>ef</sub> = 0,45) | 195 kg/m <sup>3</sup>       |
| Agregat 0/4 (52 %)              | 906 kg/m <sup>3</sup>       |
| Agregat 4/8 (9 %)               | 155 kg/m <sup>3</sup>       |
| Agregat 8/16 (39 %)             | 677 kg/m <sup>3</sup>       |

Analiza finih delcev in ekvivalenta peska v agregatu frakcije 0/4

Datum: 13. 09. 2022

f = 12,6 %

SE = 83,1 %

Datum: 20. 09. 2022

f = 19,3 %

SE = 75,5 %

Preiskave sveže betonske mešanice, pripravljene po recepturi:

| Datum                  | 13. 09. 2022           | 20. 09. 2022           |
|------------------------|------------------------|------------------------|
| Posed, po 10 min       | 210 mm                 | 180 mm                 |
| Posed, po 30 min       | 200 mm                 | 140 mm                 |
| Posed, po 60 min       | 180 mm                 | -                      |
| T (betona)             | 21 °C                  | 20 °C                  |
| v/c <sub>ef</sub>      | 0,44                   | 0,46                   |
| Gostota svežega betona | 2332 kg/m <sup>3</sup> | 2402 kg/m <sup>3</sup> |

Začetna konsistenca v obeh primerih ni vprašljiva, saj je znotraj konsistenčnega razreda S4, kritičen je padec konsistence (celo pri nekoliko večjem v/c razmerju) in doseganje ustrezne količine vsebnosti zraka. Delež finih delcev v finem agregatu se je povečal za 6,7 %. Če preračunamo na 1 m<sup>3</sup> betona, pa je vsebnost finih delcev večja za 70 kg, kar je veliko.

Za trenutno rešitev problema je betonarna dvignila dozacijo obeh dodatkov (PCE in A). V nadaljnjih korakih pa je bila konstantnost deleža finih delcev v agregatu zagotovljena z odpraševanjem ter kasneje s pridobivanjem agregata v drugem delu kamnoloma.

### Primer 2

Transportni beton z oznako: C30/37 XC4 XD2 XS1 XF3 XA1 D<sub>max</sub>16 S4

Receptura betona

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| <b>Cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R</b> | <b>360 kg/m<sup>3</sup></b> |
| SP PCE K1 (0,6 %)                      | 2,16 kg/m <sup>3</sup>      |
| Voda (v/c <sub>ef</sub> = 0,48)        | 188 kg/m <sup>3</sup>       |
| Agregat 0/4 (59 %)                     | 1076 kg/m <sup>3</sup>      |
| Agregat 4/8 (4 %)                      | 73 kg/m <sup>3</sup>        |
| Agregat 8/16 (37 %)                    | 672 kg/m <sup>3</sup>       |

Razlez cementne paste s časom

| v/c = 0,45<br>Dozacija dodatka = 0,4 % |        |
|--|--------|
| Čas                                    | Razlez |
| 3 min                                  | 150 mm |
| 30 min                                 | 217 mm |
| 60 min                                 | 235 mm |
| 90 min                                 | 235 mm |

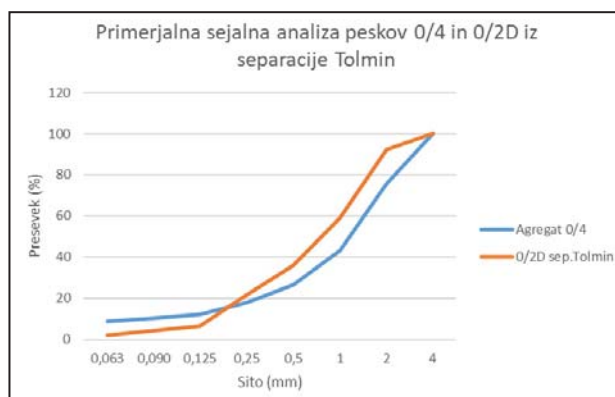
Težava s katero so se srečevali na betonarni sta bili 2:

Nedoseganje zahtevanega v/c razmerja, zato so dvigovali dozacijo PCE. Ob tem se je pojavil drug problem, in sicer naraščanje konsistence s časom.

Z enostavno metodo razleza na cementni pasti smo ugotovili, da superplastifikator SP PCE K1 po vsej verjetnosti spada med dodatke, ki se počasneje adsorbirajo. Pri sejalni analizi agregata frakcije 0/4 smo ugotovili, da je finih delcev precej (8,7 %). Ob tej kombinaciji je adsorpcija PCE prepočasna zato hitro dispergiranje finih delcev, kar bi zagotovilo ustrezen začetni posed, ni možno.

Sejalna analiza frakcije 0/4

| Velikost sita (mm) | Presevek (%)       |  |
|--------------------|--------------------|--|
|                    | Drobni agregat 0/4 | Drobni agregat 0/2D, separacija Tolmin |
| 4                  | 100                | 100                                    |
| 2                  | 75,8               | 92,1                                   |
| 1                  | 43,2               | 58,9                                   |
| 0,5                | 26,7               | 35,8                                   |
| 0,25               | 17,8               | 21,5                                   |
| 0,125              | 12,3               | 6,6                                    |
| 0,090              | 10,2               | 4,3                                    |
| 0,063              | 8,7                | 2,0                                    |



Predlagali smo zamenjavo tipa PCE z bolj koncentriranim superplastifikatorjem, ki ima hitrejšo sposobnost adsorpcije na cement in fine delce.

Preiskave sveže in strjene betonske mešanice brez sprememb v sestavi agregata in doze cementsa:

| Datum                  | 27. 10. 2022           | 27. 10. 2022           |
|------------------------|------------------------|------------------------|
| SP PCE K1              | 0,6 %                  | -                      |
| SP PCE HP206SD         | -                      | 0,6 %                  |
| Posed, po 10 min       | 225 mm                 | 240 mm                 |
| $v/c_{ef}$             | 0,51                   | 0,46                   |
| Gostota svežega betona | 2378 kg/m <sup>3</sup> | 2410 kg/m <sup>3</sup> |

Preliminarne preiskave so pokazale, da ob nižjem  $v/c$  razmerju dosežemo celo večji posed. Možna je še precejšnja optimizacija recepture.

### Primer 3

Transportni beton z oznako: MB 40/3, posed 200 mm

Receptura betona

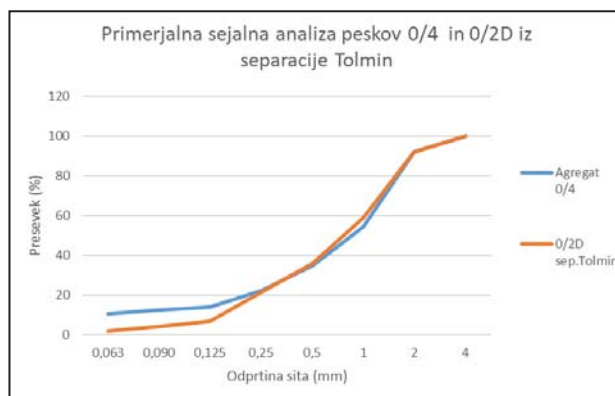
|                                 |                             |
|---------------------------------|-----------------------------|
| <b>Cement CEM II/A-S 42,5 R</b> | <b>410 kg/m<sup>3</sup></b> |
| SP PCE HP185 (0,8 %)            | 3,3 kg/m <sup>3</sup>       |
| Voda ( $v/c_{ef} = 0,45$ )      | 185 kg/m <sup>3</sup>       |
| Agregat 0/4 (45 %)              | 765 kg/m <sup>3</sup>       |
| Agregat 4/8 (15 %)              | 255 kg/m <sup>3</sup>       |
| Agregat 8/16 (40 %)             | 680 kg/m <sup>3</sup>       |

Kupec je reklamiral 2 kontejnerja od 5, ki jih je prejel pri dobavi. Vsi dobavljeni kontejnerji so bili označeni z enako številko proizvodnje šarže.

Beton ne dosega ustrezne obdelavnosti,  $v/c$  razmerja in tlačnih trdnosti, čeprav se navedeno recepturo betona uporablja že dlje časa.

Sejalna analiza frakcije 0/4

| Velikost sita (mm) | Presevek (%)       |  |
|--------------------|--------------------|--|
|                    | Drobni agregat 0/4 | Drobni agregat 0/2D, separacija Tolmin |
| 4                  | 100                | 100                                    |
| 2                  | 92,3               | 92,1                                   |
| 1                  | 54,3               | 58,9                                   |
| 0,5                | 34,9               | 35,8                                   |
| 0,25               | 22,4               | 21,5                                   |
| 0,125              | 14,4               | 6,6                                    |
| 0,090              | 12,4               | 4,3                                    |
| 0,063              | 10,5               | 2,0                                    |



Vrednost metilen modro: MB = 2,8

Vpijanje agregata:  $WA_{24} = 2 \%$

Primer je iz Srbije, zato smo imeli za analizo na razpolago samo fini agregat frakcije 0/4. V preiskave smo zato vključili cement Salanit Anhovo in grobi agregat Soča iz separacije Tolmin.

Žal podatkov za agregat, ki ga je kupec uporabljal do tega trenutka, nismo mogli pridobiti. Sicer pa je iz preiskav lepo vidno, da že samo zamenjava "problematičnega" agregata frakcije 0/4, katerega sejalna analiza kaže dokaj velik delež finih delcev, poleg tega pa tudi visoko vrednost metilen-modrega in visoko vpijanje vode, ugodno vpliva na vse lastnosti svežega betona. Ker na ta način lahko ustrezno znižamo tudi v/c faktor, ni težav z doseganjem zahtevanih tlačnih trdnosti.

Rezultati pokažejo tudi, da SP na osnovi PNS ni ustrezen rešitev, saj ne more dispergirati tako velike količine finih delcev in prisotnih nečistoč. V preiskave smo ga vključili na željo kupca.

Pokaže pa se še ena ugodna rešitev, in sicer uporaba t. i. inhibitorja delovanja gline v dozaciji 0,2 % skupaj s PCE, ki ga kupec uporablja tudi sicer.

Za rešitev težave se je kupec odločil za mešanje agregata drobljenega in naravnega agregata frakcije 0/4 v razmerju 50 : 50 %.

| <b>Cement CEM II/A-M(S-LL)<br/>45,2 R, Anhovo</b> | <b>410 kg/m<sup>3</sup></b>  | <b>410 kg/m<sup>3</sup></b>  | <b>410 kg/m<sup>3</sup></b>  | <b>410 kg/m<sup>3</sup></b>  |
|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| SP PCE HP185                                      | 0,8 %                        |                              | 0,8 %                        | 0,8 %                        |
| SP PNS Zeta-conc.                                 |                              | 1,0 %                        |                              |                              |
| Inhibitor glinenih in finih delcev Edyx           |                              |                              |                              | 0,2 %                        |
| Agregat 0/4                                       | 817 kg/m <sup>3</sup> (48 %) | 817 kg/m <sup>3</sup> (48 %) |                              | 817 kg/m <sup>3</sup> (48 %) |
| Agregat 0/2 D sep. Tolmin                         |                              |                              | 766 kg/m <sup>3</sup> (45 %) |                              |
| Agregat 4/8 sep. Tolmin                           | 254 kg/m <sup>3</sup> (15 %) | 254 kg/m <sup>3</sup> (15 %) | 287 kg/m <sup>3</sup> (17 %) | 254 kg/m <sup>3</sup> (15 %) |
| Agregat 8/16 sep. Tolmin                          | 628 kg/m <sup>3</sup> (37 %) | 628 kg/m <sup>3</sup> (37 %) | 644 kg/m <sup>3</sup> (38 %) | 628 kg/m <sup>3</sup> (37 %) |
| V/C <sub>tot</sub>                                | 0,49                         | 0,54                         | 0,44                         | 0,49                         |
| Posed, po 10 min                                  | 120 mm                       | 200 mm                       | 260 mm                       | 210 mm                       |
| Tlačna trdnost, 7 dni                             | 36,8 MPa                     | 33,4 MPa                     | 50,2 MPa                     | 35,3 MPa                     |
| Tlačna trdnost, 28 dni                            | 42,7 MPa                     | 38,0 MPa                     | 57,5 MPa                     | 45,8 MPa                     |

#### Primer 4:

Prefabrikacija: beton z oznako C40/50, samovgradljivi

Receptura betona

| <b>Cement CEM I 52,5 R</b>      | <b>400 kg/m<sup>3</sup></b> |
|---------------------------------|-----------------------------|
| SP PCE K2 (1,36 % na DC)        | 5,4 kg/m <sup>3</sup>       |
| Voda (v/c <sub>ef</sub> = 0,47) | 200 kg/m <sup>3</sup>       |
| Agregat 0/4D (53 %)             | 885 kg/m <sup>3</sup>       |
| Agregat 4/8 (10 %)              | 165 kg/m <sup>3</sup>       |
| Agregat 8/16 (37 %)             | 620 kg/m <sup>3</sup>       |
| Kamena moka 1 (KM1)             | 100 kg/m <sup>3</sup>       |

Sveži samovgradljivi beton ne dosega ustreznega razleza (650–720 mm).

Težava so tudi površine montažnih elementov. Pojavljajo se razpoke in lunke pod cementnim mlekom.



Glede na informacije smo ocenili, da je po vsej verjetnosti viskoznost betona prevelika, zato je počasen in ne dosega razleza. Najprej smo preverili kameno moko (KM1) z razlezom. Pri razmerju voda/moka = 0,3 sploh ne dobimo paste, ker ni dovolj vode, da bi omočila vsa zrna. Zato smo razmerje dvignili na 0,4 in dobili razlez 165 mm. Z dodatkom 0,4 % SP PCE HP45 smo dobili razlez 380 mm – glej sliko.

V / KM1 = 0,3



V / KM1 = 0,4



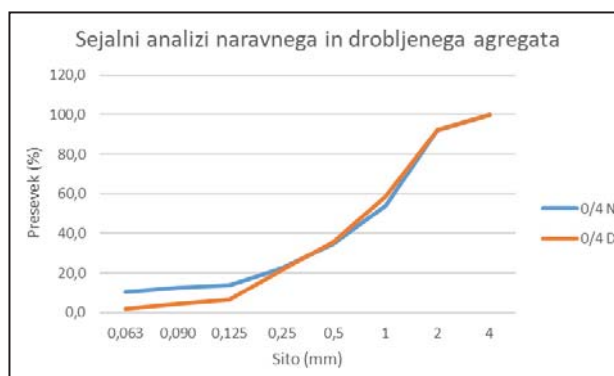
V / KM1 = 0,4  
SP PCE HP45 = 0,4 %



Naredili smo sejnalno analizo peskov 0/4D in 0/4N, ki je na razpolago na betonarni.

Sejalna analiza obeh agregatov frakcije 0/4

| Velikost sita (mm) | Presevek (%)        |                     |
|--------------------|---------------------|---------------------|
|                    | Drobni agregat 0/4D | Drobni agregat 0/4N |
| 4                  | 98,5                | 98,4                |
| 2                  | 68,0                | 78,2                |
| 1                  | 39,4                | 65,2                |
| 0,5                | 24,7                | 49,6                |
| 0,25               | 17,0                | 21,1                |
| 0,125              | 13,3                | 4,9                 |
| 0,090              | 21,1                | 2,7                 |
| 0,063              | 10,9                | 1,5                 |



#### Preiskave svežih lastnosti betonov

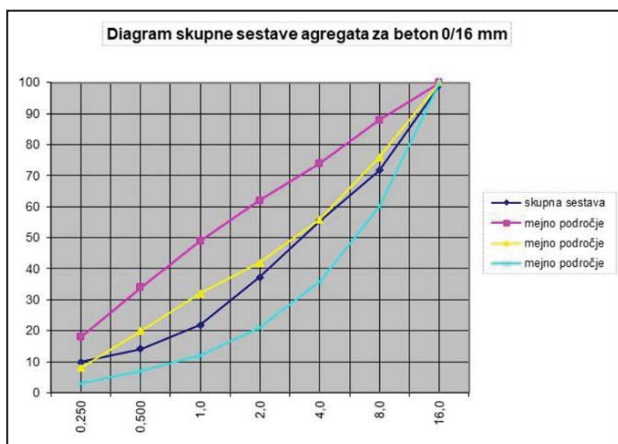
|                             | RB 1                         | RB 2                         | RB 3                           |
|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Cement CEM I 52,5 R         | 400 kg/m <sup>3</sup>        | 400 kg/m <sup>3</sup>        | 400 kg/m <sup>3</sup>          |
| SP PCE HP 45                | 1,27 %                       | 1,08 %                       | 1,18 %                         |
| Agregat 0/4 D               | 885 kg/m <sup>3</sup> (53 %) | 885 kg/m <sup>3</sup> (53 %) | 525 kg/m <sup>3</sup> (31,5 %) |
| Agregat 0/4 N               |                              |                              | 525 kg/m <sup>3</sup> (31,5 %) |
| Agregat 4/8                 | 165 kg/m <sup>3</sup> (10 %) | 165 kg/m <sup>3</sup> (10 %) |                                |
| Agregat 8/16                | 620 kg/m <sup>3</sup> (37 %) | 620 kg/m <sup>3</sup> (37 %) | 520 kg/m <sup>3</sup> (37 %)   |
| Kamena moka 1               | 50                           |                              | 20                             |
| Kamena moka 2               |                              | 50                           |                                |
| v/c <sub>ef</sub>           | 0,47                         | 0,47                         | 0,47                           |
| Razlez s posedom, po 10 min | 550 mm                       | 630 mm                       | 600 mm                         |
| Čas T50                     | 6,3 sek                      | 4,5 sek                      | 3 sek                          |

Glede na pridobljene podatke smo naredili serijo preiskav, kjer smo z zniževanjem deleža kamene moke (KM1) oz. z zamenjavo kamene moke (KM2) uspeli korigirati razlez betona iz 550 na 630 mm ter njegovo viskoznost – krajši čas, ko beton doseže razlez 500 mm.

Še boljše rezultate smo dobili z močno znižano dozo moke KM1 = 20 kg/m<sup>3</sup> in mešanjem drobljenega in naravnega agregata (50 : 50).

Skupna sestava agregata je bila sledeča:

RB 1 in 2



RB 3



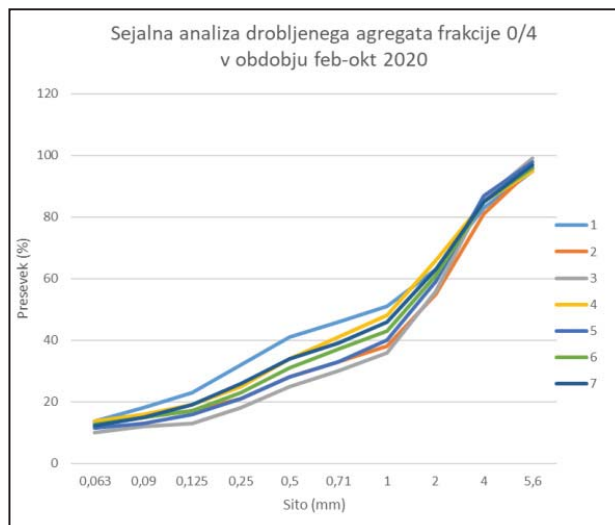
### Primer 5:

Transportni beton z oznako: C30/37 XC3 D<sub>max</sub>16 S4

Receptura betona

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| <b>Cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R</b> | <b>330 kg/m<sup>3</sup></b> |
| SP PCE HP206 (0,55 %)                  | 1,8 kg/m <sup>3</sup>       |
| Voda (v/c <sub>ef</sub> = 0,55)        | 195 kg/m <sup>3</sup>       |
| Agregat 0/4 (58 %)                     | 1202 kg/m <sup>3</sup>      |
| Agregat 8/16 (42 %)                    | 828 kg/m <sup>3</sup>       |

Sejalne analize agregata 0/4 v obdobju 8 mesecev



V daljšem časovnem obdobju so se pojavljale težave z doseganjem konsistence in v/c razmerja. Količino vode je bilo za doseganje obdelavnosti treba dvigniti do 20 kg/m<sup>3</sup>, kar je posledično pomenilo, da je v/c zunaj območja, ki ga za tovrstne betone zahteva standard in božazen glede doseganja tlačnih trdnosti.

Zato smo dlje časa spremljali kakovost agregata, ki je v obdobju 8 mesecev kar precej nihala, kot je vidno v spodnji tabeli in zgornjem grafu.

|                           | 1                   | 2   | 3   | 4    | 5    | 6    | 7    |
|---------------------------|---------------------|-----|-----|------|------|------|------|
| <b>Velikost sita (mm)</b> | <b>Presevek (%)</b> |     |     |      |      |      |      |
| 5,6                       | 95                  | 96  | 99  | 95   | 98   | 96   | 97   |
| 4                         | 83                  | 81  | 86  | 85   | 87   | 85   | 85   |
| 2                         | 63                  | 55  | 56  | 66   | 59   | 61   | 63   |
| 1                         | 51                  | 38  | 36  | 48   | 40   | 43   | 46   |
| 0,71                      | 46                  | 33  | 30  | 41   | 33   | 37   | 39   |
| 0,5                       | 41                  | 28  | 25  | 34   | 28   | 31   | 34   |
| 0,25                      | 32                  | 21  | 18  | 25   | 21   | 23   | 26   |
| 0,125                     | 23                  | 17  | 13  | 19   | 16   | 17   | 19   |
| 0,090                     | 18                  | 15  | 12  | 16   | 13   | 15   | 15   |
| 0,063                     | 13,8                | 13  | 10  | 13,8 | 11,6 | 12,8 | 12,3 |
| Mf                        | 3,1                 | 3,6 | 3,7 | 3,2  | 3,5  | 3,4  | 3,3  |
| Fini delci (%)            | 19                  |     |     |      |      | 18   |      |
| SE (%)                    | 62                  | 76  |     |      |      | 59   | 66   |
| Vpijanje (%)              |                     | 1   |     |      |      |      |      |

Nestalnost kakovosti agregata se je pokazala v zrnivosti, deležu finih delcev, kot tudi ekvivalentu peska, kar se je odražalo na lastnostih svežega betona.

| <b>Preiskave svežih lastnosti betonov</b> |                        |                        |                        |
|---|------------------------|------------------------|------------------------|
| Cement CEM II/A-M (S-LL) 42,5 R           | 330 kg/m <sup>3</sup>  | 330 kg/m <sup>3</sup>  | 330 kg/m <sup>3</sup>  |
| SP PCE HP206                              | 0,55 %                 | 0,65 %                 | 0,72 %                 |
| Agregat 0/4 (58 %)                        | 1202 kg/m <sup>3</sup> | 1202 kg/m <sup>3</sup> | 1202 kg/m <sup>3</sup> |
| Agregat 8/16 (42 %)                       | 828 kg/m <sup>3</sup>  | 828 kg/m <sup>3</sup>  | 828 kg/m <sup>3</sup>  |
| v/c <sub>ef</sub>                         | 0,55                   | 0,65                   | 0,72                   |
| Posed, po 10 min                          | 120 mm                 | 210 mm                 | 150 mm                 |
| Posed, po 30 min                          | -                      | 155 mm                 | 125 mm                 |

V zgornji tabeli je nekaj preiskav opravljenih v laboratoriju, ki le nakazujejo na težave, ki jih je imela betonarna. Da ne bi prišlo do nedoseganje marke betona, je bilo treba navzgor korigirati dozo cementa, kar je v končni fazi precej podražilo ceno betona.

## ZAKLJUČEK

V članku je na nazornih petih primerih prikazano, da kakovost agregata, predvsem frakcije 0/4, pa tudi dodanih polnil, bistveno vpliva na obnašanje svežega betona. Prikazano je tudi, da je za določen agregat oz. polnilo možno izbrati ustrežnejši superplastifikator. Za proizvodnjo črnega betona z dobro sposobnostjo kompaktiranja je treba najprej poiskati pravo kombinacijo cementa, agregata in filerja (če ga uporabljamo) ter superplastifikatorja oz. kemijskih dodatkov. Hkrati pa je za zagotavljanje stalnosti proizvodnje treba poskrbeti, da bodo čim bolj konstantne vse v betonu uporabljene komponente.

## LITERATURA

- [1] Collepardi, M. (2006). *The New Concrete*, Castertte di Villorba: Grafiche Tintoretto.
- [2] Zevnik, L. (oktober 2010). Razvoj nove družine polikarboksilatnih superplastifikatorjev: kemijski vidik razvoja. V Zbornik gradiv: Srečanje TKK Srpenica. Bovec: TKK Srpenica d.d.
- [3] Zevnik, L. (oktober 2012). Superplastifikatorji iz družine Cementol Hiperplast – teorija. V Zbornik gradiv: Srečanje TKK Srpenica. Bovec: TKK Srpenica d.d.

ANA BRUNČIČ<sup>1</sup>, KATARINA ŠTER<sup>1</sup>,  
DR. SABINA DOLENEC<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ZAG, LABORATORIJ ZA BETON, LJUBLJANA

<sup>2</sup> ZAG, LABORATORIJ ZA CEMENTE, MALTE IN  
KERAMIKO, LJUBLJANA

# Karakterizacija reoloških lastnosti cementnih materialov do začetka vezanja



PREDAVATELJICA  
ANA BRUNČIČ

## POVZETEK

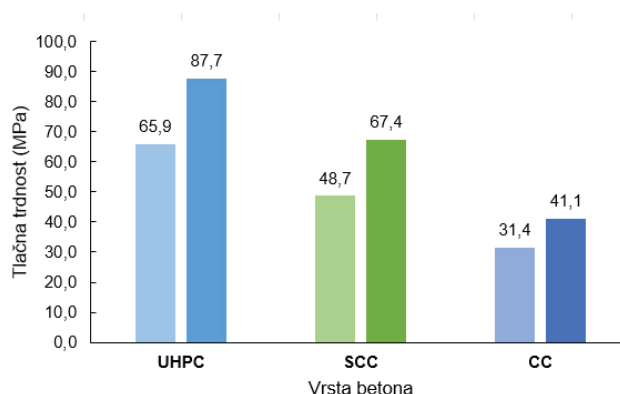
Obdelavnost betona je v evropskem prostoru zaenkrat še edino standardizirano merilo vgradljivosti, konsistence, tečenja, robustnosti in stabilnosti cementnih materialov. Nič od naštetega ni mehanska lastnost materiala v klasičnem smislu, prav tako nič od naštetega ne podaja obnašanja cementnega materiala, ki bi bilo ovrednoteno in primerljivo ne glede na uporabljeno recepturo cementnega materiala. Že sama variabilnost definicij zgornjega izrazja govori o njihovi subjektivnosti in empiričnosti. Konsistenco Združenje za beton Slovenije (ZBS) definira kot lastnost svežega betona, ki pove, kako se sveži beton upira spremembi oblike betona in jo klasi-



ficira z razredi, pri čemer so mišljeni razredi posamezne testne metode po SIST EN 206: posed, stopnja zgoščenosti in razlez [1]. Konsistenca je v slovenščini pogosto (pogovorno) uporabljena tudi kot sopomenka sicer nadpomenki obdelavnost [2]. Ameriški ACI jo definira kot relativno mobilnost ali sposobnost svežega betona teči [3], obdelavnost pa kot lahkoto, s katero je beton mogoče mešati, vgraditi in skompaktirati in zagladiti v homogeno stanje. Nemški Betonverein konsistenco definira kot mobilnost svežega betona in naboru testnih metod njenega določanja dodaja še čas vezanja [4].

Ker so cementni materiali v svežem stanju tradicionalno obravnavani kot tekočine, se precej težav pojavi pri sodobnejših mešaninah, ki zaradi izrazite kohezije v svežem stanju ohranjajo obliko, ob rednih mehanskih motnjah pa začnejo teči. Tikotropija, viskoelastičnost, kohezija, strižno tanjšanje (*ang. shear thinning*), strižno debeljenje (*ang. shear thickening*), otrdevanje (*ang. work hardening*) so sicer ustaljeni reološki izrazi [5], ki pa so v gradbeništvu še neloliko manj poznani, vendar zaradi novih tehnologij gradnje in neklasičnih mešanin vse bolj prodirajo v svet cementnih materialov [6]. Merjenje reoloških lastnosti je precej bolj temeljni način karakterizacije svežih cementnih materialov, saj omogoča univerzalnost testnih metod [7] ne glede na obnašanje materiala, predvsem pa lastnosti opisuje s klasičnimi mehanskimi veličinami v obliki napetosti/trdnosti in modulov. Sama izvedba metod zaradi kompleksne sestave cementnih materialov sicer ni preprosta: poleg zelo raznovrstne mešanice delcev – od koloidnih delcev začetnih produktov hidratacije, velikosti nekaj nm, preko delcev cementa in mineralnih dodatkov, manjših od 100  $\mu\text{m}$ , do največjih zrn agregata, največje dimenzije 32 mm ali več – je precejšnji izziv tudi časovno odvisna reaktivnost sistema, ob tej pa še uporaba kemijskih dodatkov, ki spreminjajo sile med delci suspenzije, stabilnost mešanice, pa tudi reaktivnost sistema [6]–[8].

Prispevek predstavlja novejši pristop h karakterizaciji cementnih materialov, in sicer gre za dvonivojsko obravnavo lastnosti treh različnih mešanin betona: na nivoju cementne paste z dodanimi najfinejšimi frakcijami agregata so določene reološke lastnosti v prvi uri po zamešanju, na nivoju betona pa je določena konsistenca s posedom oz. razlezom in časom  $t_{500}$ . Iz nabora reoloških lastnosti so prikazane napetost na meji tečenja, viskoznost in tiksotropija, dobljene iz tokovne krivulje na podlagi rotacijskih testov, izvedenih takoj po zamešanju in eno uro po njem, poleg teh pa še razvoj elastičnega strižnega modula (modul akumulacije)  $G'$  in viskoznega strižnega modula (modul energijskih izgub)  $G''$  v prvi uri po zamešanju, oba dobljena na podlagi oscilacijskih amplitudnih in frekvenčnih testov. Analizirane so tri značilne mešanice (Preglednica 1) – konvencionalni beton (CC), samozgoščevalni beton (SCC) in beton zelo visokih zmogljivosti (UHPC) –, za katere so bile uporabljene iste komponente, le v različnih deležih, poleg teh pa tudi enako vodo-cementno razmerje. Uporabljene recepture so prikazane v Preglednici 1, dosežene 2- in 7-dnevne tlačne trdnosti treh karakteriziranih betonov pa so prikazane na Sliki 1.



Slika 1: 2- (levi stolpec) in 7-dnevne (desni stolpec) tlačne trdnosti karakteriziranih betonov.

Preglednica 1: Mešanice treh karakteriziranih betonov

| Komponenta                 | UHPC                          | SCC                           | CC                            |
|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|                            | (kg/m <sup>3</sup> )          |                               |                               |
| CEM I 52.5 R               | 536,0                         | 400,0                         | 360,0                         |
| voda (v/c)                 | 284,1 (0,53)                  | 208,0 (0,52)                  | 190,8 (0,53)                  |
| apnenčeva moka             | 697,0                         | 220,0                         |                               |
| mikrosilika                | 107,0                         |                               |                               |
| Cementol Hiperplast 235 LT | 9,97 (1,86 %-m <sub>c</sub> ) | 6,25 (1,56 %-m <sub>c</sub> ) | 2,16 (0,60 %-m <sub>c</sub> ) |
| agregat                    | 16/22 mm (naravni)            |                               | 336,0                         |
|                            | 8/16 mm (naravni)             |                               | 503,0                         |
|                            | 4/8 mm (naravni)              |                               | 335,0                         |
|                            | 0/4 mm (drobljeni)            | 610,0                         | 841,0                         |

Za pripravo vseh mešanic so bili uporabljeni Holcimov cement CEM I 52,5 R, hotiški agregat (savski prod) frakcij 0/4 mm, 4/8 mm, 8/16 mm in 16/22 mm, apnenčeva kamena moka kamnoloma Očura, mikrosilika Kema, hiperplastifikator Cementol Hiperplast 235 LT TKK. Na nivoju cementne paste je bil uporabljen sorazmerni masni delež frakcije 0/4 mm, in sicer frakcije 0,25/0,5 mm, 0,125/0,25 mm in ostanek od sejanja. Tri vrste cementnega materiala: CC, SCC in UHPC so bile zamešane v treh različicah: 1) makronivojski beton (8 litrov), 2) mikronivojska cementna pasta z dodanimi frakcijami agregata do 0,25 mm (100 g) in 3) mikronivojska pasta brez dodanih frakcij agregata (100 g), dodan je le delež ostanka sejanja frakcije 0/4, manjši od 0,125 mm.

Na makronivoju so bili izvedene meritve poseda po SIST EN 12350-2 (CC in UHPC) oz. razleza s posedom in viskoznosti oz. hitrost tečenja/deformiranja po SIST EN 12350-8 (SCC in CC). Določena je bila tudi tlačna trdnost (po SIST EN 12390-4), in sicer dvodnevna in sedemdnevna. Za slednjo je bila za vsak dan pripravljena po ena kocka, za SCC in UHPC dimenzij stranice 7 cm, za CC pa dimenzij stranice 10 cm. Vzorci so bili pripravljani in negovani skladno s SIST EN 12350-1 in SIST EN 12390-2. Zgoščanje mikrostrukture je bilo 48 ur spremljano z merjenjem časa prehoda ultrazvočnih p-valov, in sicer z napravo Proceq Pundit 200 PL. Uporabljene so bile 54 kHz sonde. Beton je bil ulit v jekleni kalup in na dve nasprotni stranici kalupa nameščeni z litijevo mastjo omaščeni sondi. Frekvenca zajema podatkov je znašala  $0,1 \text{ min}^{-1}$ . Za vzorce betona je bila izvedena tudi

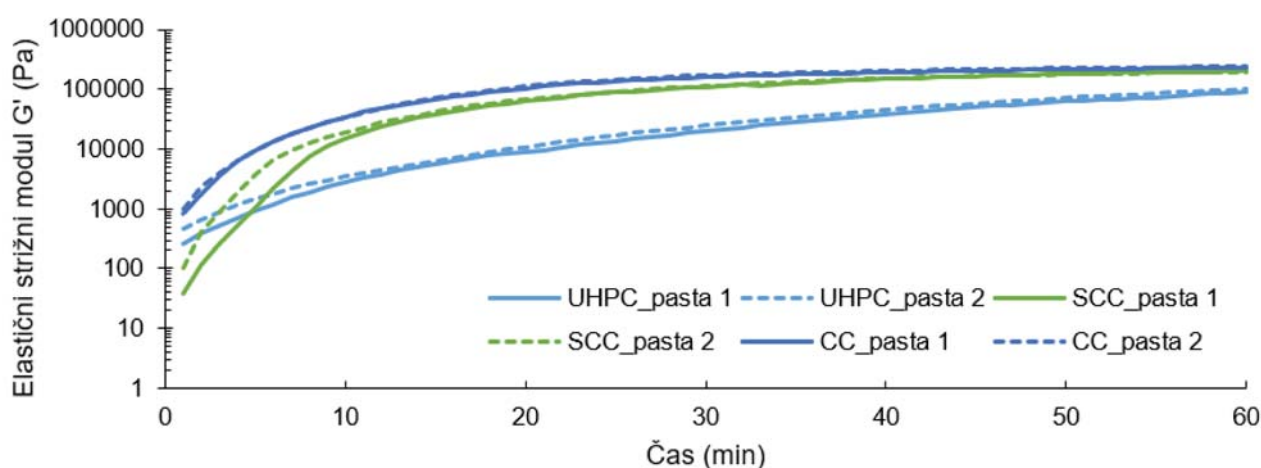
izotermna kalorimetrija, in sicer s kalorimetrom s tremi kanali TAM Air TA Instruments. Uporabljena oprema je prikazana na Sliki 2.

Na mikronivoju so bili izvedeni rotacijski in oscilacijski testi, in sicer sta bila uporabljena reometer AntonPaar SCM 302 in Vaneova geometrija mešala s štirirezilnim nastavkom, premera 22 mm in dolžine 40 mm. Uporabljena je bila čaša, notranjega premera 27 mm s peltierjevim sistemom nadzora temperature, in sicer je bila ta  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Protokol izvajanja meritev je vključeval naslednjo sekvenco: 1) suho mešanje materiala (3 min), 2) mokro mešanje materiala (3 min), 3) mešanje z reometrom pri logaritmsko naraščajoči strižni hitrosti  $0\text{--}50 \text{ s}^{-1}$  (1 min), 4) mirovanje z obnovo oz. strukturacijo materiala, 5) izvedba rotacijskega testa za tokovno krivuljo s tridelnim režimom strižne hitrosti: linearno naraščajoča  $0\text{--}100 \text{ s}^{-1}$ , konstantna  $100 \text{ s}^{-1}$  in linearno padajoča  $100\text{--}0 \text{ s}^{-1}$ , 6) izvedba oscilacijskega testa z 0,003-odstotno strižno deformacijo pri konstantni frekvenci 1 Hz in tlačni osni sili 1 N (60 min), 7) izvedba rotacijskega testa za tokovno krivuljo s tridelnim režimom strižne hitrosti: linearno naraščajoča  $0\text{--}100 \text{ s}^{-1}$ , konstantna  $100 \text{ s}^{-1}$  in linearno padajoča  $100\text{--}0 \text{ s}^{-1}$ . Za UHPC so bili po eni uri po zamešanju izvedeni še frekvenčni testi za določitev frekvence utekočinjanja materiala (prehoda v tekoče stanje). Za vsak vzorec sta bili izvedeni dve seriji meritev, protokol je bil zasnovan tako, da je bila ponovljivost dobra.



Slika 2: Uporabljene testne metode – Vaneova geometrija mešala reometra MCR 302 (levo zgoraj), posed (levo spodaj), hitrost prehoda ultrazvočnih p-valov (desno).

Na podlagi dobljenih rezultatov so bile izdelane tokovne krivulje z oceno viskoznosti, in diagrama  $G'$  in  $G''$  (Slika 3) ter kompleksne viskoznosti in kota zaostajanja – pri amplitudnih in frekvenčnih oscilacijskih testih. Rezultati reološke karakterizacije podajajo dober vpogled v lastnosti in obnašanje vseh treh mešanic, predvsem pa omogočajo enotno klasifikacijo in primerljivost treh mešanic, katerih obnašanje v svežem in strjenem stanju se zelo razlikuje. Podane tokovne krivulje, predvsem pa "energija sistema", dobljena kot površina med kraki 3-delne tokovne krivulje pri tiskotropnem ali reopektnem obnašanju, podajajo oceno obdelavnosti in stabilnosti mešanice, iz določenih  $G'$  in  $G''$  je možna ocena zmanjševanja obdelavnosti v času oz. povečevanja vložene dela za enako pretočnost paste, frekvenčni testi pa podajajo rang frekvence pri znani amplitudi deformacije, pri kateri je učinek utekočinjanja kohezivnega cementnega materiala največji, s tem pa podajajo tudi povsem praktične podatke za obdelavo materiala doseganje njegove homogenosti v prvi uri po zamešanju. Nasploh reološki testi, izvedeni na manjših vzorcih, v kombinaciji z analizo reaktivnosti (izotermna kalorimetrija) in spremljanjem zgoščanja mikrostrukture podajajo celovito karakterizacijo lastnosti svežih cementnih materialov.



Slika 3: Razvoj elastičnega strižnega modula  $G'$  v prvi uri po zamešanju cementne paste (pasta 1 – dodane najfinejše frakcije, pasta 2 – brez najfinejših frakcij).

## ZAHVALA

Avtorji se zahvaljujemo finančni podpori Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (Infrastrukturni program št. IO-0032 in Raziskovalni program št. P2-0273).

## LITERATURA

- [1] SIST, 'SIST EN 206:2013+A1: Concrete - Specification, performance, preparation and conformity', 2016.
- [2] F. Kavčič *et al.*, *Priročnik za beton: načrtovanje in proizvodnja betona*. 2018.
- [3] ACI, '<https://www.concrete.org/tools/frequentlyaskedquestions.aspx?faqid=647>'.
- [4] K.-C. Thienel, 'Bauchemie und Werkstoffe des Bauwesens: Leichtbeton', p. 12, 2020.
- [5] J. Mewis and N. J. Wagner, *Colloidal Suspension Rheology*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [6] N. Roussel, Ed., *Understanding the Rheology of Concrete*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012.
- [7] D. Feys, R. Cepuritis, S. Jacobsen, K. Lesage, E. Secrieru, and A. Yahia, 'Measuring rheological properties of cement pastes: Most common techniques, procedures and challenges', *RILEM Tech. Lett.*, vol. 2, pp. 129–135, Sep. 2017, doi: 10.21809/rilemtechlett.2017.43.
- [8] A. Perrot, T. Lecompte, H. Khelifi, C. Brumaud, J. Hot, and N. Roussel, 'Yield stress and bleeding of fresh cement pastes', *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, no. 7, pp. 937–944, 2012, doi: 10.1016/j.cemconres.2012.03.015.

ŽIGA KORBAR, DR. ANDRAŽ HOČEVAR,  
MAG. FRANCI KAVČIČ

IGMAT

# Projektiranje betonskih mešanic normalne in visoke trdnosti z omejeno izbiro vhodnih materialov



PREDAVATELJ  
ŽIGA KORBAR

## 1 UVOD

Na osnovi naročila s strani znanega naročnika smo v obdobju od oktobra 2022 do maja 2023 izvajali projektiranje dveh betonskih mešanic. Naloga je bila razviti betonski mešanici "normalnega" trdnostnega razreda C25/30 in "visokega" trdnostnega razreda C70/85. Na željo naročnika smo uporabili le vnaprej določene osnovne materiale. Ti so bili določeni z razlogom, da se ob potrebi uporabe projektiranih receptur ne moti redne proizvodnje betonarne, saj so na betonnarni ti osnovni materiali na voljo pri redni proizvodnji betonov. Izjema je le uporaba mikrosilike, ki pa se v betonsko mešanico dodaja ročno. Pri določanju količin posameznega osnovnega materiala smo za posamezno varianto recepture iz Preglednice N.3, standarda SIST 1026 upoštevali mejno vrednost posamezne sestave, vezane na trdnostni razred. Posebnih zahtev, vezanih na



stopnjo izpostavljenosti, nismo imeli. Omejili smo se pri zgornji količini uporabljenega cementa, in sicer pri 450 kg/m<sup>3</sup> betonske mešanice.

Sveže betonske mešanice smo pripravljali v 50-litrskem mešalcu v laboratoriju oddelka za beton Inštituta za gradbene materiale, IGMAT d.d. Ob pripravi posamezne variante recepture betonske mešanice smo izvedli tudi preskušanje svežega betona po standardih SIST EN 12350, in sicer: merjenje temperature, preskus s posedom stožca in določitev vodocementnega razmerja za sveži beton. Za vsako izvedbo recepture smo odvzeli po tri oziroma šest preizkušancev za določitev tlačne trdnosti po SIST EN 12390. Tlačne trdnosti preizkušancev smo ugotavljali po treh, sedmih in osemindvajsetih dneh. Na osnovi teh rezultatov smo lahko ugotavljali vpliv spreminjanja razmerja osnovnih materialov na obdelavnost betona, priraste in končne tlačne trdnosti.

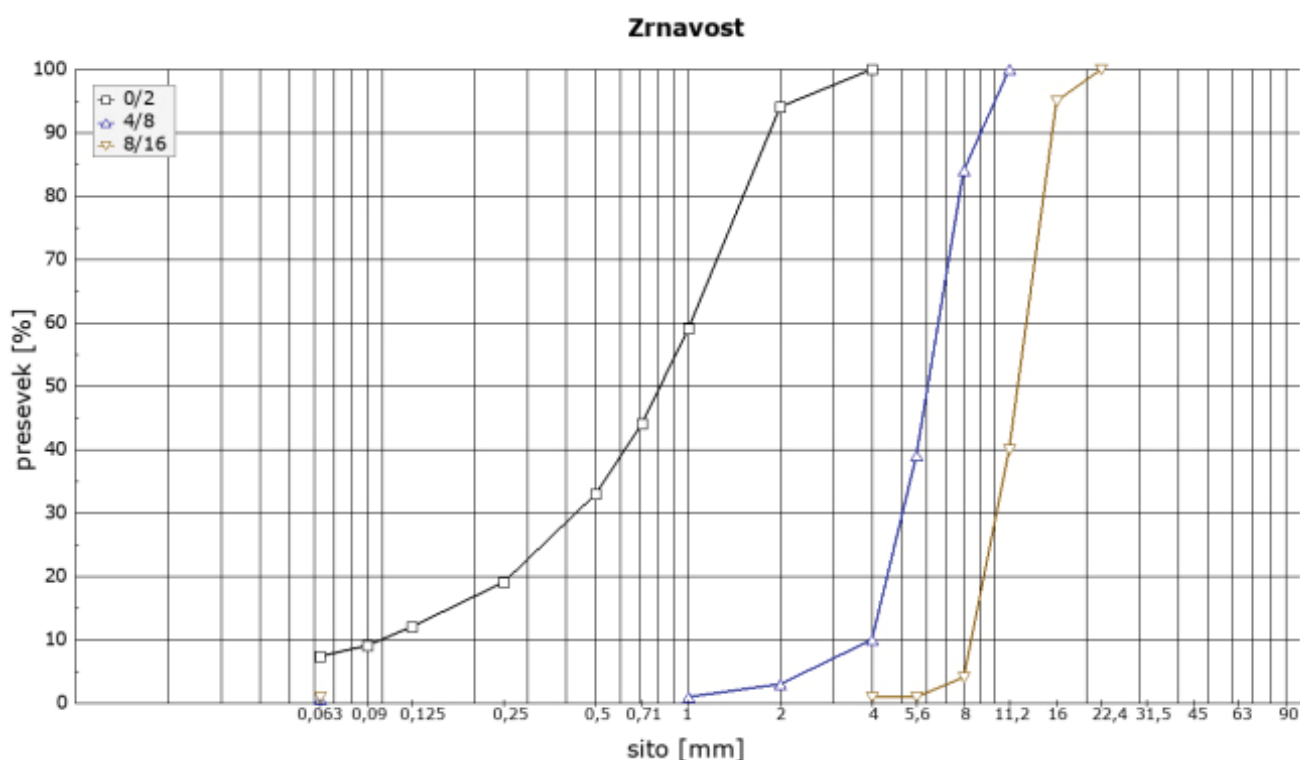
## 2 IZVEDBA BETONSKIH MEŠANIC

Za namen projektiranja betonske mešanice so bili uporabljeni naslednji osnovni materiali:

- cement CEM II/A-LL 42,5 R,
- drobljeni agregat frakcij 0/2, 4/8 in 8/16,
- voda,
- superplastifikator nove generacije (v nadaljevanju tudi "hiperplastifikator" oziroma "dodatek") in
- mikrosilika v praškasti obliki za beton trdnostnega razreda C70/85.

Po prevzemu osnovnega materiala na betonarni smo v laboratoriju oddelka za geomehaniko IGMAT d.d. izvedli določevanje zrnivosti po metodi sejanja, skladno s standardom SIST EN 933-1. Krivulje zrnivosti posameznega drobljenega agregata prikazuje Slika 1. Na osnovi standarda SIST EN 1097-5 smo za posamezno frakcijo agregata na osnovi sušenja v prezračevanem sušilniku določili odstotek vsebnosti vode, ki znaša 5,7 % za agregat 0/2, za agregat 4/8 je 0,8 %, za agregat 8/16 pa 0,4 %.

Projektirani recepturi smo razvijali na način, da smo pri ustrezni obdelavnosti betona poskušali dobiti tlačne trdnosti, ki ustrezajo zastavljenemu trdnostnemu razredu posamezne recepture, torej C25/30 in C70/85.



Slika 1: Krivulje zrnivosti uporabljenih agregatov

Za recepturo "normalnega" trdnostnega razreda C25/30 (v nadaljevanju tudi "R30") smo izvedli štiri poskusne mešanice, za recepturo "višjega" trdnostnega razreda C70/85 (v nadaljevanju tudi "R85") pa smo izvedli devet poskusnih mešanic. V Preglednici 1 navajamo razmerja uporabljenih osnovnih materialov recepture R30, v Preglednici 2 pa uporabljene osnovne materiale recepture R85. Vse količine, opisane in tabelarično prikazane v nadaljevanju, veljajo za 1 m<sup>3</sup> betonske mešanice.

Preglednica 1: Poskusne mešanice recepture trdnostnega razreda C25/30

| Poskusna mešanica | Cement | Voda | Hiperplastifikator | Agregat 0/2                 | Agregat 4/8 | Agregat 8/16 |
|-------------------|--------|------|--------------------|-----------------------------|-------------|--------------|
|                   | [kg]   | [kg] | % mase cementa     | % mase celega dela agregata |             |              |
| 1                 | 330    | 198  | 0,5                | 50                          | 15          | 35           |
| 2                 | 330    | 198  | 0,3                | 52                          | 14          | 34           |
| 3                 | 280    | 176  | 0,4                | 52                          | 14          | 34           |
| 4                 | 280    | 188  | 0,3                | 52                          | 14          | 34           |

Preglednica 2: Poskusne mešanice recepture trdnostnega razreda C30/85

| Poskusna mešanica | Cement | Voda | Hiperplastifikator | Mikrosilika | Agregat 0/2                 | Agregat 4/8 | Agregat 8/16 |
|-------------------|--------|------|--------------------|-------------|-----------------------------|-------------|--------------|
|                   | kg     | kg   | % mase cementa     | kg          | % mase celega dela agregata |             |              |
| 1                 | 430    | 194  | 0,5                | 16          | 48                          | 16          | 36           |
| 2                 | 450    | 189  | 0,5                | 20          | 40                          | 22          | 38           |
| 3                 | 450    | 189  | 0,5                | 24          | 35                          | 27          | 38           |
| 4                 | 450    | 189  | 0,5                | 24          | 35                          | 23          | 42           |
| 5                 | 450    | 189  | 1,2                | 24          | 40                          | 22          | 38           |
| 6                 | 450    | 185  | 1,2                | 24          | 50                          | 14          | 36           |
| 7                 | 450    | 189  | 1,2                | 24          | 50                          | 14          | 36           |
| 8                 | 450    | 189  | 1,6                | 28          | 50                          | 14          | 36           |
| 9*                | 450*   | 189  | 1,2                | 24          | 50                          | 14          | 36           |

\* uporaba cementa CEM I 52,5 R

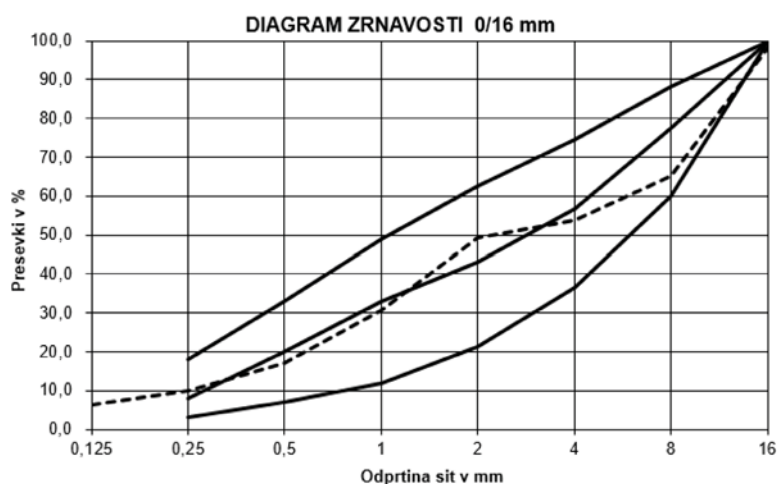
Pri prvi poskusni mešanici posamezne recepture (v nadaljevanju tudi "R30-1" oziroma "R85-1") smo zasnovali recepture tako, da smo ob dobljenih rezultatih tri-, sedem- in osemindvajset-dnevni trdnosti korigirali posamezne količine osnovnih materialov in razmerja agregatov do željenega rezultata – ustrezne tlačne trdnosti ob primerni obdelavnosti betona.

V Preglednici 3 prikazujemo dobljene rezultate posamezne mešanice recepture R30.

Preglednica 3: Dobljeni rezultati posamezne poskusne mešanice recepture R30

| Poskusna mešanica | Tlačna trdnost pri starosti |       |        | Posed | Prostorninska masa   | v/C <sub>tot</sub> |
|-------------------|-----------------------------|-------|--------|-------|----------------------|--------------------|
|                   | 3 dni                       | 7 dni | 28 dni | [mm]  | [kg/m <sup>3</sup> ] |                    |
|                   | [MPa]                       |       |        |       |                      |                    |
| 1                 | 29,3                        | 45,3  | 56,3   | 200   | 2409                 | 0,55               |
| 2                 | 24,0                        | 35,9  | 44,4   | 200   | 2370                 | 0,59               |
| 3                 | 29,1                        | 38,5  | 47,5   | 70    | 2380                 | 0,58               |
| 4                 | 22,0                        | 29,2  | 36,5   | 180   | 2401                 | 0,68               |

Na osnovi rezultatov tlačnih trdnosti poskusne mešanice R30-1 smo ugotovili, da beton izkazuje bistveno višje tlačne trdnosti od predvidenih za trdnostni razred C25/30, ki ga predvideva receptura. Obdelavnost betona je bila ustrezna. Za recepturo R30-2 smo tako zmanjšali količino hiperplastifikatorja iz 0,5 % na 0,3 % deleža cementa in naredili minimalno korekcijo deležev agregata, ki so bili uporabljeni tudi v naslednjih dveh betonskih mešanicah. Diagram zrnivosti uporabljenega razmerja agregatov prikazuje Slika 2. Tlačne trdnosti so tudi pri drugi recepturi bile previsoke, tako da smo za recepturo R30-3 zmanjšali delež cementa iz 330 na 280 kg, količino vode iz 198 na 176 kg in povečali delež hiperplastifikatorja na 0,4 % deleža cementa. Ob izvedbi sveže betonske mešanice R30-3 je bilo ugotovljeno, da je obdelavnost betona preslaba, izmerjen je posed betona 70 mm, kar je bistveno premalo za ciljno konsistenco betona, ki je S4. Tako smo pri recepturi R30-4 povečali količino vode na 188 kg in ponovno zmanjšali delež hiperplastifikatorja na 0,3 % deleža cementa. Izdelan beton je izkazal pravo mero obdelavnosti, izmerjen posed stožca 180 mm. Izmerjeni sta bili tlačni trdnosti 36,4 in 36,5 MPa na betonskih kockah, starih 28 dni. Vse zgoraj navedene poskusne mešanice so po treh dneh dosegle prirast do povprečno 58 % ( $\pm 6$  %) končne tlačne trdnosti in po sedmih dneh do povprečno 81 % končne tlačne trdnosti ( $\pm 2$  %). Na podlagi zgoraj navedenih dejstev ocenjujemo, da poskusna mešanica R30-4 ustreza zahtevam po obdelavnosti in tlačnih trdnostih za predviden trdnosti razred betona C25/30.



Slika 2: Diagram zrnivosti agregata, uporabljenega v recepturah R30-2 do R30-4, podoben diagram zrnivosti agregata imajo tudi recepture R85-6 do R85-9

V Preglednici 4 prikazujemo dobljene rezultate posamezne mešanice recepture R85. Razvidno je, da z osnovnimi materiali, kateri so nam bili na voljo, nismo uspeli doseči ustreznih tlačnih trdnosti za trdnostni razred C70/85.

Preglednica 4: Dobljeni rezultati posamezne poskusne mešanice recepture R85

| Poskusna mešanica | Tlačna trdnost pri starosti |       |        | Posed | Prostorninska masa   | v/C <sub>tot</sub> |
|-------------------|-----------------------------|-------|--------|-------|----------------------|--------------------|
|                   | 3 dni                       | 7 dni | 28 dni |       |                      |                    |
|                   | [MPa]                       |       |        | [mm]  | [kg/m <sup>3</sup> ] |                    |
| 1                 | 47,5                        | 57,2  | 66,8   | 190   | 2401                 | 0,42               |
| 2                 | 50,5                        | 54,4  | 69,1   | 150   | 2409                 | 0,39               |
| 3                 | 49,3                        | 56,3  | 69,1   | 180   | 2441                 | -                  |
| 4                 | 52,1                        | 60,7  | 72,2   | 170   | 2404                 | -                  |
| 5                 | 54,6                        | 63,3  | 74,3   | -     | 2401                 | -                  |
| 6                 | 59,9                        | 71,5  | 79,2   | 230   | 2430                 | -                  |
| 7                 | 55,1                        | 63,8  | 80,7   | 260   | 2378                 | 0,37               |
| 8                 | 55,8                        | 68,4  | 82,2   | 250   | 2428                 | 0,37               |
| 9*                | 59,0                        | 69,1  | 73,7   | 220   | 2403                 | 0,34               |

\* uporaba cementa CEM I 52,5 R

Kot pri recepturi nižjega trdnostnega razreda so rezultati tlačnih trdnosti poskusne mešanice 1 služili kot osnova za določevanje količin posameznega osnovnega materiala. Od recepture R85-1 do R85-4 smo postopoma povečevali količini cementa in mikrosilike, ob nespremenjeni količini dodatka 0,5 % deleža cementa. Betoni so bili ustrezne obdelavnosti, vendar so bile dosežene tlačne trdnosti bistveno prenizke. Pri recepturi R85-5 smo povečali delež dodatka iz 0,5 % na 1,2 %, a je betonska mešanica segregirala. Za recepture R85-6 do R85-9 smo povečali delež finih delcev z določitvijo razmerja agregata 50/14/36 %. Pri recepturi R85-8 smo "predozirali" količino dodatka in mikrosilike, prvega smo povečali iz 1,2 % na 1,6 % količine cementa, drugega pa iz 24 kg na 28 kg. Kljub konkretnemu povečanju smo v primerjavi z recepturo R85-7 dobili le malenkostno povečanje tlačnih trdnosti. Vse zgoraj navedene poskusne mešanice so po treh dneh dosegle prirast do povprečno 71 % ( $\pm 5$  %) končne tlačne trdnosti in po sedmih dneh do povprečno 83 % končne tlačne trdnosti ( $\pm 7$  %). Pri recepturi R85-9 smo preverili vpliv zamenjave cementa s spremembo le-tega iz CEM II/A-LL 42,5 R na CEM I 52,5 R, količine osnovnih materialov smo pustili nespremenjene, glede na recepturo R85-7. Rezultati te poskusne mešanice izkazujejo bistveno višje priraste zgodnjih trdnosti po treh in sedmih dneh, vendar je dosežena končna tlačna trdnost nižja kot pri recepturah R85-7 in R85-8. Razloge za to gre iskati v hitrosti hidratacije cementa pri recepturi R85-9.

### 3 ZAKLJUČEK

Pri projektiranju dveh betonskih mešanic, to je mešanici "normalnega" trdnostnega razreda C25/30 in "visokega" trdnostnega razreda C70/85 smo se soočili z izzivom po doseganju ustrezne obdelavnosti betona in dovolj visoke tlačne trdnosti ob uporabi omejenega nabora osnovnih materialov, kar smo pri projektiranju recepture C25/30 dosegli relativno hitro. Zaradi omejene izbire pri agregatih, to je uporaba frakcij 0–2, 4–8 in 8–16 pa smo pri določevanju ustreznega razmerja uporabljenega osnovnega materiala prišli do spoznanja, da kljub "predozaciji" hiperplastifikatorja in mikrosilike nismo mogli doseči ciljnega trdnostnega razreda recepture C70/85. Dosegli smo rezultate tlačnih trdnosti nižjega trdnostnega razreda C60/75. Iz zgoraj navedenih dejstev ugotavljamo, da je treba za doseganje višjih trdnosti betona imeti na razpolago širši nabor agregatov, saj s tem lahko določimo ustrežnejšo krivuljo zrnivosti agregata, ki bazira bolj na skletni osnovi, posledično pa dosegamo višje končne trdnosti betona.



DR. TJAŠA ZUPANČIČ HARTNER

GIC GRADNJE

# Trajnostna gradnja, podprta z BIM ter VR tehnologijami



## POVZETEK

Trajnostna gradnja je ključnega pomena, če želimo doseči razvoj v korist prihodnjih generacij in okolja. Zato smo v Lipici 24. maja 2023, na "Dan ZBS 2023 – 20 let združenja", predstavili gradnjo naše nove betonarne Negonje in vključevanje sodobnih omogočitvenih tehnologij v gradnjo in v proizvodni proces delovanja betonarne.

Hitra rast prebivalstva, gospodarski razvoj in povpraševanje po več naravnih virih pomembno obremenjujejo naš planet. Zato je pomembno, da so naše strategije usmerjene v spremembo načina, kako načrtujemo, gradimo, vzdržujemo in upravljamo z našimi zgradbami.

Zagotoviti moramo, da bo gradbena industrija zadovoljila potrebe sedanjega prebivalstva, hkrati pa ohranila potrebe prihodnjih generacij. Kot eden največjih porabnikov naravnih virov ima gradbeništvo pomembno vlogo pri trajnostnem razvoju.

Medtem ko se trajnost nanaša na prakso ohranjanja in nadomeščanja naravnih virov, da ne poškodujemo planeta, se trajnostni razvoj nanaša na našo sposobnost, da to storimo v povezavi s socialnimi, političnimi, okolj-

skimi in gospodarskimi težavami, s katerimi se sooča človeštvo.

Digitalizacija, avtomatizacija in umetna inteligenca, ustvarjajo velike nove poslovne priložnosti in pomembno optimirajo proizvodni proces delovanja betonarne in zvišujejo produktivnost. To so danes znana dejstva, katerih uspehi se že kažejo v panogah z najvišjo dodano vrednostjo.

K hitremu napredku omogočitvenih tehnologij je pripomogla tudi globalna COVID kriza in svetovne smernice k razogljičenju gospodarstva.

Nove proizvodne tehnologije v industriji cementa in betona nam omogočajo, da bomo dosegli 30 odstotkov zmanjšanja emisij ogljika, kar je potrebno za prispevanje

k globalnemu cilju ohranjanja temperatur za 1,5 stopinje Celzija, nad ravnjo iz predindustrijske dobe. To pomeni, da je treba razviti in uvajati tudi inovativne tehnologije, kot je na primer zajemanje, uporaba in shranjevanje ogljika (CCUS), optimizacija, racionalizacija procesov in ravnanje z odpadki. Mnoge od teh tehnologij so drage in še niso pripravljene za trg, rezultati razvojnih projektov, pa kažejo, da gremo v pravo smer. Razogljičenje okolja bi lahko sčasoma privedlo tudi do nižje splošne ravni porabe betona. Zato bi lahko z vidika proizvajalcev cementa in betona tisto, kar se je začelo kot vprašanje trajnosti, kmalu postalo izziv rasti panoge.

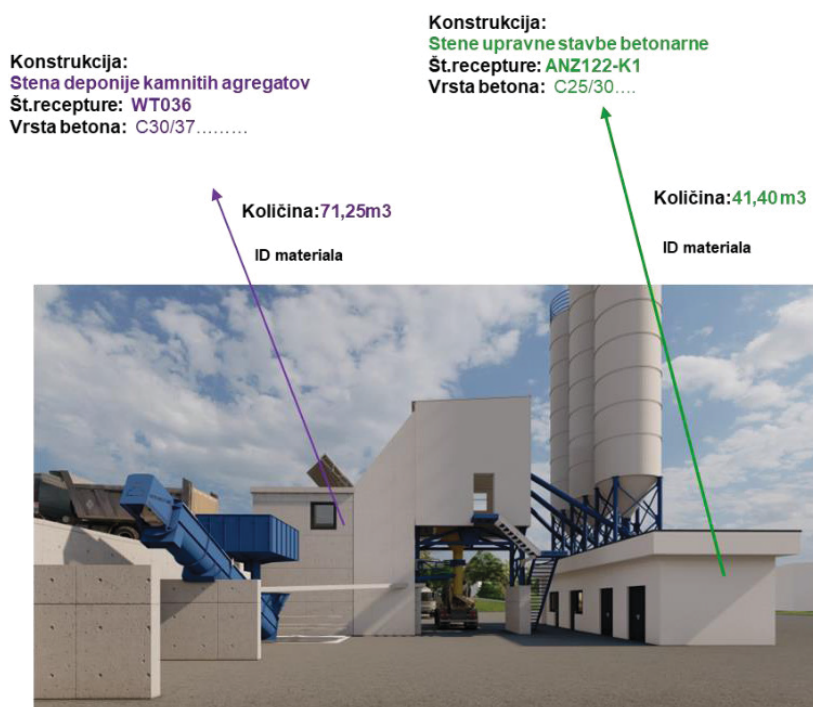
Celoten gradbeni ekosistem bo moral začeti razmišljati drugače. V ospredje se postavljajo materiali, tehnologije in njihovi vplivi na okolje in ljudi.

Že v fazi načrtovanja gradnje bo treba skrbno proučiti mesto gradnje, izbiro materialov, njihove količine, trajnostne vidike in verige vrednosti, s ciljem zmanjšanja vplivov na okolje. Zagotoviti bo treba sledljivost materialov, proizvodov, vse od nastanka, do razgradnje, za kar je zelo pomembna uvedba BIMa (Building Information Modelling) v načrtovanje, kot orodja za oblikovanje digitalnega modela od ideje, do obratovanja, vzdrževanja in končne reciklaže.

V fazi načrtovanja gradnje naše nove betonarne smo v ospredje postavili trajnostni vidik gradnje in trajnostne tehnologije, omogočivne tehnologije, s katerimi bomo spremljali delovanje betonarne in upravljanje betonarne.

Na področju materialov in novih betonskih mešanic smo v podjetju GIC GRADNJE že zelo aktivni, saj skrbimo za uvajanje okolju prijaznejših materialov v mešanice betonov (nizkoogljčni betoni), pri čemer je treba izpostaviti, da je beton 100 % reciklabilen material in da skrbimo, da so naše transportne poti čim krajše.

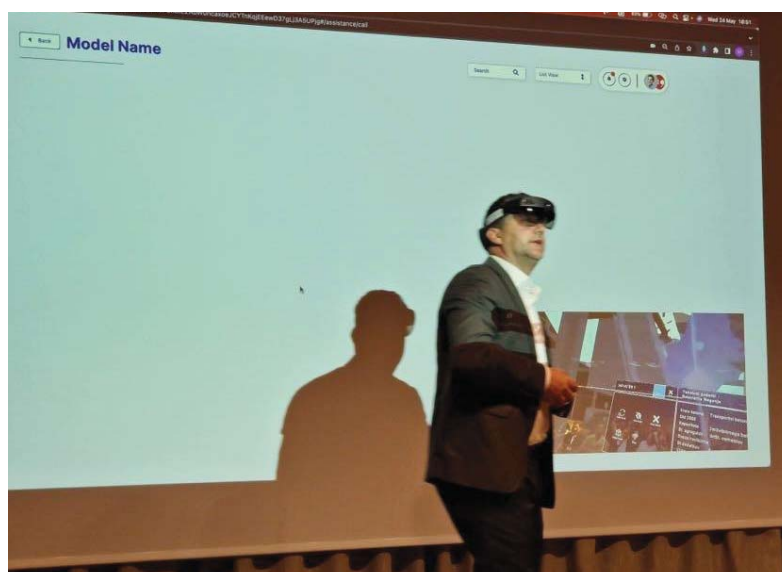
Za zagotavljanje načrtovanja vzdrževanja in delovanja betonarne se bomo poslužili VR (Virtual Reality) tehnologij, ki nam bodo na popolnoma nov, drugačen način pomagale pri izvedbi dnevnih kontrol v betonarni in pri izvajanju varstva pri delu.



Slika 1: Pogled v konstrukcijo s pomočjo VR tehnologije in uporabljenih materialov



Slika 2. BIM in VR tehnologije v fazi načrtovanja nove betonarne (digitalni dvojček)



Slika 3: Prikaz uporab VR tehnologije v procesu gradnje



**GIC GRADNJE**  
ROGAŠKA

ARHIVISION

»XR  
**ARGO**  
Know-how @ your fingertips

## Trajnostna gradnja, podprta z BIM ter VR tehnologijami

Dan ZBS 2023 – 20 let združenja, Lipica 24. – 25. maj 2023

**1**

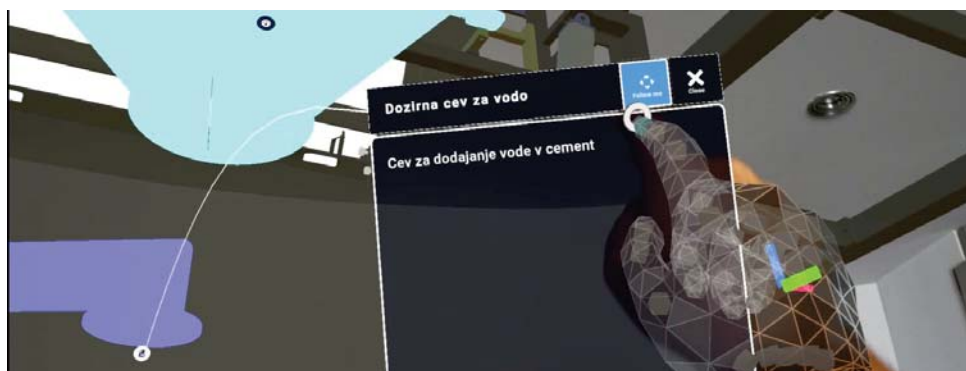
Gradbeništvo danes

**2**

Trajnostna gradnja

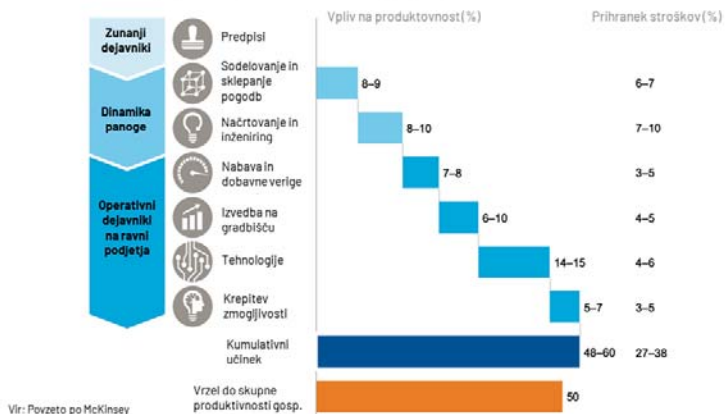
**3**

BIM in VR tehnologije



# 1 Gradbeništvo danes

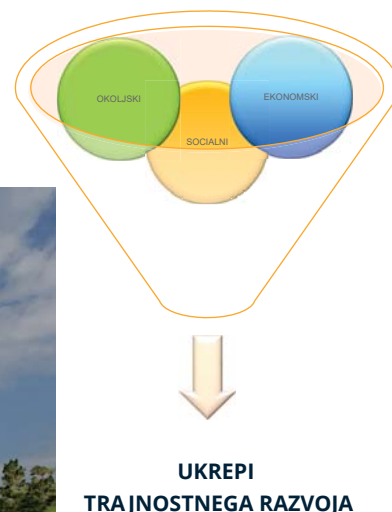
Potencial dviga globalne produktivnosti - najboljše prakse



## Izzivi:

- COVID 19
- Cene energentov
- Okoljski vidiki

# 2 Trajnostna gradnja





## Načrtovanje gradnje



Konstrukcija:  
Stena deponije kamnitih agregatov  
Št.recepture: WT036  
Vrsta betona: C30/37.....

Količina: 71,25m<sup>3</sup>

ID materiala

Konstrukcija:  
Stene upravne stavbe betonarne  
Št.recepture: ANZ122-K1  
Vrsta betona: C25/30.....

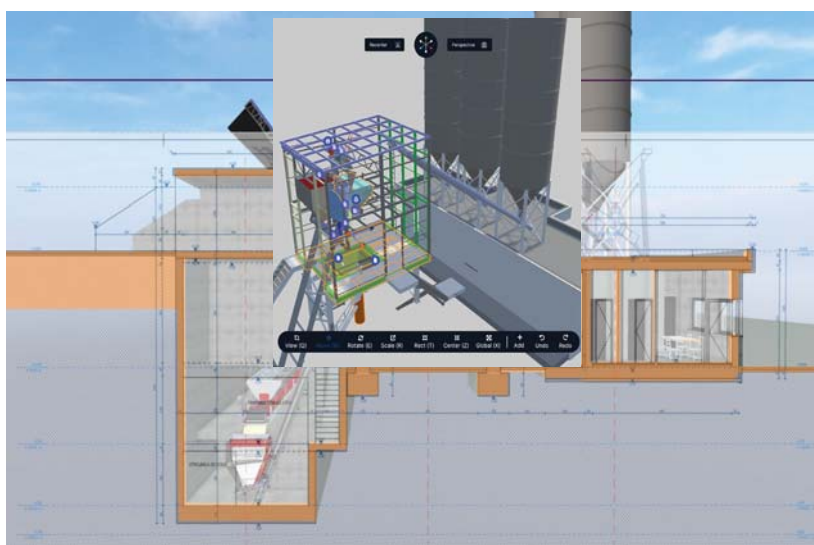
Količina: 41,40 m<sup>3</sup>

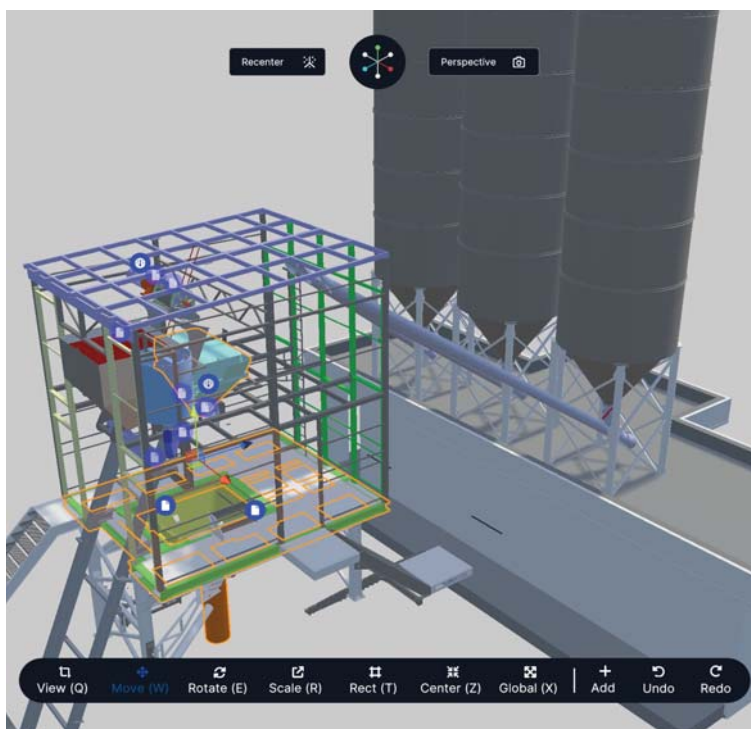
ID materiala



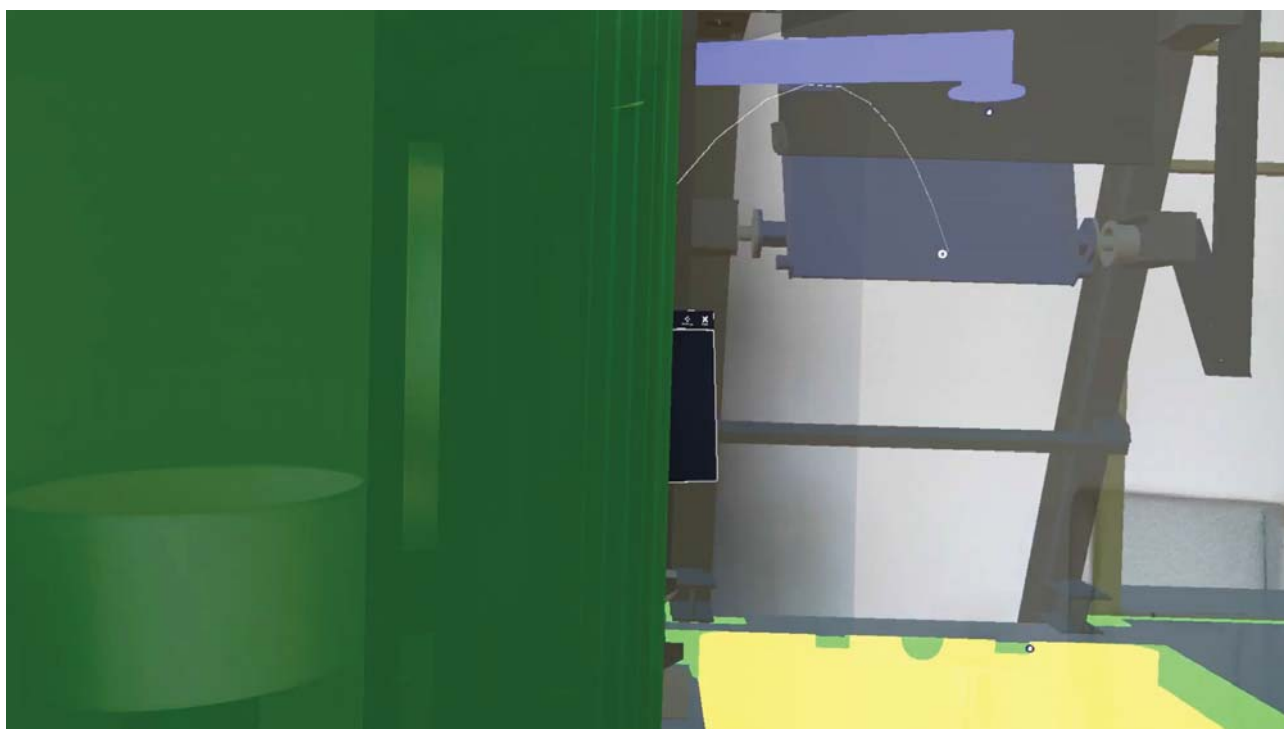
## 3 BIM in VR tehnologije

1. Nadzor nad delovanjem
2. Upravljanje delovanja
3. Varstvo pri delu





## Omogočitevne tehnologije





**GIC GRADNJE**<sup>®</sup>  
R O G A Š K A

[gradnje@gic.si](mailto:gradnje@gic.si)

03/81 82 830

[www.gic-gradnje.si](http://www.gic-gradnje.si)

*Tam, kjer se križajo potrebe sveta in tvoji talenti,  
tam je mesto tvojega poklica.*

*(Aristotel)*



Javni razpis „DIGITALNA PREOBRAZBA GOSPODARSTVA“



Javni razpis za spodbujanje velikih investicij za večjo  
dodano vrednost in konkurenčnost v Republiki Sloveniji

## Hvala za pozornost!

DR. DEJAN HRIBAR<sup>1</sup>, VEDRAN BEKRIĆ<sup>2</sup>,  
ANDREJ SAJE<sup>3</sup>, ALEKSANDER MRĐA<sup>3</sup>,  
MEDIN HEKIĆ<sup>3</sup>, KARL BOGATIN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>STRABAG – LABORATORIJ TPA

<sup>2</sup>TKK

<sup>3</sup>STRABAG

# Logistični center Sežana - Posebnosti izvedbe notranje MAB talne plošče



PREDAVATELJ  
DR. DEJAN HRIBAR



PREDAVATELJ  
VEDRAN BEKRIĆ



## 1 UVOD

Logistični center Sežana izvaja podjetje STRABAG, po sistemu "design & build". S svojimi 151 m širine in 409 m dolžine ter približno 65.000 m<sup>2</sup> uporabne površine bo največji logistični center in tudi eden največjih objektov v Sloveniji. Projekt zajema projektiranje in izvedbo gradbenih in obrtniških del, elektro in strojnih inštalacij, komunalne in tehnične infrastrukture ter zunanje ureditve. Objekt je plitvo temeljen s 320 čašastimi betonskimi temelji. Skladiščni del objekta je enoetažen, svetle višine 11,90 m. Upravni del centra, ki se nahaja na vzhodnem delu, je predviden v dveh nadstropjih. Armiranobetonska konstrukcija objekta je v celoti montažna, sestavljajo jo armiranobetonski stebri, prednapete votle plošče (v območju upravnega oz. pisarniškega dela in dela skladišča na severnem delu objekta), A-nosilci ter sekundarni nosilci, preko katerih se izvaja ravna streha. Industrijski tlak v objektu (notranja talna plošča) je mikroarmirani beton (MAB), debeline 18 cm. Končna obdelava površine MAB tlaka je s kvarčnim posipom, ki mora hkrati zagotavljati visoke standarde ravnosti za regalna skladišča. Za omenjen industrijski MAB tlak je bila zato pripravljena posebna receptura, ki je bila predhodno testirana in v času gradnje kontrolirana. Okoli objekta so v območju nakladalnih ramp predvidene armiranobetonske plošče debeline 25 cm namenjene težkemu tovornemu prometu. Poleg izgradnje objekta logističnega centra Sežana se izvajajo tudi parkirišče za osebna vozila, kompletna zunanja ureditev objekta ter izgradnja dostopnih poti s pripadajočo tehnično infrastrukturo na površini 75.000 m<sup>2</sup> (slika 1). Predviden zaključek izgradnje je junij 2023.



Slika 1: LC Sežana

## 2 NOTRANJA MAB TALNA PLOŠČA

### 2.1 Projektne zahteve in sestava MAB

Talna notranja plošča iz mikroarmiranega (MAB) betona je debeline min. 18 cm v velikosti 62.454 m<sup>2</sup> (hala). Dilatacijska polja so velikosti cca 24,0 x 24,0 m. Skladno s projekta dokumentacijo (statika) je zahtevan betona C30/37 in jeklena mikrovlakna tip Dramix 4D 80/60 BGE proizvajalca Bekaert skladno s EN 14889-1, sistem "1", strukturna uporaba. V statičnem izračunu je predpisana količina vlaken (v kg/m<sup>3</sup>). Ob tej količini vlaken je priporočena testiranje obnašanja (ang. Performance test) na prizmah po standardu EN 14651, CMOD metoda. Zahteve za omenjeno sestavo so:  $f_{R,1m} = 4.65 \text{ N/mm}^2$ ;  $f_{R,3m} = 5.25 \text{ N/mm}^2$ ;  $Re,1 = 97 \%$ ;  $Re,3 = 109 \%$ . Kolega Bekrić iz TKK je pripravil recepturo za predpisano MAB sestave C30/37, XC4, XD2, XF1, XA1, Dmax 22, S4 (št. PBST C30/37). Omenjen MAB se je proizvajal na betonarni P.G.M. Inženiring d.o.o., Sežana, ki je bila oddaljena cca 15–20 min od samega gradbišča. Zgoščanje se je vršilo z ročnimi igličnimi vibratorji. Na zahtevano utrjena in pripravljena tamponska tla se je položila PVC folija in vgradile sinusoidne jeklene dilatacije ter mozniki, kot je bilo predvideno v Načrtu dilatacij. Beton se je po drči spustil na površino, ki se je nato razprostrel s posebno strojno opremo s tehnologijo toge plošče z laserskim vodilom (ang. Laser scread). Na koncu se je izvedel kvarčni posip v predpisani količini in končno glajenje površine s "helikopterji".

### 2.2 Testno polje in prvo polje

Še pred pričetkom del so bila opravljena intenzivna testiranja na betonarni, tako svežega kot otrdelega betona. Prav tako sta se pred vgradnjo MAB izvedla dva testna polja (slika 2), ki sta potrdili omenjeno recep-



Slika 2: Testno polje

turo in način vgradnje betona. Preverili smo tudi način posipavanja kvarca na površino v predpisani količini in končnega glajenja površine s "helikopterji". Prvo polje MAB talne plošče je služilo kot osnova in bilo potrjeno s strani investitorja in nadzora za nadaljevanje del. Pri tem se je – poleg videza – preverjala ravnost površine po DIN 18202 (letev 1 m, toleranca 3 mm) in količina vidnih vlaken na površini.

### 2.3 Posebnosti izvedbe MAB talne plošče

V času gradnje so bile vremenske razmere zelo različne in občasno tudi neugodne (močan veter, nizke temperature), zato je bila nega betona ključna pri izvedbi. Vse je bilo podrejeno temu, da ne bi prišlo do plastičnih ali drugih nepričakovanih razpok (npr. vihanja plošče, razpok ob stebrih). Večinoma časa se je nega vršila s rahlim pršenjem vode na površino in pokrivanjem PVC folije (slika 3). Vsi ukrepi so bili predvideni v projektu izvedbe betonske konstrukcije (PIBK). Poleg omenjenih izzivov so bile tudi velike dnevne količine betona, ki so zahtevale posebno organizacijo izvajalca (slika 4).

### 2.4 Kontrola kakovosti

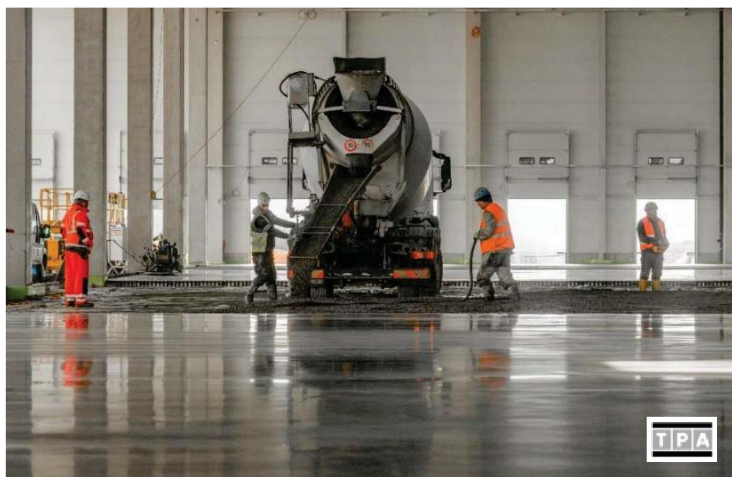
Kontrolo kakovosti, tako svežega kot rudi otrdelega betona, je izvajal Laboratorij TPA Ljubljana. Kontrola se je vršila na betonarni in na gradbišču. Sveži beton je imel konsistenco med 180–210 mm. Temperature betona so bile med 10–23 °C. Povprečna gostota betona je bila 2357 kg/m<sup>3</sup> in tlačna trdnost 46 MPa. Opravili so se tudi testiranje krčenja betona po EN 12390-16 in testiranje žilavosti po EN 14651, CMOD metoda. Rezultati so bili vsi ustrezni.

## 3 ZAKLJUČEK

Gradnja Logističnega center Sežana je bila tehnično in terminsko zahtevna. Posebnost je bila izvedba notranje MAB talne plošče zaradi njene velikosti, vremenskih razmer in posebnih zahtev investitorja po ravnosti (slika 5).



Slika 3: Nega talne MAB plošče s pokrivanje s PVC folijo



Slika 4: Vgradnja MAB talne plošče



Slika 5: Končni izgled notranje MAB talne plošče



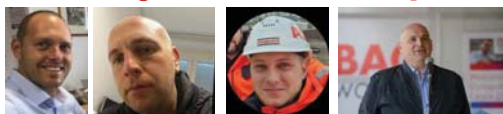
Dan ZBS 2023 - 20 let združenja

ZDRUŽENJE ZA BETON SLOVENIJE

**ZBS**

# Logistični center Sežana

## Posebnosti izvedbe notranje MAB talne plošče



dr. Dejan Hribar (STRABAG – Laboratorij TPA)

Vedran Bekrić (TKK)

Andrej Saje, Aleksander Mrđa, Medin Hekić, Karl Bogatin (STRABAG)

Lipica, maj 2023



Dan ZBS 2023 - 20 let združenja

2

## VSEBINA



- 1 Splošno o projektu
- 2 Notranja MAB talna plošča
  - 2.1 Sestava mešanice MAB talne plošče (TKK)
  - 2.2 Testno polje MAB talne plošče
  - 2.3 Posebnosti izvedbe MAB talne plošče
  - 2.4 Kontrola kakovosti MAB
- 3 Zaključek

© STRABAG





Dan ZBS 2023 - 20 let združenja

Logistični center Sežana

4

## 1. Splošno o projektu

**Lokacija:** Industrijska cona Sežana

**Investitor:** LOG Center A, d. o. o.

**Izvajalec del:** STRABAG, d. o. o.

**Obseg del:** Gradbeno-obrtniška in inštalacijska dela

**Trajanje del:** od maja 2022 do junija 2023

Logistični center Sežana izvaja podjetje STRABAG, d. o. o., po sistemu **design&build**. S svojimi 151 m širine in 409 m dolžine ter približno **65.000 m<sup>2</sup>** uporabne površine bo največji logistični center in tudi eden največjih objektov v Sloveniji.

Projekt zajema projektiranje in izvedbo gradbenih in obrtniških del, elektro in strojnih inštalacij, komunalne in tehnične infrastrukture ter zunanje ureditve.

Poleg izgradnje logističnega cetra se izvajajo tudi parkirišče za osebna vozila, kompletna zunanja ureditev objekta ter izgradnja dostopnih poti s pripadajočo tehnično infrastrukturo na površini **75.000 m<sup>2</sup>**.

© STRABAG

**STRABAG**  
WORK ON PROGRESS

**TPA**



Objekt je plitvo temeljen, s 320-imi čašastimi betonskimi temelji, trdnostnega razreda C30/37.

Armiranobetonska konstrukcija je v celoti montažna, sestavljajo jo armiranobetonski stebri, prednapete votle plošče (v območju upravnega oz. pisarniškega dela in dela skladišča na severnem delu objekta), A-nosilci ter sekundarni nosilci, preko katerih se izvaja ravna streha.

Ind. tlak v objektu je mikroarmirani beton (MAB) debeline 18 cm s kvarčnim posipom.

Velik izziv med gradnjo predstavlja teren s številnimi kraškimi jamami globine 40 do 60 m ter logistična organizacija.

© STRABAG



Izvedba temeljev ter priprave na montažo armiranobetonske konstrukcije



Montaža armiranobetonske konstrukcije



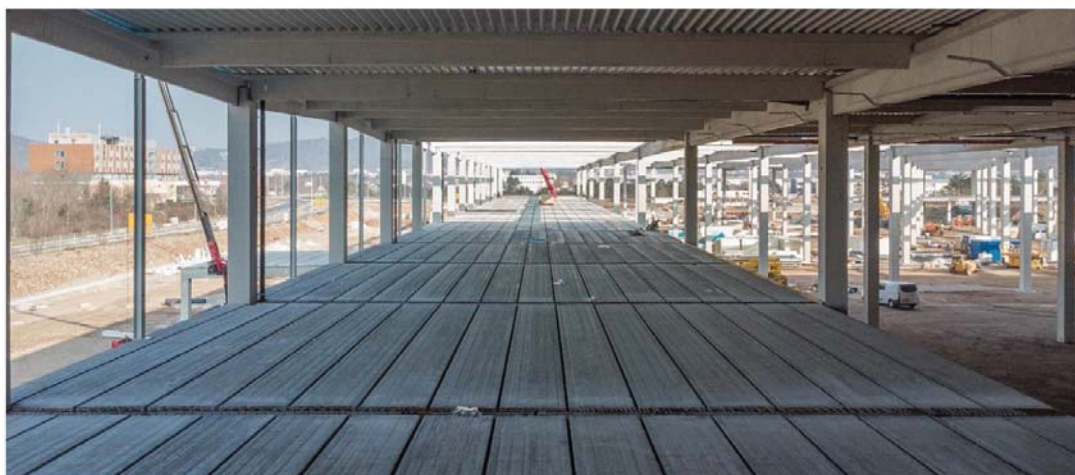
© STRABAG



Dan ZBS 2023 - 20 let združenja

Logistični center Sežana

7



Izvedba medetažne montažne plošče

© STRABAG

**STRABAG**  
 WORK ON PROGRESS
 

|   |   |   |
|---|---|---|
| T | P | A |
|---|---|---|

Dan ZBS 2023 - 20 let združenja

Logistični center Sežana

8

Konstrukcijo obkroža armiranobetonski parapetni zid višine 120 cm in debeline 15 cm, na katerem sloni fasada iz t. i. »sendvič« panelov. Na severni in južni strani objekta je predvidenih 105 nakladalnih ramp za tovorna vozila. Okoli objekta so v območju nakladalnih ramp predvidene armiranobetonske plošče debeline 25 cm za težek promet, na transportni poti pa asfaltno vozišče.



Izvedba parapetnih zidov okoli objekta. Betonaža zunanjih armiranobetonskih plošč.

© STRABAG

**STRABAG**  
 WORK ON PROGRESS
 

|   |   |   |
|---|---|---|
| T | P | A |
|---|---|---|

Dan ZBS 2023 - 20 let združenja

Logistični center Sežana

9



Elementi ravne strehe. Izvedena streha.

© STRABAG



Dan ZBS 2023 - 20 let združenja

Logistični center Sežana

10



Skladiščna hala s pripadajočimi inštalacijami.

© STRABAG







Dan ZBS 2023 - 20 let združenja

Logistični center Sežana

12

## 2. Notranja MAB talna plošča

Talna plošča iz mikroarmiranega betona debeline **min. 18 cm** in **dilatacijska polja 24,0 x 24,0 m**.

### Povzeto iz projekta – statike:

Concrete class C30/37 (EN) concrete age at loading 28 days  
 Dramix® Steel Fibre Concrete  
 Dramix® type 4D 80/60BGE (EN 14889-1, system "1", structural use) dosage 30 kg/m<sup>3</sup> (recommended dosage for performance testing) beam testing according to EN 14651; Zahteve: f<sub>R,1m</sub> = 4.65 N/mm<sup>2</sup>; f<sub>R,3m</sub> = 5.25 N/mm<sup>2</sup>; Re,1 = 97 %; Re,3 = 109 %

**Ravnost površine: DIN 18202 (letev 1m, toleranca 3mm)**



© STRABAG

**STRABAG**  
WORK ON PROGRESS

**TPA**





## 2.2 Testno polje MAB talne plošče

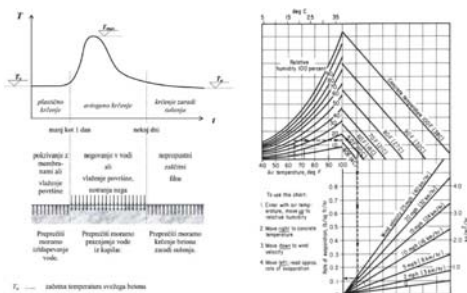


© STRABAG



## 2.3 Posebnosti izvedbe MAB talne plošče

- Ključni izzivi med gradnjo:
  - tempo in velike dnevne količine (300-600 m<sup>3</sup>/dan)
  - močan veter
  - nizke temperature
  - ravnost površine in omejeno število vlaken na površini



© STRABAG





Dan ZBS 2023 - 20 let združenja

Logistični center Sežana

18

## 2.4 Kontrola kakovosti MAB talne plošče



© STRABAG

**STRABAG** TPA  
WORK ON PROGRESS





**Hvala za pozornost  
in srečno ljubitelji  
betona!**



Kontakt:  
dr. Dejan Hribar  
Tel. +386 30 318 312  
E-mail: [dejan.hribar@tpaqi.com](mailto:dejan.hribar@tpaqi.com)  
[www.tpaqi.com](http://www.tpaqi.com)





DR. SABINA DOLENEC, DR. ALJOŠA ŠAJNA,  
DR. MATEJA GOLEŽ

ZAG

# Beton v kontekstu dediščine 20. stoletja



PREDAVATELJICA  
DR. MATEJA GOLEŽ

## UVOD

Področje raziskav historičnih betonov predstavlja v Sloveniji dokaj novo raziskovalno področje, ki vključuje sistematično obravnavo v smislu karakterizacije historičnih betonov in betonskih proizvodov, predvsem za potrebe prenove številnih objektov arhitekturne dediščine 20. stoletja. Raziskovalno področje je aktualno zlasti s stališča ohranjanja vidnih betonov v primeru, ko je zgradba predvidena za energetske sanacije (Adamič, 2014), ker je treba ohranjati prepoznavnost arhitektovega avtorskega dela tudi po prenovi, kakor tudi takrat, kadar je treba sanirati armiranobetonsko konstrukcijo ali nadomestiti dotrajano betonsko kritino z novo. Širina problematike, ki jo rešujemo z različni pristopi, zahteva interdisciplinarno delo različnih strokovnjakov predvsem zato, da se poišče najboljša rešitev za prenovu objektov kulturne dediščine, ter da skozi različna članstva v strokovnih združenjih sledimo svetovnim trendom reševanja te problematike.

Izum in patentiranje portlandskega cementa, je v gradbeništvu odprlo široke možnosti gradnje visokih in vitkih zgradb, kupolastih elementov večjih dimenzij, mostov, vodnih pregrad, vodnih zbiralnikov, visečih fasad, kritine, kakor tudi izdelavo urbanega pohištva, betonskih plastik in najrazličnejših dekorativnih elementov (Maecosec al., 2016). Beton je sicer material, ki so ga s svojimi arhitekturnimi mojstroviniami zaznamovali že v času rimskega imperija (<http://archserve.id.ucsb.edu/courses/arhistory/152k/concrete.html>), kot sodoben material, pa je bil najprej odmevno predstavljen skozi dela francoskega arhitekta modernega gibanja 20. stol. Le Corbusiera (Cohen, 2014). Njegova slovenska sodobnika sta bila arhitekta Maks Fabiani (1865–1962)

in Jože Plečnik (1872–1957), ki sta s svežim slogom ustvarila bogat opus moderne arhitekturne dediščine 20. stol. v Sloveniji, na Dunaju (Avstrija) in v Pragi (Češka). Za slovenske moderniste in z njim povezano arhitekturno dediščino 20. stol je pomemben tudi Le Corbusierjev učenec, arhitekt Edvard Ravnikar (1907–1993), ki je deloval v času po drugi svetovni vojni in kateremu posvečamo letošnje leto, Ravnikarjevo leto.

Slovenija ima dolgoletno tradicijo žganja cementnega klinkerja, saj sega zagon prve cementarne v Trbovljah že v leto 1876 (Gligić, 2011). Razmah uporabe cementnih materialov oz. betona v slovenskem prostoru je zaznati po potresu v Ljubljani, ko se leta 1886 pojavi nova obrt, in sicer izdelovanje umetnega kamna in betonskih predmetov, ki so bili znatno cenejši od naravnega kamna (Gjura & Flis, 1986). Prelomnico v vrednotenju betona kot vizualne kvalitete naj bi predstavljal Zmajski most, zgrajen leta 1901, kjer beton ni le v vlogi nadomestka kamna in ostalih gradiv. V ljubljanskem prostoru se je beton kot enakovredno gradivo uveljavil šele med obema vojnoma, predvsem pri mostovih, ki jih je načrtoval arhitekt Jože Plečnik (Gjura & Flis, 1986, 1989). Pojavi se tudi teraco, ki ga polagajo v prostore, ki niso določeni za bivanje, predvsem veže, hodnike in kuhinje (Gjura & Flis, 1989). Teraco je bil v Sloveniji in po svetu zaradi obstojnosti, ekonomskih in estetskih razlogov zelo razširjen predvsem v letih od 1920 do 1950.

Slovenska strokovna javnost si prizadeva k ohranjanju izjemnih arhitekturnih del v skladu z mednarodnimi aktivnostmi, ki potekajo pod okriljem DOCOMOMO (International working party for the documentation and conservation of buildings, sites, and neighborhoods of the modern movement) (<https://www.docomomo-us-mn.org/>), kakor z nacionalnimi predpisi s področja varovanja arhitekturne dediščine 20. stol. (Ivanc, 2012). K temu v veliki meri prispevajo prav raziskave historičnih betonov. Betoni so vgrajeni v notranjosti kakor v zunanosti objektov, pri čemer se je z načinom izvedbe lesenih opažev ter z različno barvo in zrnavostjo agregatov poudarila tudi estetska moč betona kot vidnega betona (Chu, 2012). Raznolikost sestave betonskih mešanic se odraža tudi na mikronivoju in je posledica razvoja različnih tehnologij žganja cementnega klinkerja skozi čas, vključno z mineralnimi dodatki, kot so to umetni pucolani (French, 1991, Taylor et al., 2010). Ker so v preteklosti betonske mešanice pripravljali gradbeni mojstri skupaj z arhitekti, njihove recepture niso zapisane (<http://uifs.zrc-sazu.si>), zato nadomestni betoni predstavljajo nov raziskovalno-razvojni izziv, s katerim se soočamo pri vzdrževanju objektov kulturne dediščine v skladu s konservatorskimi načeli.

## BETON PLEČNIKOVE DEDIŠČINE

V prispevku predstavljamo rezultate preliminarnih raziskav cementnih materialov, ki jih je pri svojih delih uporabljal arhitekt Jože Plečnik. Namen študije, ki nastaja v

povezavi z Zavodom za varstvo kulturne dediščine Slovenije, je ugotoviti njihovo sestavo oz. vrsto uporabljanih materialov – tj. sestavo agregata in veziva. V tej fazi smo se osredotočili na izbrane spomenike v Ljubljani. Vzorce smo odvzeli iz zunanjih cementnih elementov (strešnik, ograja, kapa zidu, zunanji zid, steber) na treh spomenikih, ki so razglašeni za spomenik nacionalnega pomena: Tromostovje (1931–1932), Križanke (1951–1956) in Čevljarški most (1931–1932). Julija 2021 pa sta bila Čevljarški most in Tromostovje vpisana tudi na Unescov seznam svetovne dediščine v okviru vpisa Dela Jožeta Plečnika v Ljubljani – urbano oblikovanje po meri človeka.

Na podlagi rezultatov ugotavljamo, da se preiskani vzorci cementnih materialov iz izbranih objektov Plečnikove dediščine v Ljubljani razlikujejo glede na vrsto veziva in agregata. Po uporabljenem agregatu se delijo na tri različne skupine, in sicer na vzorce s prevladujočim dolomitnim agregatom, vzorce s prevladujočim apnenčevim agregatom ter vzorce z agregatom iz dolomita in apnenca. Glede na vezivo ločimo vzorce s hidravličnim vezivom iz običajnega portlandskega cementa ter vzorce z granulirano plavžno žlindro kot dodatkom običajnemu portlandskemu cementu. V nekaterih vzorcih so prisotne številčne pore, kar verjetno nakazuje, da v teh primerih ne gre za izvorni material. Namreč, v osemdesetih letih prejšnjega stoletja so za nadomeščanje betonskih elementov na nekaterih objektih, bodisi deloma, bodisi v celoti, uporabili t. i. visokoeirirani beton oz. penobeton (Gjura & Flis, 1986).

## RAZVOJ STREŠNIKOV IZ RECIKLIRANEGA BETONA

Ponovna uporaba gradbenih materialov za gradnjo objektov ali za njihovo vzdrževanje je proces, ki je v graditeljstvu prisoten že od pojava prvih zidanih objektov pa vse do danes. Časovna oddaljenost od prvih primerov ponovnega vgrajevanja gradbenih materialov do danes pa kaže bistvene razlike predvsem v načinu dostopanja do mineralnih surovin, kakor tudi med navidezno neomejenimi zalogami v preteklosti ter občutnim zmanjšanjem v začetku 21. stoletja. Prav zaradi zmanjšanja zaloga je še kako pomembno, da v sodobnem gradbeništvu posegamo po materialih, ki jih lahko recikliramo in ponovno vgradimo, pri čemer morajo reciklirani materiali ustrezati vsem veljavnim standardom za zagotavljanje kakovosti gradbenih proizvodov pred ponovno vgradnjo, kakor tudi kriterijem za zmanjšanje vplivov na okolje v procesu njihove proizvodnje. Strokovna javnost zato pospešeno išče rešitve za uporabo alternativnih gradbenih materialov, med katere sodi tudi recikliran historični beton za potrebe prenove objektov arhitekturne dediščine 20. stoletja.

V vsakdanji konservatorsko-restavratorski praksi se čedalje pogosteje srečujemo s problematiko prenove objektov kulturne dediščine z betonsko strešno kritino.

Pred časom je bila tako zamenjana betonska kritina na treh Plečnikovih cerkvah, cerkvi sv. Florjana v Srpenici na Bovškem, cerkvi sv. Mihaela na Barju ter na cerkvi sv. Cirila in Metoda v Ljubljani, prenovitvena dela pa se bodo nadaljevala tudi v prihodnje.

Betonski strešniki, ki jih poznamo pod imenom eternit, so večinoma dobre kakovosti tudi po skoraj sto letih izpostavljenosti zunanjim vplivom in le redki kažejo takšno stopnjo degradiranosti, da jih je treba nadomestiti z novimi. Kadar gre za potrebe zamenjave manjšega števila betonskih strešnikov je najučinkoviteje, ekonomsko najugodnejše in najkakovostnejše, da degradirane strešnike recikliramo, agregat iz recikliranega betona pa vgradimo v nove strešnike v primeru, da rezultati predhodnih laboratorijskih testiranj ne kažejo negativnih vrednosti parametrov pomembnih za zagotavljanje kakovosti gradbenih proizvodov.

V okviru projekta MACC (Konservatorski center modernih in sodnih umetnosti, postavitve Laboratorija za raziskave arhitekturne dediščine 20. stol. na ZAG) so bili na inovativen način razviti in testirani betonski strešniki, pri čemer je bil uporabljen agregat, pripravljen iz recikliranih historičnih betonskih strešnikov, kar poleg trajnostnega upravljanja z naravnimi viri bistveno prispeva k zmanjšanju emisij CO<sub>2</sub>, ki jih povzročata cementna industrija, kakor tudi k zagotavljanju integritete objektov kulturne dediščine po prenovi, saj se v recikliranem agregatu ohranjajo fragmenti originalne betonske kritine tudi v prihodnje. Iz zbranih rezultatov testiranj betonskih strešnikov iz recikliranega betonskega agregata lahko zaključimo, da so v skladu z zahtevami standarda EN 491:2011, zato so ustrezen gradbeni proizvod za prekrivanje streh. Predlagana metoda predstavlja inovativen način pristopanja k prenovi objektov kulturne dediščine, ki imajo dotrajano betonsko kritino in je uporabna tako za zahtevnejše primere prenove, kamor sodi zapuščina arhitekta Jožeta Plečnika, kakor tudi za vzdrževanje objektov ljudske arhitekture na slovenskem podeželju.

## LITERATURA

- Adamič T. 2014: Konservatorska izhodišča za prenavo vidnih betonov. 21. Slovenski kolokvij o betonih, 69 pp., Ljubljana.
- Chu, Y., Zhen, Z., 2012: Analysis and application of concrete's aesthetic characteristics. *Advanced Materials Research*, 598, p. 459–462.
- Cohen, J.-L. (2014). Le Corbusier's Modulor and the Debate on Proportion in France. *Architectural Histories*, 2(1), Art. 23.
- French, W.J. Concrete petrography: a review. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 1991, 24 (1), pp. 17–48
- Gjura, J., Flis, A. 1986: Penobeton kot alternativa betonu pri prenovi (V: Jugoslovensko svetovanje o sanaciji zgrada), 121–125.
- Gjura, J., Flis, A. 1989: Visokoairani betoni v sanacijskih in restavratorskih delih. -*Gradbeni vestnik*, 38 (11/12), 284–286.
- Gligič, D. 2011: Zgodovinski pregled proizvodnje cementa in uporabe betona v Sloveniji, diplomsko delo. -FGG-Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 70 pp.
- Ivanc, T., 2012: Varstvo nepremične, kulturne dediščine, pravna ureditev, Ljubljana, 439 pp.
- Maecos, I. et al., 2016: Central lessons from the historical analysis of 24 reinforced-concrete structures in northern Spain. *Journal of Cultural Heritage*. <http://dx.doi.org/10.1016.03.003>
- Taylor, R.; et al. Composition and microstructure of 20-year-old ordinary Portland cement-ground granulated blast-furnace slag blends containing 0 to 100% slag. *Cement and Concrete Research* 2010, vol. 40 (7), p. 971–983.
- Wei, S., Jiang, Z., Liu, H., Zhou, D., Sanchez-Silva, M. 2013. Microbiologically induced deterioration of concrete: a review. *Braz. J. Microbiol.* 44

## KONSERVATORSKO-RESTAVRATORSKI POSTOPKI

Beton, čeprav vsestranski in zato prevladujoč v gradbeništvu, je dovzeten za biorazgradnjo in propadanje (Wei et al., 2013). Danes, skoraj stoletje po izgradnji Plečnikovih del, so ta vidno poškodovana. Poškodbe niso le estetske (razraščanje mikroorganizmov, razbarvanje), ampak se kažejo tudi v spremembah in poslabšanju fizikalno-mehanskih lastnosti ter nastanku razpok. Za te spomenike so potrebni konservatorski/restavratorski ukrepi, da se ohranijo za naslednje generacije. Ker je vse več betonskih zgradb uvrščenih med spomenike, so potrebne ustrezne tehnike in materiali za izpolnitev restavratorsko-konservatorskih zahtev. Pri tem se v povezavi s strokovnjaki Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani poslužujemo tudi mikrobioloških tehnik.

## ZAHVALA

Raziskava je sofinancirana v okviru ARRS raziskovalnega programa P2-0273: Gradbeni objekti in materiali ter Ministrstva za kulturo. Projekt MACC je bil sofinanciran iz programa INTERREG ITA-SLO 2007–2013.

URH STARINA, URŠKA ŽONTA

GORENJSKA GRADBENA DRUŽBA

# Vidni betoni na projektu Muzej sodobne umetnosti Bled



PREDAVATELJICA  
URŠKA ŽONTA

## POVZETEK

Gorenjska gradbena družba izvaja objekt muzej sodobne umetnosti na Bledu. Objekt bo namenjen skladiščenju in razstavi zasebne umetniške zbirke na približno 2500 m<sup>2</sup> notranjih površin.<sup>1</sup>

Na objektu je bil zahtevan s strani projektanta sistem bele kadi, kar v praksi pomeni kesonska konstrukcija, ki je sposobna prenašati obremenitev talne vode brez hidroizolacije. V osnovi zahteva takšna betonska konstrukcija izpolniti sledeče zahteve:

- debelina elementov betonske konstrukcije mora znašati minimalno 30 cm,
- treba je učinkovito tesniti vse delovne stike in preboje,
- sistem tesnjenja mora biti med seboj povezan v vseh točkah,
- uporabljen mora biti vodotesni beton (minimalni kriteriji PV-II),
- vgradnja betona mora biti kvalitetna, predvsem mora biti področje vseh delovnih stikov popolno zalito, z zdravim betonom,
- razpoke morajo biti pod podanim kriterijem širine, da ne prepuščajo vode oz. se same zacelijo.<sup>2</sup>

Pri izvedbi bele kadi je obvezno tesnjenje šibkih točk v armiranobetonskih konstrukcijah. To so delovni stiki med fazami posameznih betoniranj, dilatacije, juvidurke, distančniki ...

<sup>1</sup> Projektna dokumentacija O/1 Vodilni načrt arhitekture (PZI), avtor arhitekture: David Chipperfield Architects

<sup>2</sup> Lespatex, <https://www.lespatex.si/gradbenstvo/tesnjenje-delovnih-stikov-in-dilatacij-bela-kad/>



Slika 1: Vizualizacija muzeja sodobne umetnosti<sup>3</sup>

Slika 2: Prikaz tesnjenja delovnega stika



Slika 3: Brušen in štokan vidni beton

Zunanje nosilne stene so vidne in hkrati predstavljajo fasado objekta, zato je bilo treba nameniti posebno pozornost izgledu vidnega betona, ki je izbran material za ovoj stavbe. V betonski mešanici za vidni beton se vključuje tudi agregate iz lokalnega vira (savski prodec). Za tesnjenje lukenj od povezav za opaže (juvidur cevi) je bila pripravljena posebna betonska mešanica (prikazano na sliki spodaj). Iz standarda, ki predpisuje omejitve razreda obdelave vidnega betona VB 4 je razvidno, da opazovalec, ki je na razdalji 2 m od stene zračnih luknjic in tesnitev juvidur cevi skoraj ne opazi.



Slika 4: Zapolnjena cev pred in po brušenju

#### RAZRED OBDELAVE VB 4:

- Standard predpisuje največjo zračno luknjico površine  $0,25 \text{ m}^2$  (premer 5,64 mm) in globine manj kot 2 mm,
- omejuje skupno površino vseh zračnih luknjic na 1,2 % celotne površine,
- omejuje koncentrirane zračne luknjice na opazovanem delu površine na največ 2,5 % opazovanega dela površine.

Vse vidne betone fasade VB 4 se obdela z brušenjem do globine 4–5 mm in grobim štokanjem. Po brušenju in pred štokanjem se je izvedlo kitanje površine – zapolnjevanje zračnih luknjic in lukenj od distančnikov opaža, z barvno usklajeno polimerno maso namenjeno zunanji uporabi.

<sup>3</sup> Petra Mlakar, Dnevnik, <https://www.dnevnik.si/1042988764> - 10. 05. 2022

Težko dostopni deli, kot npr. napušči, so se finalno obdelali s peskanjem. Po štokanju je bilo treba vidne betonske površine tudi zaščititi z ustreznimi premazi. Po projektu je bila prvotno zahtevana izvedba s folijo za preprečevanje mehurčkov, ki se jo pritrdi na opaž oz. na vezano ploščo na opažu pred betoniranjem, vendar je po preizkusih bilo ugotovljeno, da je po brušenju stene v notranjosti še vedno enako zračnih mehurčkov kot bi bilo brez nje, folija je pozitivno vplivala zgolj na površino pred obdelavo z brušenjem in štokanjem.

Opaženje vidnih betonskih površin je moralo biti podrejeno zahtevanemu razredu vidnega betona VB 4. Zaradi visokih faz betoniranja so morali biti uporabljeni ustrezni opaži, ki so sposobni prenesti večje obremenitve. Vsi elementi opaženja so se izvedli z okvirnim panelnim stenskim opažem MASTER (sistemski opaži) proizvajalca Ringer. Zaradi posebnih zahtev v skladu s standardom SIST EN 13670 za VB 4 se na gradbišču preko opažnih panelov privijači nova vodoodporna plastificirana vezana plošča debeline 21 mm. Vezane plošče se je po vijačenju namazala z opažnim oljem, ki preprečuje, da bi se beton sprjel z opažem. Arhitekturna zahteva pri betoniranju ovoja stavbe je bila, da so vsi delovni stiki ter stiki vezanih plošč na določenih višinah in razmakih, kar je otežilo izvedbo. Luknje od distančnikov (juvidur cevi za pritrjevanje opaža) so bile na točno določenih mestih – na sredini vezanih plošč, v rastru 2,70 m višine in 1,20 m širine.



Slika 5: Tesnilni trak



Slika 6: Privijačene vezne plošče

## REŠEVANJE DETAJLOV IZVEDBE

### 1. Reševanje problema segregacije na območju pod odprtini

Pri betoniranju stene bi se pojavil problem pojava segregacije pod okenskimi odprtini. Zaradi že omenjene zahteve, ki pravi, da morajo biti delovni stiki na prej določenih pozicijah, se betonaža izvede v enem kosu, kjer je odprtina v celoti pod delovnim stikom, kar pomeni da je v opažu. Detajl se je rešil tako, da so se v deske špalete zvrtaile luknje in pritrčila gibljiva cev, po kateri je beton pri betoniranju potoval do dna odprtine. S tem detajlom se je rešil problem prostega pada betona in pojav segregacije. Cevi so omogočile tudi vibriranje betona pod odprtino – lahko se je spustila vibratorska igla do dna. Pri betoniranju je prihajalo do težave, da je bila pregosta armatura, da bi lahko vtaknili kontraktorsko cev skozi njo, in s tem dosegli pogoj prostega pada betona največ 1 m. To se je rešilo z odmikanjem armature.



Slika 7: Cevi in postavljen opaž



Slika 8: Po betonaži



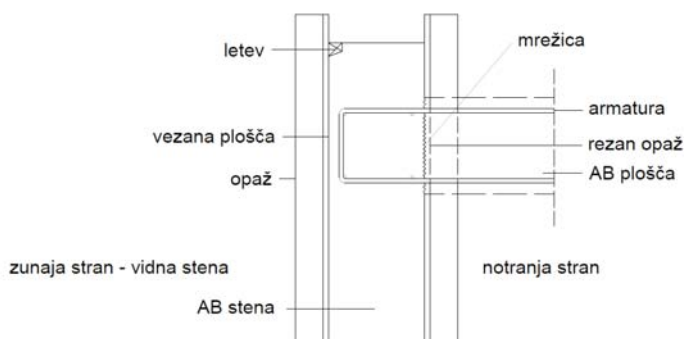
Slika 9: Odrezane cevi po betonaži



## 2. Stik plošča – stena

Zaradi enake zahteve je bila izvedba otežena pri stiku AB stene in plošče. Ker je bil delovni stik predviden 10 cm nad pozicijo plošče, je bilo treba opaž AB zidu narediti tako, da priklopna armatura (odprta stremena) še vedno gleda iz stene. Da se je to doseglo, je bilo treba rezati pas opaža (prikazano na spodnji sliki). Pri opaženju je bilo treba s pomočjo dvigala postaviti najprej opažne panele vzporedno s steno približno 2 metra stran zaradi stremen, in nato horizontalno prenesti opaž k steni.

Letev se je na zunanjo stran stene (vidni del) vgradila zaradi lepšega zaključka betona (delovnega stika). Nameščanje letve v opaž in tesnjenje le te je moral biti izveden tako, da dobimo lepe in ravne stike elementov (brez iztekanja vode in cementnega mleka). Pri vgradnji betona v tak element je treba poskrbeti, da je površina betona poravnana in sega preko letvice (poravnana z zgornjim robom ali sredino letvice, odvisno od dimenzije letvice).<sup>4</sup>



Slika 10: Skica detajla



Slika 11: Pripravljen opaž



Slika 12: Po razopaženju

## 3. Dvojni opaži pri špaleti

Pri preizkusih se je ugotovilo, da se robi betonov odprtih hitro odkrušijo po brušenju in štokanju. Ker so čela oken in vrat poravnana z zunanjo stranjo steno, je zelo pomembno da je ta del ravno zaključen, brez zračnih mehurčkov, odkruškov ipd. Detajl se je rešil tako, da se je izvedel dvojni opaž. Prva deska na zunanjem delu odprtine je bila čez celotno širino stene, druga, na notranji strani pa 3 cm krajša. Tako je po betoniranju ostal zob dimenzij 3 cm x 3 cm na zunanji strani stene. Po brušenju in štokanju se je rob odrezal, in tako je ostal je raven, brez odkruškov.



Slika 13: Prikaz zaključka stene brez dvojnega opaža



Slika 14: Prikaz zoba

<sup>4</sup> Rok Ercegovič, univ.dipl.inž.grad, dr. Jakob Šušteršič, univ.dipl.inž.grad., Projekt izvajanja betonske konstrukcije (Irma d.o.o.)



# Vidni beton

na projektu  
Muzej sodobne umetnosti  
Bled

---

URH STARINA IN URŠKA ŽONTA

## O projektu

---



- lokacija
- namen
- velikost
- zahteve projekta



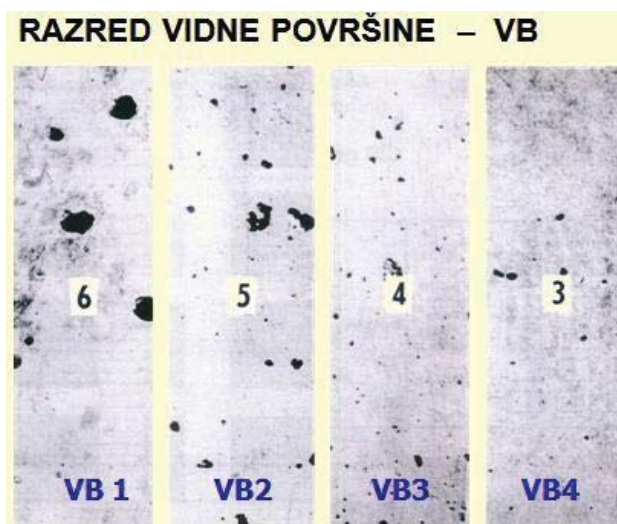
## Bela kad

- pomen
- zahteve
- šibke točke



### Zahteve vidnega betona – razred obdelave

- VB 0 – osnovna obdelava
- VB 1 – navadna obdelava
- VB 2 – enostavna obdelava
- VB 3 – posebna obdelava
- VB 4 – posebna obdelava



## Zaključna obdelava vidnih sten



- brušenje
- kitanje
- grobo štokanje



## Priprava in tesnost opažev

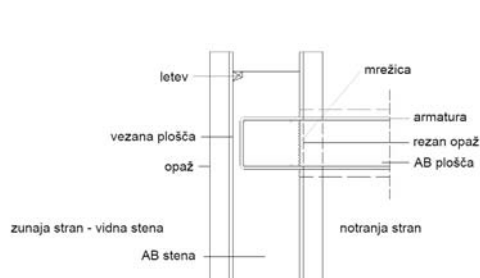
- vrsta opažev
- plastificirana vezana plošča
- tesnjenje:
  - na dnu opaža
  - vertikalnega delovnega stika
  - vezave opaža



## Detajl: reševanje problema segregacije na območju pod odprtini



## Detajl: stik stena - plošča



## Detajl: dvojni opaž pri špaleti

- preizkus na testnem polju
- ugotovitve
- izvedba na gradbišču



## Detajl – žleb

- izvedba
- posebni strešniki
- obdelava



10.7.2023



## Zaključek



JERNEJ GABERC

GORENJSKA GRADBENA DRUŽBA

# Naravne hidravlične apnene malte ojačane s konopljinim pezdirjem z dodatkom pucolanskih materialov in portlandskega cementa

---



## POVZETEK

V prispevku je na podlagi pregledanih člankov in laboratorijskih preiskav predstavljena raziskava izdelanih receptur apnenih konopljinih malt in materialov, ki jih sestavljajo. Raziskali smo fizikalne, mehanske in trajnostne lastnosti pripravljenih receptur z dodatki granulirane plavžne žindre in portlandskega cementa 42,5 N, z vsebnostjo 5 % mase konopljinoga pezdirja namesto agregata (zrnavosti 0/4 mm). Iz dobljenih rezultatov smo ugotovili, da na lastnosti konopljinih malt v otrdelem stanju vplivajo lastnosti konopljinoga pezdirja ter vrste uporabljenih veziv. Konopljin pezdir z manjšo, tako povprečno kot tudi najdaljšo dolžino posameznega delca, nižjo vsebnostjo vlaken ter višjo vodovpojnostjo dosega višje tlačne trdnosti v otrdelem stanju kompozita. Na otrdelih pripravljenih vzorcih smo opravili preiskave tlačnih in upogibnih nateznih trdnosti, od katerih so v obeh primerih najboljše rezultate dali vzorci z dodatkom portlandskega cementa in najslabše tisti z dodatkom mlete granulirane plavžne žindre. Preverjali smo protimikrobno učinkovitost pripravljenih vzorcev v otrdelem stanju, kjer sta cono inhibicije razvila vzorca z dodatkom deleža cementa in dodatkom cementa skupno z žlindro v vezivu. Od pripravljenih receptur je TGA/DSC pokazala, da ima največji masni delež  $\text{CaCO}_3$  in najmanjši masni delež  $\text{Ca(OH)}_2$  vzorec z dodatkom cementa. Primerjava raziskav LCA pri različnih parametrih je dokazala, da je konopljin beton, sestavljen iz konopljinoga pezdirja, veziva in vode, v svojem življenjskem ciklu ogljično negativen, iz česar lahko sklepamo, da imajo tudi pripravljene recepture nižji ogljični odtis zaradi dodatka konopljinoga pezdirja.

### KLJUČNE BESEDE:

konopljin beton, konopljin pezdir, mleta granulirana plavžna žindra, portlandski cement, analiza življenjskega cikla konopljinoga betona

## HEMP SHIVES REINFORCED NATURAL HYDRAULIC LIME MORTARS WITH THE ADDITION OF POZZOLANIC MATERIALS AND PORTLAND CEMENT

### ABSTRACT

*Based on reviewed articles and laboratory experiments, this article presents research on prepared lime hemp mortar mixtures and the materials they consist of. We examined the physical, mechanical, and durability properties of ready-made mortar mixtures with additions of ground granulated blast-furnace slag and Portland cement 42.5 N, where 5 % in mass of aggregate (grain size 0/4 mm) was replaced by hemp hurd. From the obtained results, we found that the properties of hemp mortars in the hardened state are influenced by the properties of hemp hurd and the types of binder used. Hemp shives with a smaller, both average and longest, particle length, lower fiber content, and higher water absorption achieved higher compressive strength in the hardened state of the composite. We conducted compressive and bending tensile strength tests on the hardened prepared samples, of which the best results were obtained in both cases by samples with the addition of Portland cement and the worst by those with the addition of ground granulated blast furnace slag. We tested the antimicrobial effectiveness of the prepared samples in hardened state, where the inhibition zone was developed by the samples, which contained a proportion of cement and cement with slag in the binder. From the prepared mixtures TGA/DSC showed that the sample with the addition of cement has the largest mass fraction of  $\text{CaCO}_3$  and the smallest mass fraction of  $\text{Ca(OH)}_2$ . A comparison of LCA research with different parameters proved, that hemp concrete, made from hemp hurd, binder and water is carbon negative in its life cycle, indicating that the prepared formulations also have a lower carbon footprint due to the addition of hemp hurd.*

### KEY WORDS:

*hempcrete, hemp hurd, ground granulated blast-furnace slag, Portland cement, life cycle assessment of hempcrete*

## 1 UVOD

Materiali, pridobljeni iz rastlinskih virov, postajajo vse bolj priljubljeni za proizvodnjo okolju prijaznih materialov z nizkim ogljičnim odtisom. Med temi so kompoziti iz industrijske konoplje vse bolj priljubljeni v gradbeništvu zaradi svoje proizvodnje iz obnovljivih virov in svojih pozitivnih lastnosti [1].

Z mešanjem olesenele sredice konoplje, apna, peska in vode nastane edinstven izolacijski omet. Konopljinu apnene malte se običajno uporabljajo kot notranji izolacijski ometi. Konopljinu apneni ometi so higroskopični in zračni materiali [2].

Apneno-konopljin beton je beton, ki kot agregat uporablja konopljin pezdir. Vezivo, ki se uporablja skupaj s konopljinim pezdirjem, je običajno na osnovi apna. Nekatere od značilnosti konopljinega betona so ogljična negativnost, nizka gostota, odlična sposobnost zadrževanja vlage, nizka toplotna prevodnost in dobra zvočna izolacija [3].

Konopljin beton velja za ogljično negativen, ker so neto emisije toplogrednih plinov iz njegove proizvodnje in vgradnje v negativnih vrednosti. Konopljin beton ima značilnost sekvestracije ogljika. Izraz se nanaša na sposobnost materiala, da v sebi shrani ogljik v stabilni obliki. Mehanizem sekvestracije ogljika konopljinega betona lahko delimo na dva dela: biogeni in nebiogeni. Biogena komponenta materiala, konopljin pezdir, vsebuje približno 45 % ogljika, kar je neposredna posledica atmosferskega ogljikovega dioksida, ki ga rastlina absorbira s fotosintezo med svojo rastjo. Nebiogena komponenta konopljinega betona je apneno vezivo, ki zajame konopljin pezdir v strjeni matriks in skozi karbonizacijo porablja ogljikov dioksid iz okolice [3].

Namen raziskave je bil pripraviti recepture apneno-konopljinih malt, izdelati vzorce, na njih izvesti fizikalno mehanske preiskave in trajnostne lastnosti ter jih na podlagi rezultatov predstaviti in primerjati. Prav tako iz zbranih virov ugotoviti okoljske vplive v življenjskem ciklu konopljinega betona z metodologijo LCA.

## 2 MATERIALI IN METODE

### 2.1 GGBS ali GGBFS

Mleta granulirana plavžna žindra je stranski produkt železa v plavžu. Kemično sestoji predvsem iz silicijevega dioksida, aluminijevega oksida in kalcijevega oksida. Delci se zmeljejo na velikost  $< 45 \mu\text{m}$  in imajo specifično površino, ki se giblje med 400 in 600  $\text{m}^2/\text{kg}$ . GGBS je hidravlični material, ki hidrira v prisotnosti vode, kjer nastane primarno produkt kalcijev silikat hidrat (C-S-H gel) [4].

### 2.2 Cement

Portlandski cement je kompleksen proizvod, izdelan iz zelo preprostih in široko dostopnih materialov: apnenca

in gline (ali skrilavca). Zelo natančna razmerja teh dveh osnovnih materialov je treba zmešati z nekaj dodatki (pepelnata žindra, boksit, piritni ogorki ali železova ruda), da nastane željena kemična sestava. Sledi mletje, mešanje (homogeniziranje) in proizvodnja klinkerja s kompleksnim piroprocesiranjem. Proizvodni stroški portlandskega cementa so tesno povezani s stroški goriva, ki se uporablja za ustvarjanje dovolj visoke temperature v peči, da omogoči različne kemične reakcije, ki pretvorijo surovine v klinker.

Kemična sestava surovin je prilagojena tako, da nastanejo štiri minerali, ki reagirajo z vodo in ustvarijo vezi:

- trikalcijev silikat,  $\text{SiO}_2 \cdot 3\text{CaO}$  (alit ali  $\text{C}_3\text{S}$ )
- dikalcijev silikat,  $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$  (belit ali  $\text{C}_2$ )
- trikalcijev aluminat,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO}$  (aluminat ali  $\text{C}_3\text{A}$ )
- tetrakalcijev feroaluminat,  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  (ferit ali  $\text{C}_4\text{AF}$ ) [5].

### 2.3 Naravno hidravlično apno

Vezivo na osnovi apna je izbrana vrsta veziva pri konopljinem betonu zaradi njegove dostopnosti in nizkih emisij pri njegovi proizvodnji. Ne glede na okoljske koristi so apnena veziva bolj združljiva s konopljinim pezdirjem kot s cementom, saj ta absorbira velike količine vode in ovira hidravlično aktivnost ter preprečuje strjevanje notranjih delov konopljinu-cementnega kompozita [3].

Hidravlično apno je tisto apno, ki se ob stiku z vodo strjuje zaradi tvorbe C-S-H gela. Hidravlično apno je sestavljeno iz  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (kalcijev hidroksid ali portlandit) in  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  (dikalcijev silikat), znan tudi kot belit, ki je reaktiven z vlago in je podvržen kemijski reakciji, imenovani hidratacija [3].

Ponovno povečano zanimanje za uporabo NHL je posledica njegove večje združljivosti s tradicionalnimi materiali v primerjavi s cementnimi maltami in njegovih izboljšanih lastnosti (hitrejše in večje pridobivanje mehanske trdnosti, zgodnejše karbonizacije zaradi nižje vsebnosti apna, sposobnost hidravličnega apna, da se strdi v vlažnih razmerah ali pod vodo, nižje dimenzijske spremembe itd.) v primerjavi z zračnimi apnenimi maltami ter zaradi njegovega boljšega vpliva na okolje (v primerjavi s cementom) glede na njegov proizvodni proces, pa tudi glede na njegovo sposobnost, da absorbira  $\text{CO}_2$  iz svojega okolja med vezanjem in strjevanjem zaradi karbonizacije apna. Poleg tega prisotnost kalcijevega hidroksida ponuja pomemben potencial za samozdravljenje v primeru pojava mikrorazpok v ustreznem okolju, vendar je hkrati lahko povezana s pojavi izpiranja v določenih podnebnih in pogojih [6].



## 2.4 Metode

V eksperimentalnem delu smo določali prostorninsko maso zrn, povprečno velikost konopljinega pezdirja in njegovo vpojnost vode, konsistenco in gostoto svežega betona, gostoto, tlačno in upogibno trdnost strjenega betona, poroznost, omočljivost, protimikrobno učinkovitost in masne deleže  $\text{Ca(OH)}_2$  in  $\text{CaCO}_3$ .

Uporabili smo naslednje laboratorijske metode:

- Določanje prostorninske mase zrn z metodo piknometra po standardu SIST EN 1097-6:2013.
- Določanje povprečne velikosti delcev konopljinega pezdirja s programom za obdelavo slik imageJ, ki temelji na Javi.
- Določanje vpojnosti vode konopljinega pezdirja.
- Določanje konsistence z merjenjem poseda s stožcem po standardu SIST EN 12350-2:2019.
- Preskušanje svežega betona (gostota) po standardu SIST EN 12350-6:2019.
- Preskušanje tlačne trdnosti strjenega betona po standardu SIST EN 12390-3:2019.
- Preskušanje upogibne trdnosti strjenega betona po standardu SIST EN 12390-5:2019.
- Preskušanje strjenega betona (gostota) po standardu SIST EN 12390-7:2019.
- Določanje poroznosti s tehtanjem.
- Določanje kontaktnih kotov (omočljivost). Omočljivost je sposobnost tekočine, da se razširi po površini. Lahko jo izmerimo s kontaktnim kotom med tekočino in površino.
- Protimikrobna učinkovitost z metodo cone inhibicije.
- Masni delež  $\text{Ca(OH)}_2$  in  $\text{CaCO}_3$  s TGA/DSC metodo. Različno termično obnašanje komponent v cementnih materialih je mogoče uporabiti za analizo in karakterizacijo sestave materiala. Ta metoda omogoča določanje različnih hidratov in karbonatov. Princip merjenja temelji na določanju izgube mase med segrevanjem vzorčnega materiala v določenih okoljskih pogojih [7].
- Ocena življenjskega cikla (LCA) je metodologija za ocenjevanje vplivov na okolje, povezanih z vsemi stopnjami življenjske dobe produkta od zibelke do groba (od pridobivanja surovin, predelave surovin, proizvodnje produkta, distribucije in do končne odstranitve ali ponovne uporabe produkta). Metodologija ocenjevanja življenjskega cikla ima fiksno strukturo in se izvaja v skladu z mednarodnimi standardi ISO 14040 in ISO 14044 [8].

## 3 RECEPTURE KONOPLJINIHKOMPOZITOV

Za izvedbo laboratorijskih eksperimentov smo predhodno morali določiti recepture konopljinih malt. Pri tem smo uporabili teoretične gostote materialov, ki so prikazane v tabeli 3-1.

Tabela 3-1. Približne teoretične gostote materialov

| Material          | NHL5 | PEZDIR | AGR 0/4 | VODA | GGBS | CEM I |
|-------------------|------|--------|---------|------|------|-------|
| kg/m <sup>3</sup> | 2750 | 125    | 2700    | 1000 | 2800 | 3150  |

V tabelah 3-2 do 3-5 so prikazane sestave pripravljenih konopljinih malt. V vseh recepturah smo 5 % 0/4 kamnitega agregata nadomestili s konopljinim pezdirjem. Vrednosti % nadomeščenega veziva s CEM I ali NHL5 prikazujejo nadomeščen masni delež skupne količine veziva NHL5 iz referenčnega vzorca. Teoretični vodovozivni faktor teh petih receptur je praktično identičen, in sicer znaša  $1,120 \pm 0,005$ .

Tabela 3-2. Receptura referenčnega konopljinca betona

| REF                              | NHL5    | : | AGR 0/4 | : | PEZDIR | : | VODA    |
|----------------------------------|---------|---|---------|---|--------|---|---------|
|                                  | 19,5    |   | 55,6    |   | 2,9    |   | 21,9    |
| <b>VOLUMEN</b> [m <sup>3</sup> ] | 0,097   |   | 0,282   |   | 0,321  |   | 0,300   |
| <b>MASA</b> [kg]                 | 267,230 |   | 761,604 |   | 40,084 |   | 300,075 |

Tabela 3-3. Receptura konopljinca betona z dodatkom GGBS 30 %

| GGBS                             | NHL5    | : | AGR 0/4 | : | PEZDIR | : | VODA    | : | GGBS   |
|----------------------------------|---------|---|---------|---|--------|---|---------|---|--------|
|                                  | 13,7    |   | 55,6    |   | 2,9    |   | 21,9    |   | 5,9    |
| <b>VOLUMEN</b> [m <sup>3</sup> ] | 0,068   |   | 0,282   |   | 0,321  |   | 0,300   |   | 0,029  |
| <b>MASA</b> [kg]                 | 187,193 |   | 762,144 |   | 40,113 |   | 300,100 |   | 80,226 |

Tabela 3-4. Receptura konopljinca betona z mešanico GGBS 30 % in CEM I 20 %

| GGBS + CEM I                     | NHL5    | : | AGR 0/4 | : | PEZDIR | : | VODA    | : | GGBS   | : | CEM I  |
|----------------------------------|---------|---|---------|---|--------|---|---------|---|--------|---|--------|
|                                  | 9,8     |   | 55,6    |   | 2,9    |   | 21,9    |   | 5,9    |   | 3,9    |
| <b>VOLUMEN</b> [m <sup>3</sup> ] | 0,049   |   | 0,283   |   | 0,322  |   | 0,301   |   | 0,029  |   | 0,017  |
| <b>MASA</b> [kg]                 | 134,040 |   | 764,031 |   | 40,212 |   | 300,843 |   | 80,424 |   | 53,616 |

Tabela 3-5. Receptura konopljinca betona z dodatkom CEM I

| CEM I                            | NHL5    | : | AGR 0/4 | : | PEZDIR | : | VODA    | : | CEM I  |
|----------------------------------|---------|---|---------|---|--------|---|---------|---|--------|
|                                  | 13,7    |   | 55,7    |   | 2,9    |   | 21,8    |   | 5,9    |
| <b>VOLUMEN</b> [m <sup>3</sup> ] | 0,068   |   | 0,284   |   | 0,322  |   | 0,300   |   | 0,026  |
| <b>MASA</b> [kg]                 | 188,007 |   | 765,458 |   | 40,287 |   | 300,253 |   | 80,575 |

Pri recepturi z dodanim cementom (glede na referenčno) smo prvi tip konopljinca pezdirja nadomestili z lokalno sorto Futuro 75 (PEZDIR 2), ki je bila slabše obdelana. V recepturi je manj vode, zato tudi receptura v tabeli 3-6 ni umerjena na 1 m<sup>3</sup>. Posledično z manjšo količino vode je tudi vodovozivni faktor manjši, in sicer znaša za spodnjo recepturo 1,110.

Tabela 3-6. Receptura konopljinca betona s CEM I in PEZDIR 2

| CEM I                            | NHL5    | : | AGR 0/4 | : | PEZDIR 2 | : | VODA    | : | CEM I  |          |
|----------------------------------|---------|---|---------|---|----------|---|---------|---|--------|----------|
|                                  | 13,7    |   | 55,7    |   | 2,9      |   | 21,8    |   | 5,9    | SKUPAJ   |
| <b>VOLUMEN</b> [m <sup>3</sup> ] | 0,068   |   | 0,284   |   | 0,322    |   | 0,299   |   | 0,026  | 0,99875  |
| <b>MASA</b> [kg]                 | 188,007 |   | 765,458 |   | 40,287   |   | 297,878 |   | 80,575 | 1372,205 |

## 4 REZULTATI IN DISKUSIJA

### 4.1 Preiskave materialov

#### 4.1.1 Prostorninska masa zrn

Tabela 4-1 prikazuje rezultate metode merjenja gostote s piknometrom. Gostote se nekoliko razlikujejo od teoretičnih, ki smo jih uporabili za določanje recepture. Vse gostote so bile merjene ob predpostavki, da je gostota vode pri sobni temperaturi  $1000 \text{ kg/m}^3$ . Izmerjena gostota GGBS je višja le za  $26 \text{ kg/m}^3$ , sledi portlandski cement 42,5 N (CEM I), ki ima izmerjeno gostoto nižjo za  $113 \text{ kg/m}^3$  in NHL5, ki ima za  $155 \text{ kg/m}^3$  nižjo izmerjeno gostoto od teoretične.

Tabela 4-1. Meritve in izračun prostorninske mase cementa, NHL5 in GGBS

| Vzorec                    | CEM I        | NHL5         | GGBS         |                                   |
|---------------------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------------------|
| Masa piknometra z vzorcem | 54,71        | 59,33        | 55,00        | g                                 |
| Masa praznega piknometra  | 44,90        | 49,34        | 44,91        | g                                 |
| Volumen piknometra        | 99,0         | 99,7         | 99,0         | ml                                |
| Masa polnega piknometra   | 150,48       | 155,18       | 150,43       | g                                 |
| Gostota vode              | 1,00         | 1,00         | 1,00         | $\text{g/cm}^3$                   |
| Gostota vzorca            | <b>3,037</b> | <b>2,595</b> | <b>2,826</b> | <b><math>\text{g/cm}^3</math></b> |
|                           | <b>3037</b>  | <b>2595</b>  | <b>2826</b>  | <b><math>\text{kg/m}^3</math></b> |

#### 4.1.2 Povprečne velikosti konopljinega pezdirja

Uporabili smo dva različna konopljina pezdirja. Tabela 4-2 in tabela 4-3 prikazujeta povprečje meritev, najdaljšo meritev in najkrajšo meritev konopljinega pezdirja 1 ter 2.

Konopljin pezdir 1 je bistveno bolje obdelan, saj je povprečje meritev kar za 9,49 mm manjše kot pri konopljinem pezdirju 2. Manjši sta prav tako dolžini najdaljšega in najkrajšega delca. Konopljin pezdir 1 je imel tudi manjši delež vlaken, ki so bile v povprečju krajše kot pri konopljinem pezdirju 2.

Tabela 4-2. 75 meritev dolžin konopljinega pezdirja 1

| Povprečje meritev [mm] | Najdaljša meritev [mm] | Najkrajša meritev [mm] |
|------------------------|------------------------|------------------------|
| <b>14,06</b>           | <b>26,51</b>           | <b>6,28</b>            |

Tabela 4-3. 75 meritev dolžin konopljinega pezdirja 2

| Povprečje meritev [mm] | Najdaljša meritev [mm] | Najkrajša meritev [mm] |
|------------------------|------------------------|------------------------|
| <b>23,55</b>           | <b>43,11</b>           | <b>13,64</b>           |

#### 4.1.3 Vpojnost konopljinega pezdirja

Tabela 4-4 prikazuje vpojnost vode konopljinega pezdirja 1 in 2, ki smo ga v vodi pustili 24 ur. Večjo vpojnost konopljinega pezdirja 1 lahko pripišemo večji poroznosti in boljši obdelavi, saj je imel veliko manjši delež vlaken, ki vsebujejo vodoodporne komponente.

Tabela 4-4. Vpojnost vode konopljinega pezdirja 1 in 2 po 24 urah

|                    | Masa nasičen [g] | Masa suh [g] | Vpoj [%]   |
|--------------------|------------------|--------------|------------|
| Konopljin pezdir 1 | 457,7            | 100,0        | <b>358</b> |
| Konopljin pezdir 2 | 175,0            | 50,0         | <b>250</b> |

#### 4.2 Preiskave konopljinoga betona v svežem stanju

Tabele 4-5 do 4-9 prikazujejo opravljene meritve in rezultate izračunov svežega betona. Na podlagi opravljenih izračunov in meritev lahko opazimo v vseh primerih velika nihanja tako prostorninske mase kot tudi konsistence. Ta večja nihanja se pojavljajo znotraj iste recepture med posameznimi šaržami kljub enaki uporabljeni recepturi. Iz tega lahko sklepamo, da je prišlo do nihanj v posamezni recepturi zaradi nehomogenega mešanja betona, kar je bilo opazno že pri sami izdelavi betona.

Tabela 4-5. Meritve svežega betona referenčnega vzorca (v nadaljevanju REF), kjer je vezivo NHL5

| Zaporedna oznaka | Šarža | Dimenzije kalupa | Masa kalup + sveži beton | Masa kalupa | Masa vzorca | Prost. masa       | Konsistenca | Tip poseda:<br>a) pravi<br>b) strižni |
|------------------|-------|------------------|--------------------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|---------------------------------------|
|                  |       | mm               | kg                       | kg          | kg          | kg/m <sup>3</sup> | mm          |                                       |
| REF 1            | 1     | 150              | 17,638                   | 11,700      | 5,938       | <b>1759</b>       | 35          | a)                                    |
| REF 2            |       |                  | 17,495                   | 11,492      | 6,003       | <b>1779</b>       |             |                                       |
| REF 3            |       |                  | 14,652                   | 8,673       | 5,979       | <b>1772</b>       |             |                                       |
| REF 4            | 2     | 150              | 17,124                   | 11,492      | 5,632       | <b>1669</b>       | 50          | a)                                    |
| REF 5            |       |                  | 17,375                   | 11,700      | 5,675       | <b>1681</b>       |             |                                       |
| REF 6            |       |                  | 17,462                   | 11,690      | 5,772       | <b>1710</b>       |             |                                       |
| REF 7            | 3     | 150              | 14,472                   | 8,694       | 5,778       | <b>1712</b>       | 25          | a)                                    |
| REF 8            |       |                  | 14,409                   | 8,749       | 5,660       | <b>1677</b>       |             |                                       |
| REF 9            |       |                  | 14,499                   | 8,673       | 5,826       | <b>1726</b>       |             |                                       |

Tabela 4-6. Meritve svežega betona (v nadaljevanju GGBS), kjer je masni delež 30 % NHL5 nadomeščenega z GGBS

| Zaporedna oznaka | Šarža | Dimenzije kalupa | Masa kalup + sveži beton | Masa kalupa | Masa vzorca | Prost. masa       | Konsistenca | Tip poseda:<br>a) pravi<br>b) strižni |
|------------------|-------|------------------|--------------------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|---------------------------------------|
|                  |       | mm               | kg                       | kg          | kg          | kg/m <sup>3</sup> | mm          |                                       |
| GGBS 1           | 1     | 150              | 17,543                   | 11,700      | 5,843       | <b>1731</b>       | 80          | a)                                    |
| GGBS 2           |       |                  | 17,333                   | 11,492      | 5,841       | <b>1731</b>       |             |                                       |
| GGBS 3           |       |                  | 17,595                   | 11,690      | 5,905       | <b>1750</b>       |             |                                       |
| GGBS 4           | 2     | 150              | 14,468                   | 8,763       | 5,705       | <b>1690</b>       | 30          | a)                                    |
| GGBS 5           |       |                  | 14,493                   | 8,749       | 5,744       | <b>1702</b>       |             |                                       |
| GGBS 6           |       |                  | 16,822                   | 11,050      | 5,772       | <b>1710</b>       |             |                                       |
| GGBS 7           | 3     | 150              | 16,903                   | 11,048      | 5,855       | <b>1735</b>       | 80          | a)                                    |
| GGBS 8           |       |                  | 16,819                   | 10,990      | 5,829       | <b>1727</b>       |             |                                       |
| GGBS 9           |       |                  | 14,519                   | 8,694       | 5,825       | <b>1726</b>       |             |                                       |



Tabela 4-7. Rezultati svežega betona (v nadaljevanju GC), kjer je vezivo sestavljeno iz 50 % NHL5, 30 % GGBS in 20 % CEM I

| Zaporedna oznaka | Šarža | Dimenzije kalupa | Masa kalup + sveži beton | Masa kalupa | Masa vzorca | Prost. masa       | Konsistenca | Tip poseda:<br>a) pravi<br>b) strižni |
|------------------|-------|------------------|--------------------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|---------------------------------------|
|                  |       | mm               | kg                       | kg          | kg          | kg/m <sup>3</sup> | mm          |                                       |
| GC 1             | 1     | 150              | 17,510                   | 11,700      | 5,810       | <b>1721</b>       | <b>80</b>   | a)                                    |
| GC 2             |       |                  | 17,305                   | 11,492      | 5,813       | <b>1722</b>       |             |                                       |
| GC 3             |       |                  | 17,569                   | 11,690      | 5,879       | <b>1742</b>       |             |                                       |
| GC 4             | 2     | 150              | 16,787                   | 11,048      | 5,739       | <b>1700</b>       | <b>105</b>  | a)                                    |
| GC 5             |       |                  | 16,774                   | 11,050      | 5,724       | <b>1696</b>       |             |                                       |
| GC 6             |       |                  | 16,768                   | 10,990      | 5,778       | <b>1712</b>       |             |                                       |
| GC 7             | 3     | 150              | 14,405                   | 8,694       | 5,711       | <b>1692</b>       | <b>125</b>  | a)                                    |
| GC 8             |       |                  | 14,392                   | 8,749       | 5,643       | <b>1672</b>       |             |                                       |
| GC 9             |       |                  | 14,475                   | 8,791       | 5,684       | <b>1684</b>       |             |                                       |

Tabela 4-8. Rezultati svežega betona (v nadaljevanju CEM), kjer je 30 % NHL5 nadomeščeno s CEM I

| Zaporedna številka | Šarža | Dimenzije kalupa | Masa kalup + sveži beton | Masa kalupa | Masa vzorca | Prost. masa       | Konsistenca | Tip poseda:<br>a) pravi<br>b) strižni |
|--------------------|-------|------------------|--------------------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|---------------------------------------|
|                    |       | mm               | kg                       | kg          | kg          | kg/m <sup>3</sup> | mm          |                                       |
| CEM 1              | 1     | 150              | 17,503                   | 11,492      | 6,011       | <b>1781</b>       | <b>40</b>   | a)                                    |
| CEM 2              |       |                  | 17,800                   | 11,700      | 6,100       | <b>1807</b>       |             |                                       |
| CEM 3              |       |                  | 17,692                   | 11,690      | 6,002       | <b>1778</b>       |             |                                       |
| CEM 4              | 2     | 150              | 14,542                   | 8,709       | 5,833       | <b>1728</b>       | <b>70</b>   | a)                                    |
| CEM 5              |       |                  | 14,399                   | 8,694       | 5,705       | <b>1690</b>       |             |                                       |
| CEM 6              |       |                  | 14,464                   | 8,763       | 5,701       | <b>1689</b>       |             |                                       |
| CEM 7              | 3     | 150              | 17,049                   | 10,990      | 6,059       | <b>1795</b>       | <b>50</b>   | a)                                    |
| CEM 8              |       |                  | 17,010                   | 11,048      | 5,962       | <b>1767</b>       |             |                                       |
| CEM 9              |       |                  | 14,715                   | 8,791       | 5,924       | <b>1755</b>       |             |                                       |

Tabela 4-9. Rezultati svežega betona (v nadaljevanju CEM P2), kjer je 30 % NHL5 nadomeščeno s cem I in je uporabljen pezdir 2

| Zaporedna številka | Šarža | Dimenzije kalupa | Masa kalup + sveži beton | Masa kalupa | Masa vzorca | Prost. masa       | Konsistenca | Tip poseda:<br>a) pravi<br>b) strižni |
|--------------------|-------|------------------|--------------------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|---------------------------------------|
|                    |       | mm               | kg                       | kg          | kg          | kg/m <sup>3</sup> | mm          |                                       |
| CEM P2 1           | 1     | 150              | 17,712                   | 11,492      | 6,220       | <b>1843</b>       | <b>30</b>   | a)                                    |
| CEM P2 2           |       |                  | 17,820                   | 11,690      | 6,130       | <b>1816</b>       |             |                                       |
| CEM P2 3           |       |                  | 17,943                   | 11,700      | 6,243       | <b>1850</b>       |             |                                       |

Iz dobljenih meritev poseda s stožcem in izračunov prostorninske mase lahko povečini opazimo trend večjega poseda s stožcem z zmanjševanjem prostorninske mase betonov. V primerih, ki ne sledijo temu trendu, lahko sklepamo, da je pripravljena receptura bolje zmešana in je v mešanici več proste vode, ki ni ujeta v skupnih veziva. Največjo povprečno vrednost izmerjene konsistence smo dobili pri vzorcu GC in najmanjšo pri CEM P2, kjer je bilo tudi dodano manj vode.

### 4.3 Preiskave konopljinoga betona v otrdelem stanju

#### 4.3.1 Gostota in tlačna trdnost strjenih konopljinih malt

Tabele 4-10 do 4-14 prikazujejo opravljene meritve in rezultate izračunov strjenega betona.

Tabela 4-10. Meritve strjenega betona referenčnega vzorca, kjer je vezivo NHL5

| Zaporedna številka | Stopnja obremenitve | Masa  | Dimenzije [mm] |       |       | Izguba mase sveži - otrdeli | Gostota     | Sila | Tlak        | Starost |
|--------------------|---------------------|-------|----------------|-------|-------|-----------------------------|-------------|------|-------------|---------|
|                    | MPa/s               |       | kg             | d     | š,Ø   |                             |             |      |             |         |
| REF 1              | 0,05                | 4,885 | 149,7          | 149,5 | 149,9 | 1,053                       | <b>1456</b> | 9,9  | <b>0,44</b> | 28      |
| REF 2              | 0,025               | 4,863 | 149,8          | 150,0 | 149,4 | 1,140                       | <b>1449</b> | 9,8  | <b>0,44</b> |         |
| REF 3              | 0,025               | 4,874 | 149,8          | 150,0 | 149,7 | 1,105                       | <b>1449</b> | 9,4  | <b>0,42</b> |         |
| REF 4              | 0,025               | 4,538 | 149,9          | 149,9 | 150,1 | 1,094                       | <b>1345</b> | 8,8  | <b>0,39</b> | 56      |
| REF 5              | 0,025               | 4,593 | 149,0          | 149,0 | 150,0 | 1,082                       | <b>1379</b> | 9,6  | <b>0,43</b> |         |
| REF 6              | 0,025               | 4,636 | 149,4          | 149,4 | 150,2 | 1,136                       | <b>1383</b> | 10,0 | <b>0,45</b> |         |
| REF 7              | 0,025               | 4,599 | 148,5          | 149,8 | 150,0 | 1,179                       | <b>1378</b> | 10,1 | <b>0,45</b> | 90      |
| REF 8              | 0,025               | 4,555 | 147,0          | 149,0 | 150,0 | 1,105                       | <b>1386</b> | 9,4  | <b>0,43</b> |         |
| REF 9              | 0,025               | 4,602 | 148,0          | 149,4 | 150,0 | 1,224                       | <b>1388</b> | 10,2 | <b>0,46</b> |         |

Tabela 4-11. Meritve strjenega betona, kjer je masni delež 30 % NHL5 nadomeščenega z GGBS

| Zaporedna številka | Stopnja obremenitve | Masa  | Dimenzije [mm] |       |       | Izguba mase sveži - otrdeli | Gostota     | Sila | Tlak        | Starost |
|--------------------|---------------------|-------|----------------|-------|-------|-----------------------------|-------------|------|-------------|---------|
|                    | MPa/s               |       | kg             | d     | š,Ø   |                             |             |      |             |         |
| GGBS 1             | 0,025               | 4,649 | 149,5          | 148,0 | 150,1 | 1,194                       | <b>1400</b> | 5,2  | <b>0,24</b> | 28      |
| GGBS 2             | 0,025               | 4,786 | 149,5          | 149,5 | 149,7 | 1,055                       | <b>1430</b> | 5,8  | <b>0,26</b> |         |
| GGBS 3             | 0,025               | 4,747 | 149,6          | 149,0 | 149,9 | 1,158                       | <b>1421</b> | 5,5  | <b>0,25</b> |         |
| GGBS 4             | 0,025               | 4,774 | 148,9          | 149,4 | 149,9 | 0,931                       | <b>1432</b> | 6,1  | <b>0,27</b> | 56      |
| GGBS 5             | 0,025               | 4,701 | 149,0          | 148,8 | 149,9 | 1,043                       | <b>1414</b> | 6,2  | <b>0,28</b> |         |
| GGBS 6             | 0,025               | 4,628 | 150,0          | 145,0 | 150,0 | 1,144                       | <b>1419</b> | 5,9  | <b>0,27</b> |         |
| GGBS 7             | 0,025               | 4,618 | 149,4          | 148,7 | 149,9 | 1,237                       | <b>1387</b> | 7,7  | <b>0,35</b> | 90      |
| GGBS 8             | 0,025               | 4,627 | 150,0          | 148,0 | 150,0 | 1,202                       | <b>1389</b> | 7,6  | <b>0,34</b> |         |
| GGBS 9             | 0,025               | 4,578 | 150,0          | 145,0 | 150,0 | 1,247                       | <b>1403</b> | 8,3  | <b>0,38</b> |         |

Tabela 4-12. Rezultati strjenega betona, kjer je vezivo sestavljeno iz 50 % NHL5, 30 % GGBS in 20 % CEM I

| Zaporedna številka | Stopnja obremenitve | Masa  | Dimenzije [mm] |       |       | Izguba mase sveži - otrdeli | Gostota     | Sila | Tlak        | Starost |
|--------------------|---------------------|-------|----------------|-------|-------|-----------------------------|-------------|------|-------------|---------|
|                    | MPa/s               |       | kg             | d     | š,Ø   |                             |             |      |             |         |
| GC 1               | 0,025               | 4,660 | 149,5          | 149,1 | 149,8 | 1,150                       | <b>1396</b> | 8,4  | <b>0,38</b> | 28      |
| GC 2               | 0,025               | 4,693 | 149,8          | 147,9 | 149,9 | 1,120                       | <b>1413</b> | 9,6  | <b>0,43</b> |         |
| GC 3               | 0,025               | 4,692 | 149,0          | 146,0 | 150,0 | 1,187                       | <b>1438</b> | 9,7  | <b>0,45</b> |         |
| GC 4               | 0,025               | 4,549 | 149,6          | 150,0 | 149,7 | 1,190                       | <b>1354</b> | 8,4  | <b>0,37</b> | 56      |
| GC 5               | 0,025               | 4,635 | 150,0          | 146,5 | 149,8 | 1,089                       | <b>1408</b> | 8,5  | <b>0,39</b> |         |
| GC 6               | 0,025               | 4,591 | 149,5          | 140,0 | 150,0 | 1,187                       | <b>1462</b> | 12,2 | <b>0,58</b> |         |
| GC 7               | 0,025               | 4,692 | 149,8          | 147,7 | 150,0 | 1,019                       | <b>1414</b> | 10,9 | <b>0,49</b> | 90      |
| GC 8               | 0,025               | 4,613 | 149,0          | 145,0 | 150,0 | 1,030                       | <b>1423</b> | 9,0  | <b>0,42</b> |         |
| GC 9               | 0,025               | 4,671 | 149,9          | 146,9 | 150,0 | 1,013                       | <b>1414</b> | 11,2 | <b>0,51</b> |         |

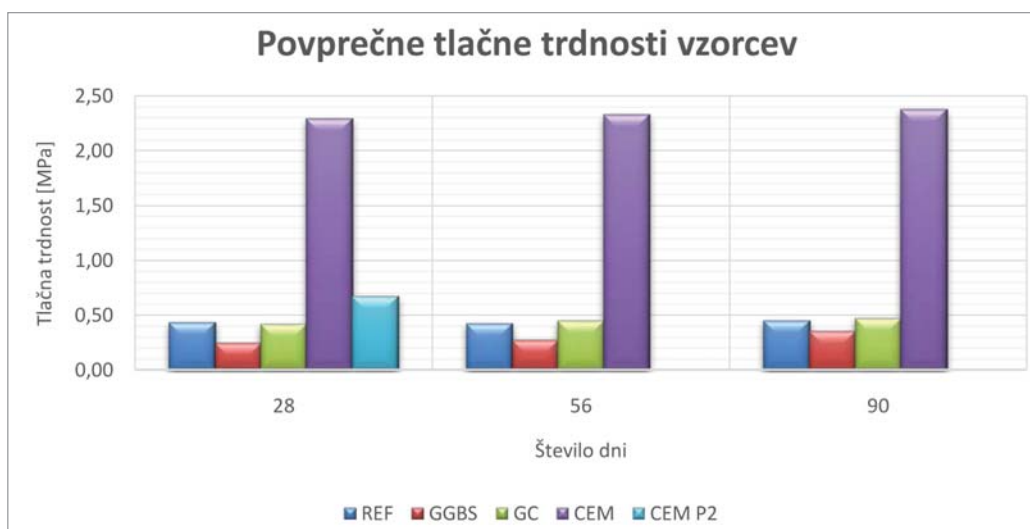
Tabela 4-13. Rezultati strjenega betona, kjer je 30 % NHL5 nadomeščeno s CEM I

| Zaporedna številka | Stopnja obremenitve | Masa  | Dimenzije [mm] |       |       | Izguba mase sveži - otrdeli | Gostota     | Sila | Tlak        | Starost |
|--------------------|---------------------|-------|----------------|-------|-------|-----------------------------|-------------|------|-------------|---------|
|                    | MPa/s               |       | d              | š,Ø   | v     |                             |             |      |             |         |
| CEM 1              | 0,025               | 4,827 | 149,5          | 148,0 | 150,0 | 1,184                       | <b>1454</b> | 51,3 | <b>2,32</b> | 28      |
| CEM 2              | 0,025               | 4,825 | 149,8          | 148,2 | 149,9 | 1,275                       | <b>1450</b> | 51,9 | <b>2,34</b> |         |
| CEM 3              | 0,025               | 4,799 | 150,0          | 147,5 | 150,0 | 1,203                       | <b>1446</b> | 49,2 | <b>2,22</b> |         |
| CEM 4              | 0,025               | 4,772 | 149,3          | 147,9 | 150,0 | 1,061                       | <b>1441</b> | 56,1 | <b>2,54</b> | 56      |
| CEM 5              | 0,025               | 4,679 | 145,0          | 149,5 | 149,0 | 1,026                       | <b>1449</b> | 52,2 | <b>2,41</b> |         |
| CEM 6              | 0,025               | 4,694 | 150,0          | 147,5 | 150,0 | 1,007                       | <b>1414</b> | 45,3 | <b>2,05</b> |         |
| CEM 7              | 0,025               | 4,801 | 149,8          | 147,2 | 149,8 | 1,258                       | <b>1453</b> | 47,6 | <b>2,16</b> | 90      |
| CEM 8              | 0,025               | 4,760 | 147,7          | 149,1 | 149,9 | 1,202                       | <b>1442</b> | 51,5 | <b>2,34</b> |         |
| CEM 9              | 0,025               | 4,830 | 150,0          | 149,2 | 150,1 | 1,094                       | <b>1438</b> | 48,9 | <b>2,18</b> |         |

Tabela 4-14. Rezultati strjenega betona, kjer je 30 % NHL5 nadomeščeno s CEM I in je uporabljen pezdir 2

| Zaporedna številka | Stopnja obremenitve | Masa  | Dimenzije [mm] |       |       | Izguba mase sveži - otrdeli | Gostota     | Sila | Tlak        | Starost |
|--------------------|---------------------|-------|----------------|-------|-------|-----------------------------|-------------|------|-------------|---------|
|                    | MPa/s               |       | d              | š,Ø   | v     |                             |             |      |             |         |
| CEM P2 1           | 0,025               | 5,110 | 149,5          | 148,0 | 150,0 | 1,110                       | <b>1540</b> | 15,3 | <b>0,69</b> | 28      |
| CEM P2 2           | 0,025               | 5,192 | 150,0          | 149,8 | 145,0 | 0,938                       | <b>1594</b> | 13,8 | <b>0,61</b> |         |
| CEM P2 3           | 0,025               | 5,224 | 149,9          | 149,6 | 147,9 | 1,019                       | <b>1575</b> | 15,9 | <b>0,71</b> |         |

Tlačne trdnosti vzorcev vseh receptur (slika 4-1) rastlejo s starostjo betona, razen REF, ki je po 56 dneh v povprečju izgubil 0,01 MPa v primerjavi z 28 dni. Pri meritvah gre za prevelike razlike v konsistencah in prostorninskih masah med posameznimi šaržami, da bi lahko trdili, da je to izključno posledica starosti vzorcev. CEM P2 je kljub isti količini veziva in manjši količini vode po 28 dneh dosegel le 0,67 MPa v primerjavi s CEM, ki je dosegel 2,29 MPa.



Slika 4-1. Slika prikazuje povprečne tlačne trdnosti vzorcev pri 28, 56 in 90 dneh vseh receptur razen CEM P2, ki je bila opravljena le za 28 dni

#### 4.3.2 Upogibna trdnost

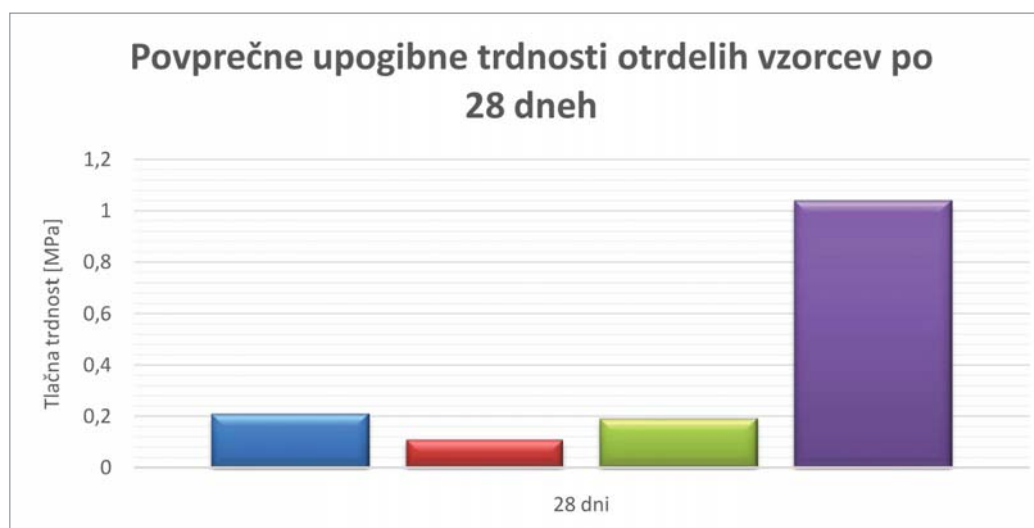
Tabela 4-15 prikazuje maksimalne sile pri lomu materiala in njihovo povprečje. Rezultati prikazujejo največjo potrebno silo pri vzorcu CEM in najmanjšo pri GGBS. GC ima rahlo manjšo maksimalno silo pri lomu materiala kot REF. Tabela 4-16 prikazuje preračunane rezultate maksimalnih sil v upogibno trdnost v MPa. Slika 4-2 prikazuje rezultate povprečij upogibnih trdnosti vzorcev po 28 dneh nege.

Tabela 4-15. Maksimalna sila pri lomu materiala, tritočkovni upogib

| Vzorec | Maksimalna sila pri lomu materiala [kN] |      |      | Povprečje [kN] |
|--------|---|------|------|----------------|
| REF    | 0,64                                    | 0,3  | 0,45 | <b>0,46</b>    |
| GGBS   | 0,28                                    | 0,21 | 0,25 | <b>0,25</b>    |
| GC     | 0,47                                    | 0,39 | 0,43 | <b>0,43</b>    |
| CEM    | 2,5                                     | 2,1  | 2,3  | <b>2,30</b>    |

Tabela 4-16. Upogibna trdnost tritočkovnega upogiba vzorcev

| Vzorec | Upogibna trdnost [MPa] |      |      | Povprečje [MPa] |
|--------|------------------------|------|------|-----------------|
| REF    | 0,29                   | 0,14 | 0,20 | <b>0,21</b>     |
| GGBS   | 0,13                   | 0,09 | 0,11 | <b>0,11</b>     |
| GC     | 0,21                   | 0,18 | 0,19 | <b>0,19</b>     |
| CEM    | 1,13                   | 0,95 | 1,04 | <b>1,04</b>     |



Slika 4-2. Rezultati upogibnih trdnosti vzorcev REF, GGBS, GC in CEM

#### 4.3.3 Poroznost

Tabela 4-17 prikazuje meritve in rezultate izračunov za poroznost vzorcev. Iz rezultatov je razvidno, da ima referenčni vzorec največjo vsebnost zraka, sledi mu vzorec GGBS in še vzorca GC ter CEM, ki imata najmanjšo in podobno vsebnost zraka.

Tabela 4-17. Poroznost vzorcev

|      | Masa posušenega vzorca [g] | Masa nasičenega vzorca [g] | Masa suha - mokra [g] | Poroznost [%] |
|------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------|
| REF  | 495                        | 592,7                      | 97,7                  | <b>23,2</b>   |
| GGBS | 503                        | 591,3                      | 94,3                  | <b>22,4</b>   |
| GC   | 510                        | 604,3                      | 88,3                  | <b>20,9</b>   |
| CEM  | 510                        | 597,6                      | 87,6                  | <b>20,8</b>   |

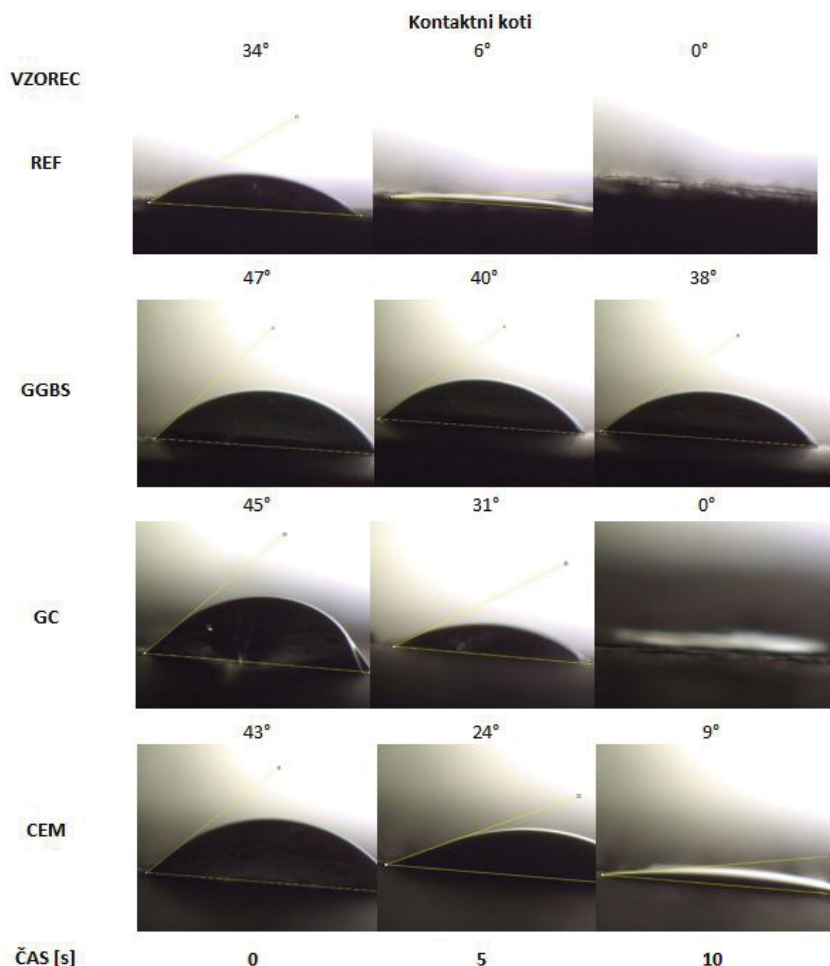


#### 4.3.4 Kontaktni koti

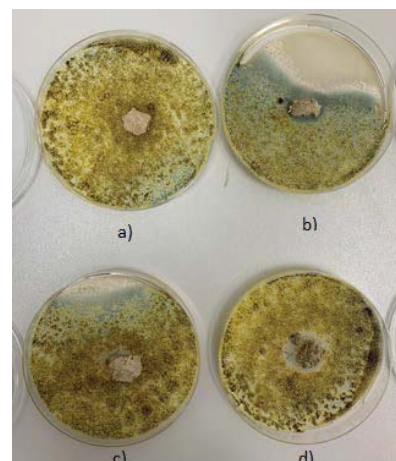
Slika 4-3 prikazuje izmerjene kontaktne kote s programom ImageJ. Poroznost predvsem notranja kapilarna poroznost vpliva na nizke kontaktne kote. Kapljica vode pri vzorcih REF, GC in CEM po le nekaj sekundah skoraj v celoti zapusti površino in prične prodirati proti notranjosti. Pri vzorcu GGBS je kontaktni kot  $0^\circ$  bil izmerjen pri več kot dveh minutah in je posledično najmanj omočljiv.

#### 4.3.5 Protimikrobna učinkovitost

Slika 4-4 prikazuje protimikrobno učinkovitost preiskanih vzorcev. Iz slike je razvidno, da imata cono inhibicije le vzorca b) CEM in d) GC. Ta pri CEM znaša 15 mm in pri GC 2,7 mm.



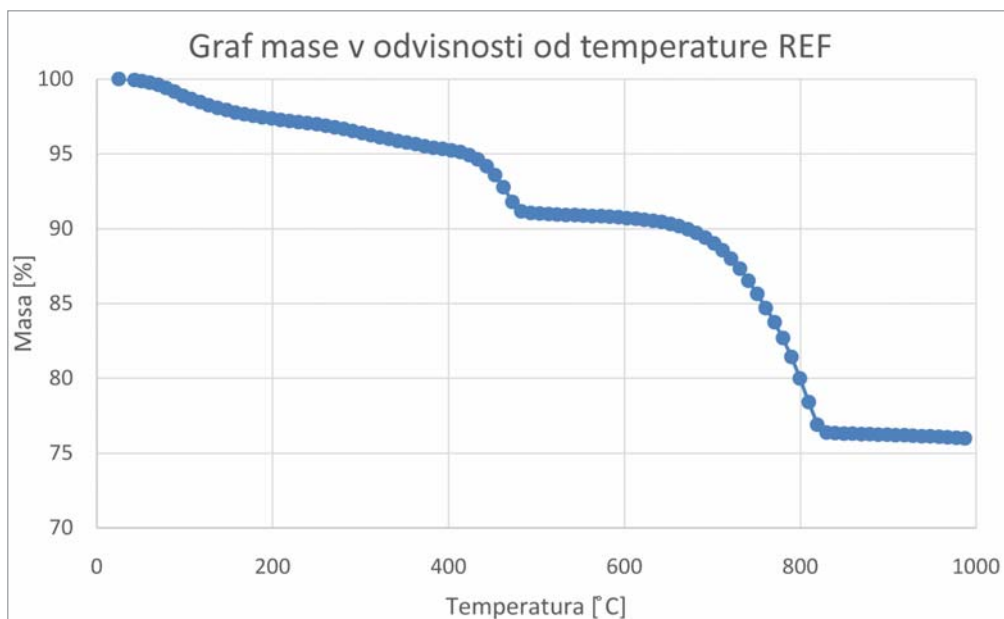
Slika 4-3. Kontaktni koti REF, GGBS, GC in CEM pri 0, 5 in 10 sekundah



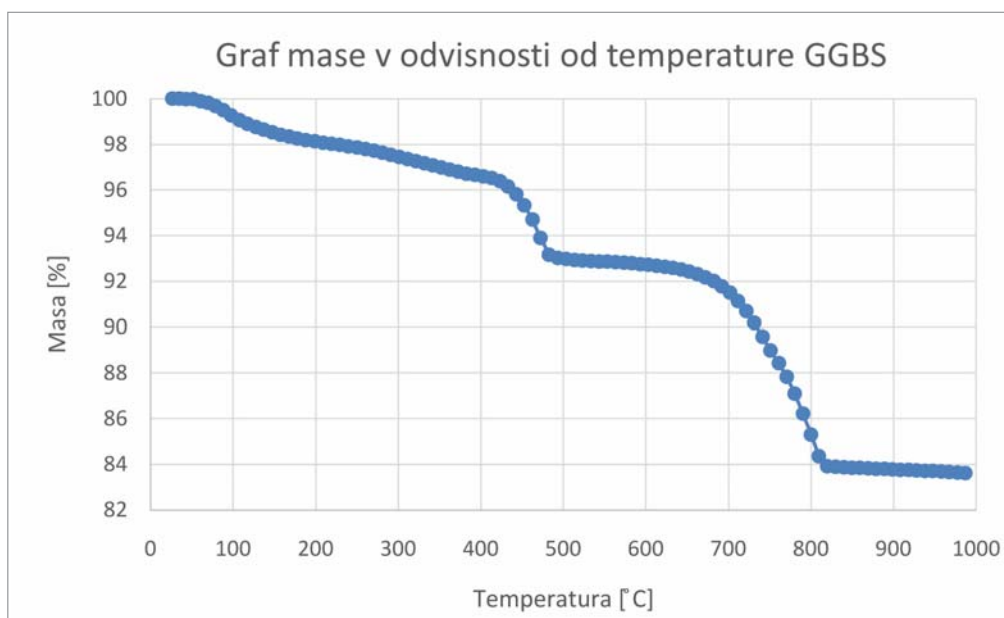
Slika 4-4. a) REF b) CEM c) GGBS d) GC

#### 4.3.6 TG/DSC analiza

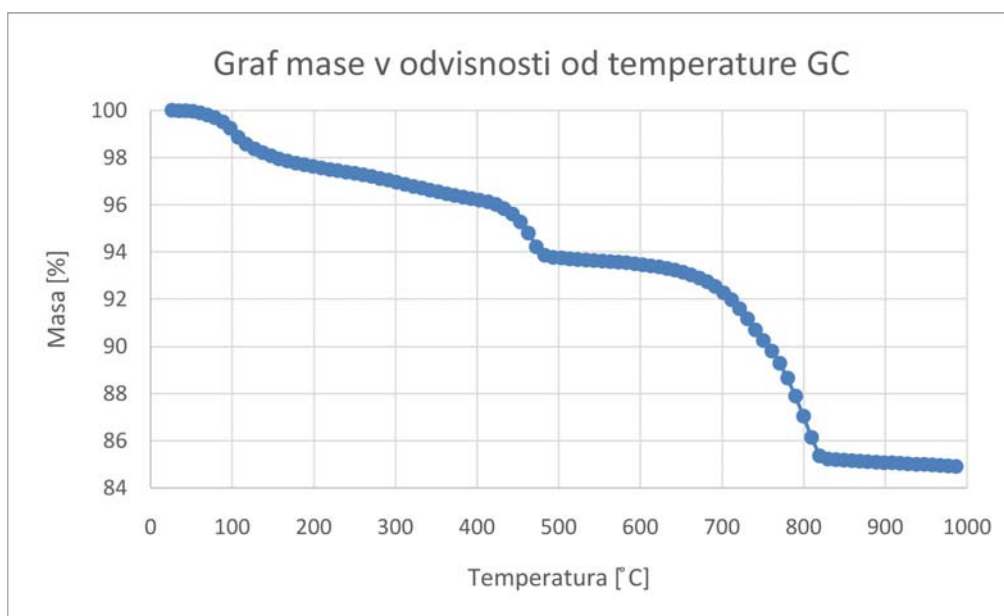
Slike 4-5 do 4-8 prikazujejo dobljene rezultate TG/DSC analize izgubljene mase v odvisnosti od temperature merjenih REF, GGBS, GC in CEM vzorcev. Največ izgubljene mase imata vzorca REF in CEM. Vsi vzorci imajo dva strma padca mase, in sicer pri REF med  $440^\circ\text{C}$  in  $480^\circ\text{C}$  ter od  $700^\circ\text{C}$  do  $820^\circ\text{C}$ . Za GGBS sta to  $440^\circ\text{C}$  do  $480^\circ\text{C}$  in  $710^\circ\text{C}$  do  $800^\circ\text{C}$ . Pri GC sta ti območji  $440^\circ\text{C}$  do  $480^\circ\text{C}$  ter  $720^\circ\text{C}$  do  $810^\circ\text{C}$  in pri CEM  $460^\circ\text{C}$  do  $495^\circ\text{C}$  ter  $720^\circ\text{C}$  do  $840^\circ\text{C}$ . Prvo območje s širšo okolico strmega padca v večjem delu pripada izhlapevanju  $\text{H}_2\text{O}$  in drugo izhlapevanju  $\text{CO}_2$  in  $\text{CO}$ .



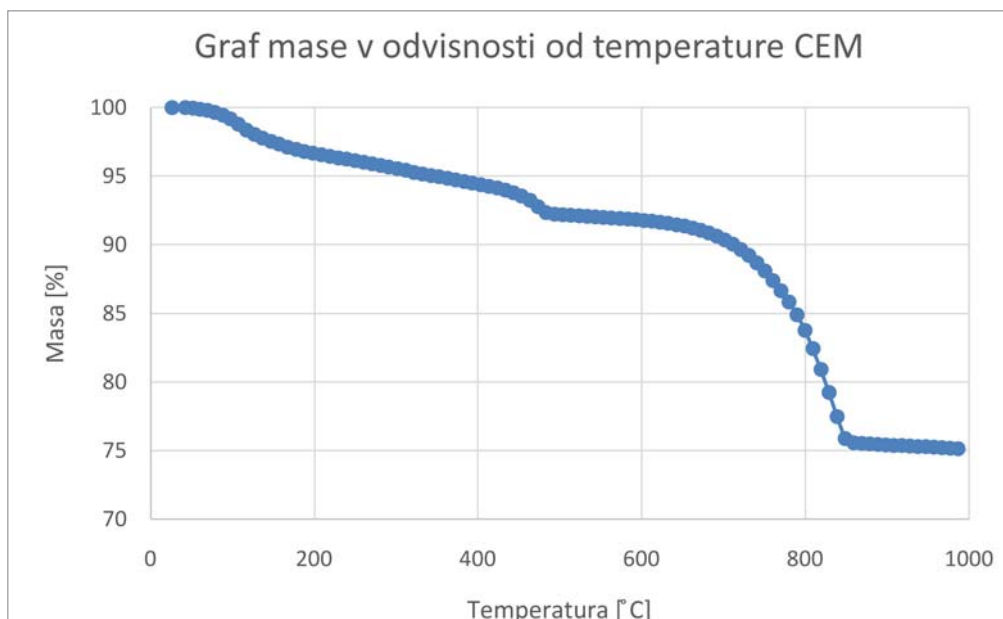
Slika 4-5. Izguba mase v odvisnosti od temperature referenčnega vzorca



Slika 4-6. Masa v odvisnosti od temperature vzorca z dodatkom GGBS namesto 30 % NHL5



Slika 4-7. Masa v odvisnosti od temperature vzorca z dodatkom GGBS in CEM I namesto 30 % in 20 % NHL5



Slika 4-8. Masa v odvisnosti od temperature vzorca z dodatkom CEM I namesto 30 % NHL5

Tabela 4-18 prikazuje primerjavo masnih deležev  $\text{CaCO}_3$  in  $\text{Ca(OH)}_2$  vzorcev REF, GGBS, GC in CEM. Največji masni delež  $\text{CaCO}_3$  in najmanjši masni delež  $\text{Ca(OH)}_2$  je imel CEM, kar pomeni, da se je največ  $\text{CO}_2$  ujelo v matrico CEM med karbonizacijo  $\text{Ca(OH)}_2$ . Največji masni delež  $\text{Ca(OH)}_2$  je imel vzorec REF in najmanjši masni delež  $\text{CaCO}_3$  vzorec GC.

Tabela 4-18. Masa izhlapelega  $\text{CO}_2$  in CO ter masni deleži  $\text{CaCO}_3$  in  $\text{Ca(OH)}_2$  dobljeni s TG/DSC analizo

| Vzorec                        | REF   | GGBS  | GC    | CEM   | Enote |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Masa vzorca                   | 19,89 | 22,93 | 25,79 | 24,68 | mg    |
| Masa $\text{CO}_2$ in CO      | 2,94  | 2,11  | 2,24  | 4,14  | mg    |
| Masa $\text{CaCO}_3$          | 6,69  | 4,79  | 5,08  | 9,43  | mg    |
| Masni delež $\text{CaCO}_3$   | 33,64 | 20,91 | 19,71 | 38,19 | %     |
| Masa $\text{H}_2\text{O}$     | 0,84  | 0,83  | 0,63  | 0,54  | mg    |
| Masa $\text{Ca(OH)}_2$        | 3,45  | 3,42  | 2,60  | 2,23  | mg    |
| Masni delež $\text{Ca(OH)}_2$ | 17,32 | 14,92 | 10,06 | 9,05  | %     |

#### 4.4 LCA

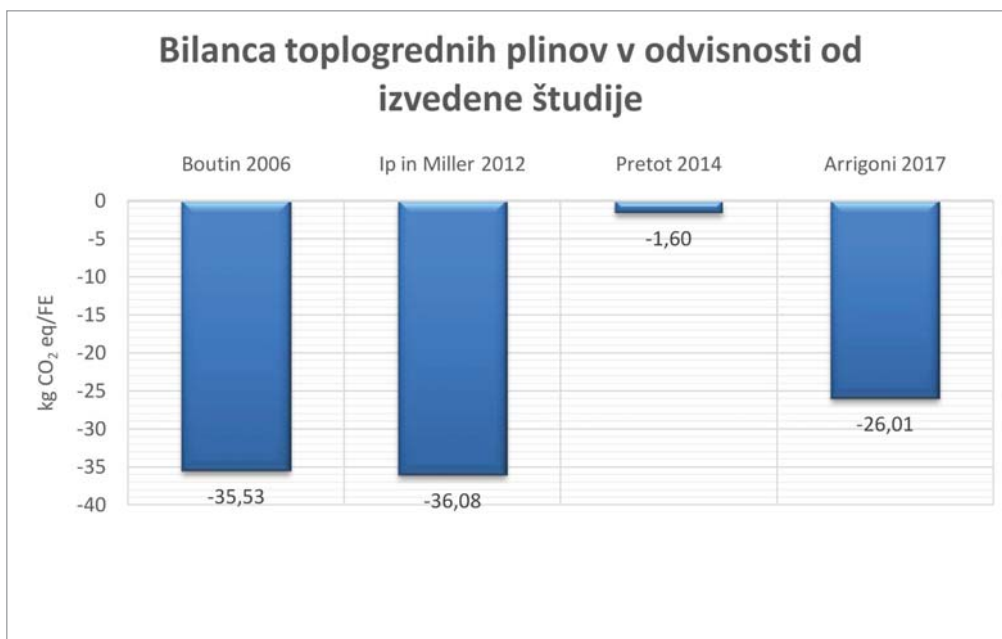
Tabela 4-19 prikazuje pomembnejše rezultate štirih študij LCA konopljinega betona. Študije so primerjane glede na nosilnost, debelino zidu, omet, način gradnje, gostoto materialov in toplotno prehodnost (U-vrednost). Čeprav se vse obravnavane študije nanašajo na isto enoto (1 m<sup>2</sup> stene iz konoplje), imajo več pomembnih razlik in povezanih vplivov na okolje ni mogoče neposredno primerjati. Pomembnejše razlike med študijami se nanašajo na masno razmerje med vezivom in konopljo, proizvodnjo pridelka in karbonizacijo veziva. Masno razmerje med vezivom in konopljo je odvisno od funkcije gradbenega elementa in od načina priprave. V ocenah absorpcije  $\text{CO}_2$  med fazo uporabe materiala izhajajo iz dejstva, da so vse študije obravnavale popolno karbonizacijo stene v njeni življenjski dobi. Upoštevanje popolne karbonizacije je privedlo do zelo ugodnih ocen bilance toplogrednih plinov, vendar se zdi predpostavka nerealistična, kot kažejo meritve v viru [9]. Bilanca toplogrednih plinov (TGP) znaša po 270 dneh -12,09 kg  $\text{CO}_2$  eq/FE (funkcijska enota) v primerjavi z maksimalno vrednostjo -26,01  $\text{CO}_2$  eq/FE. Prav tako velja za karbonizacijo veziva, ki po 270 dneh znaša 0,012 kg  $\text{CO}_2$  eq/kg veziva. Kljub nekaterim razlikam v osnovnih predpostavkah in posledično rezultatih so vse študije poudarile, da konopljin beton deluje kot

ponor ogljika in je njegova splošna bilanca ogljika negativna [9]. Slika 4-9 prikazuje rezultate študij ekvivalenta emisij CO<sub>2</sub>, procesov proizvodnje in gradnje obravnavanih konopljinih betonov.

Tabela 4-19. Povzetek meritev in rezultatov iz štirih študij [9]

| Študija                                  |                                      | Boutin<br>2006 [10] | Ip in Miller<br>2012 [11] | Pretot<br>2014 [12] | Arrigoni<br>2017 [9] |
|--|--------------------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|
| <b>Funkcijska enota (FE)</b>             |                                      | 1 m <sup>2</sup>    | 1 m <sup>2</sup>          | 1 m <sup>2</sup>    | 1 m <sup>2</sup>     |
| <b>Tip zidu</b>                          |                                      | Ni nosilen          | Nosilen                   | Nosilen             | Ni nosilen           |
|  | Enota                                |                     |                           |                     |                      |
| Debelina zidu                            | mm                                   | 260                 | 300                       | 240                 | 250                  |
| Omet (notranji/zunanji)                  | mm                                   | 0/0                 | 0/0                       | 10/20               | 0/0                  |
| Metoda vgrajevanja                       | /                                    | Brizganje           | Ročno                     | Brizganje           | Zidaki               |
| Gostota                                  | kg/m <sup>3</sup>                    | 330                 | 275                       | 390–460             | 330                  |
| Toplotna prehodnost                      | W/m <sup>2</sup> K                   | 0,42                | 0,19                      | 0,36                | 0,27                 |
| <b>Konopljin beton</b>                   |                                      |                     |                           |                     |                      |
|  | Enota                                |                     |                           |                     |                      |
| Vezivo                                   | kg                                   | 54,5                | 50                        | 45                  | 44,5                 |
| Hidrirano apno                           | %                                    | Ni podano           | 75                        | 75                  | 80                   |
| Hidravlično apno                         | %                                    | Ni podano           | 15                        | 15                  | 0                    |
| Cement                                   | %                                    | Ni podano           | 0                         | 0                   | 20                   |
| Ostalo                                   | %                                    | Ni podano           | 10                        | 10                  | 0                    |
| Konopljin pezdir                         | kg                                   | 24,8                | 30                        | 20,4                | 31,4                 |
| Voda                                     | kg                                   | 37,2                | 75                        | 67                  | 58,6                 |
| Masno razmerje vezivo :<br>pezdir        | kg/kg                                | 2,2                 | 1,7                       | 2,2                 | 1,3                  |
| Masno razmerje voda :<br>vezivo          | kg/kg                                | /                   | 1,5                       | 1,5                 | 1,3                  |
| <b>Ostali materiali</b>                  |                                      |                     |                           |                     |                      |
|  | Enota                                |                     |                           |                     |                      |
| les                                      | kg                                   | 5,5                 | 4,6                       | 20                  | 0                    |
| malta                                    | kg                                   | 0                   | 0                         | 0                   | 4,25                 |
| <b>Proizvodnja konopljinega pezdirja</b> |                                      |                     |                           |                     |                      |
|  | Enota                                |                     |                           |                     |                      |
| pridelek                                 | t/ha                                 | 7,75                | 7,5                       | 8                   | 15                   |
| konopljin pezdir                         | kg pezdirja/kg<br>pridelka           | 0,60                | 0,52                      | 0,6                 | 0,75                 |
| emisije TGP                              | kg CO <sub>2</sub> eq/kg<br>pezdirja | 0,254               | 0,192                     | Ni podano           | 0,104                |
| <b>Absorpcija CO<sub>2</sub></b>         |                                      |                     |                           |                     |                      |
|  | Enota                                |                     |                           |                     |                      |
| Rast konoplje                            | kg CO <sub>2</sub> eq/kg<br>pezdirja | 2,105               | 1,527                     | 1,7                 | 1,84                 |
| Karbonizacija veziva (max)               | kg CO <sub>2</sub> eq/kg<br>veziva   | 0,249               | 0,571                     | 0,462               | 0,325                |
| <b>Bilanca TGP (max)</b>                 | kg CO <sub>2</sub> eq/FE             | -35,53              | -36,08                    | -1,60               | -26,01               |





Slika 4 9.  
Bilanca toplogrednih plinov za opravljene študije

## 5 ZAKLJUČEK

Mehanska obdelava konopljinega pezdirja močno vpliva (predvsem velikost delcev in delež prisotnih vlaken) na lastnosti strjenega kompozita, saj je razlika v tlačni trdnosti med vzorcema CEM 1 in CEM P2 1,62 MPa. Vpojnost vode je prav tako odvisna od obdelave konopljinega pezdirja, kar dokazuje boljše obdelan pezdir z manj vlakni, ki je imel za 108 % večjo vodovpojnost. Ugotovili smo, da merjenje s posedom stožca ni najbolj učinkovita metoda za določanje konsistence pripravljene receptur in da je na podlagi različno dobljenih gostot težko izdelati homogene vzorce. Nobena receptura, torej noben strjen vzorec ni uspel doseči zahtevanih 7,5 MPa tlačne trdnosti, zato pripravljene kompoziti niso primerni kot nosilni zidaki. Najvišje vrednosti tlačne in upogibne trdnosti po 28 dneh smo dosegli z dodatkom cementa (CEM I), najslabše pa pri vzorcih z dodatkom žlindre (GC in GGBS). Vzorca CEM I so dosegali največje tlačne trdnosti kljub velikim poškodbam, ki so nastale pri razkalupljanju vzorcev. Gostote strjenega betona so bile podobne pričakovanim iz sestavljenih receptur v primerjavi z gostotami svežega betona, ki so bile višje od pričakovanih. To lahko pripišemo izgubi mase skozi postopek sušenja konopljinih betonov, kar lahko v večini pripišemo posledici izhlapevanja vode in nenatančnih meritev dimenzij vzorcev v strjenem stanju zaradi njihovih nepravilnih oblik in poškodb pri razkalupljanju. Najbolj porozna sta bila vzorca REF in GGBS s 23,2 % in 22,24 % vsebnostjo zraka. Vzorca GC in CEM I sta imela vsebnost zraka 20,9 % in 20,8 %. Vsi vzorci so dobro omočljivi, pri čemer je vzorec GGBS edini, ki ni vpil kapljice vode v roku 15 sekund. Pri raziskavi protimikrobne učinkovitosti smo ugotovili, da sta cono inhibicije v vrednostih 15 mm in 2,7 mm razvila vzorca CEM in GC, kar bi lahko pripisali višjemu pH cementa. TGA/DSC ana-

liza je pokazala, da je imel največji masni delež CaCO<sub>3</sub> in najmanjši masni delež Ca(OH)<sub>2</sub> vzorec CEM, največji masni delež Ca(OH)<sub>2</sub> je imel vzorec REF ter najmanjši masni delež CaCO<sub>3</sub> vzorec GC. Pripravljene recepture na podlagi pregleda dobljenih in primerjanih lastnosti niso primerne za nosilne stene zaradi slabih tlačnih trdnosti, kakor tudi kot polnilo skeletne konstrukcije zaradi dodanega AGR 0/4, imajo pa potencial kot toplotnoizolativni ometi zunanjih in notranjih sten, vendar bi za to bilo treba še izmeriti toplotno prevodnost in mehansko obrabo površine teh receptur. Nadaljnjo bi bilo dobljene lastnosti smiselno primerjati s komercialno uporabljene toplotnoizolativnimi ometi. LCA raziskava študij dokazuje, da je konopljin beton brez agregata ogljično negativen kompozit skozi svoj življenjski cikel. Nadaljnjo bi se lahko izvedla LCA analiza pripravljenih receptur.

## 6 LITERATURA

Povzeto po: Gaberc J., Ekonomska in gradbena analiza ter analiza življenjskega cikla uporabe konopljinoga betona v Sloveniji: magistrsko delo, 2022. Maribor: Pridobljeno 11. 05. 2023 s spletne strani <https://dk.um.si/Dokument.php?id=164529&lang=slv>

[1] Delhomme F., Hajimohammadi A., Almeida A., Jiang A., Moreau D., Gan Y., Wang X., Castel A., Physical properties of Australian hurd used as aggregate for hemp concrete. *Materials Today Communications* vol. 24, 100986, 2020.

- [2] Mazhoud B., Collet F., Pretot S., Chamoin J., Hygric and thermal properties of hemp-lime plasters. *Building and Environment*, vol. 96, 206–216, 2016.
- [3] Jami T., Karade S.R., Singh L.P., A review of the properties of hemp concrete for green building application. *Journal of Cleaner Production*, vol. 239, 117852, 2019.
- [4] El-Chabib H., Properties of SCC with supplementary cementing materials. *Civil and Structural Engineering, Woodhead Publishing Series*, 283–308, 2020.
- [5] Aitcin P.-C., *Portland Cement, Science and Technology of Concrete Admixtures*, 27–51, 2016.
- [6] Apostolopoulou M., Bakolas A., Kotsainas M., Mechanical and physical performance of natural hydraulic lime mortars. *Construction and Building Materials* vol. 290, 123272, 2021.
- [7] Vogler N., Drabetzki P., Lindemann M., Kühne H.-C., Description of the concrete carbonation process with adjusted depth-resolved thermogravimetric analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* vol. 147, 6167–6180, 2022.
- [8] Muralikrishna I. V., Manickam V., *Environmental Management, Chapter Five – Life Cycle Assessment. Science and Engineering for Industry*, 57–75, 2017.
- [9] Arrigoni A., Pelosato R., Melià P., Ruggieri G., Sabbadini S., Dotelli G., Life cycle assessment of natural building materials: The role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of hempcrete blocks. *Journal of Cleaner Production* vol. 149, 1051-1061, 2017.
- [10] Boutin M.-P., Flamin C., Quinton S., Gosse G., Study of the environmental characteristics of hemp by analyzing life cycle (v francoščini - ETUDE DES CARACTERISTIQUES ENVIRONNEMENTALES DU CHANVRE PAR L ANALYSE DE SON CYCLE DE VIE). Ministry of Agriculture, Agrifood, and Forestry, Paris, 2006.
- [11] Ip K., Miller A., Life cycle greenhouse gas emission of hemp-lime wall constructions in the UK. *Resources, Conservation and Recycling* vol. 69, 1–9, 2012.
- [12] Pretot S., Collet F., Garnier C., Life cycle assessment of a hemp concrete wall: impact of thickness and coating. *Building and Environment* vol. 72, 223–231, 2014.

# Digitalni beton



PREDAVATELJ  
DR. LUKA ZEVIK

## UVOD

S hitrim razvojem digitalnih tehnologij in avtomatizacijo v proizvodnji je digitalizacija dosegla tudi gradnjo in beton. Glavna cilja tega intenzivnega razvoja, ki se dogaja skoraj povsod po svetu, sta avtomatizacija ter zmanjšanje okoljskega vpliva gradnje z betonom. Izraz "digitalni beton" označuje beton, ki se uporablja v kombinaciji z digitalnimi tehnologijami in zahteva posebne lastnosti, ki jih običajni beton ne zagotavlja. Te drugačne lastnosti svežega in strjenega betona dosežemo z uporabo novih formulacij betona, predvsem z mineralnimi in kemičnimi dodatki za beton. Med številnimi digitalnimi tehnologijami je uporaba betona še posebej prisotna v aditivnih tehnologijah, znanih kot 3D tiskanje betona (3DCP).

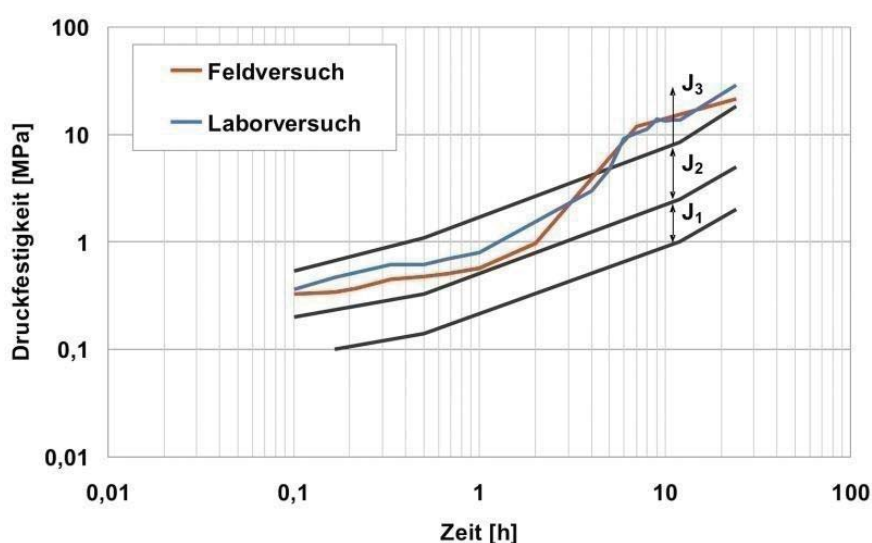
## TEHNOLOGIJA

Izvedba 3DCP je možna v številnih tehnoloških različicah. Pri 3DCP velikih objektov, kot so npr. stanovanjske hiše, se uporablja 3-osni žerjavni sistem, za manjše objekte pa printanje z robotsko roko, ki omogoča uporabo več kot 3-osi, ker je pomembno predvsem pri printanju zahtevnejših oblik. Za zanesljivo printanje (nanašanje) betona je ključnega pomena enakomeren pretok materiala skozi šobo. Čeprav obstajata obe izvedbi črpanja betona (dry-mix in wet-mix) je uporaba mešalnih črpalk mnogo bolj razširjena. Pri tej izvedbi se suha me-

šanica (ang. dry-mix) v mešalni komori zmeša z vodo. Črpalni del jo preko polžne črpalke enakomerno potiska skozi šobo. Pri 1K sistemu je ustrezna konsistenca za nanašanje sloja odvisna od sestave suhe mešanice, vsebnosti vode in časa od zamešanja z vodo do ekstrudiranja skozi šobo. Pri 2K sistemu pa se mešanica v mešalni glavi (desni del Slike 1) zmeša s pospešilom v danem razmerju. Pri tej tehnologiji je uspešnost nanašanja (konsistenca ekstrudiranega) betona odvisna predvsem od reakcije med vezivom (oz. betonom) in pospešilom, ki v mešalno glavo vstopa skozi svojo dozirno črpalko.



Slika 1. Primera 1K (desno) in 2K (levo) tehnologije 3DCP v podjetju Zevnik Lab.

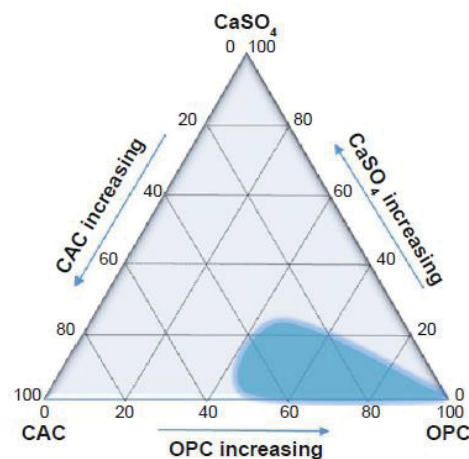


Slika 2. Prirast tlačnih trdnosti betona [čas(h)] vs [tlačna trdnost(MPa)]. Graf in pripadajoči razredi (J) so del avstrijskih smernic za brizgani beton.

## MATERIALI

Tehnologija črpanja malte oz. betona določa maksimalno dimenzijo agregata. Čeprav je mogoče črpanje materiala z  $d_{\max} = 4$  mm, pa je večina uporabljenih materialov za 1K in 2K 3DCP v območju med  $d_{\max} = 0,5\text{--}2$  mm, kar pomeni uporabo velike količine finih delcev na enoto volumna, kar prinaša za seboj predvsem problem krčenja materiala (plastičnega in zaradi sušenja).

Ključna lastnost printanega materiala (betona ali malte) je, da po nanosu (ekstrudiranju skozi šobo) obdrži obliko in jo ohrani tudi, ko nanese naslednji (oz naslednje) sloje. Največkrat se pri formuliranju takšnih materialov poslužuje pospeševanje hidratacije s pospešili, pa tudi uporabo tiksotropnih sredstev za kontrolo reoloških lastnosti svežega betona. Poleg tega pa se pospešeno hidratacijo v zelo zgodnjih časih zagotavlja tudi z uporabo ternarnih cementnih materialov. Slika 3 prikazuje smiselno uporabo ternarnega sistema (Portland cement, CAC - aluminatni cement in anhidrita -  $\text{SO}_4$ ).

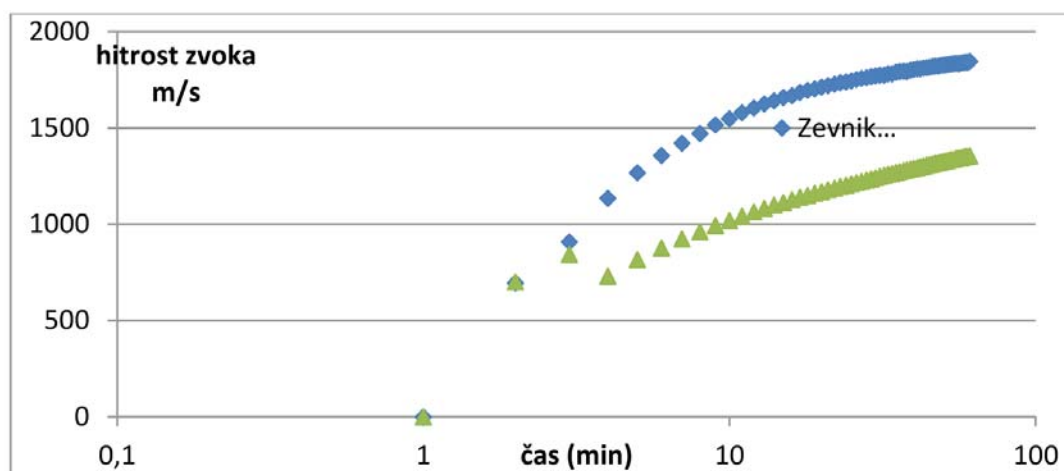
Slika 3. Ternarni diagram Portland cement (OPC), aluminatni cement (CAC) in anhidrit ( $\text{CaSO}_4$ ). Temno območje prikazuje sestave veziv, s potencialno kemijsko stabilnostjo.



V primeru 2K sistema se kot pospešilo pogosto uporablja brez-alkalno pospešilo za brizganje betona. Ta tehnologija oz standardi (npr. avstrijske smernice za brizgani beton) nam ponuja tudi možnost spremljanja razvoja tlačnih trdnosti materiala. Trdnost brizganega betona lahko določimo od 0,2 MPa dalje, oz od cca 6 min dalje. Čeprav nam taki rezultati lahko koristijo tudi v primeru 3DCP, pa je za učinkovito in kvalitetno printanje nujno treba zagotoviti ustrezen prirast trdnosti od 1 min dalje pa tudi poznavanje prehoda od tekočega v trdno stanje, ki se zgodi med 0–30 s od zamešanja pospešila z malto.

Kot ena izmed najustreznejših metod za spremljanje razvoja zelo zgodnjih tlačnih trdnosti je spremljanje ultrazvoka, ki potuje skozi malto. Za eksperiment smo uporabili napravo Vikasonic podjetja Schleibinger. Eksperiment je bil izveden v laboratorijih podjetja Salonit Anhovo. Malto v izredno kratkem času (npr. 15 s) zamešamo s pospešilom in ga nato v 15 s vgradimo v merilno celico. Rezultati so relevantni od 1 minute dalje.

Na Sliki 4 vidimo primerjavo dveh učinkovitih 2K sistemov. Z zelenimi trikotniki je označen rezultat cementa Salonit Special Plus, posebej razvit za učinkovito brizganje betona v tunelogradnji. Z modrimi kvadrati pa formulacija Zevnik Lab za 2K 3DCP. Formulacija izkazuje izredno hiter prirast trdnosti in nam tako omogoča printanje izredno velikih negativnih kotov. Kot ekstremen primer je na Sliki 5 prikazano printanje 2-metrске klopi, narejene za naročnika Alpacem Avstrija.



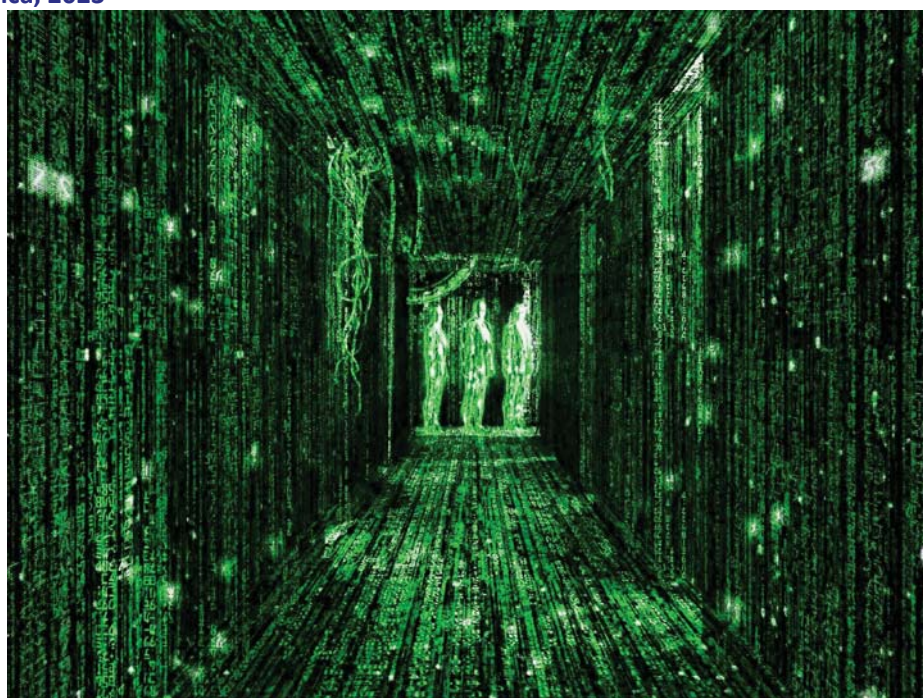
Slika 4. Hitrost ultrazvoka za 2 vezivi v odvisnosti od časa. Zeleni trikotniki - cement Salonit Special Plus; modri kvadrati - vezivo Zevnik Lab 3D2K.



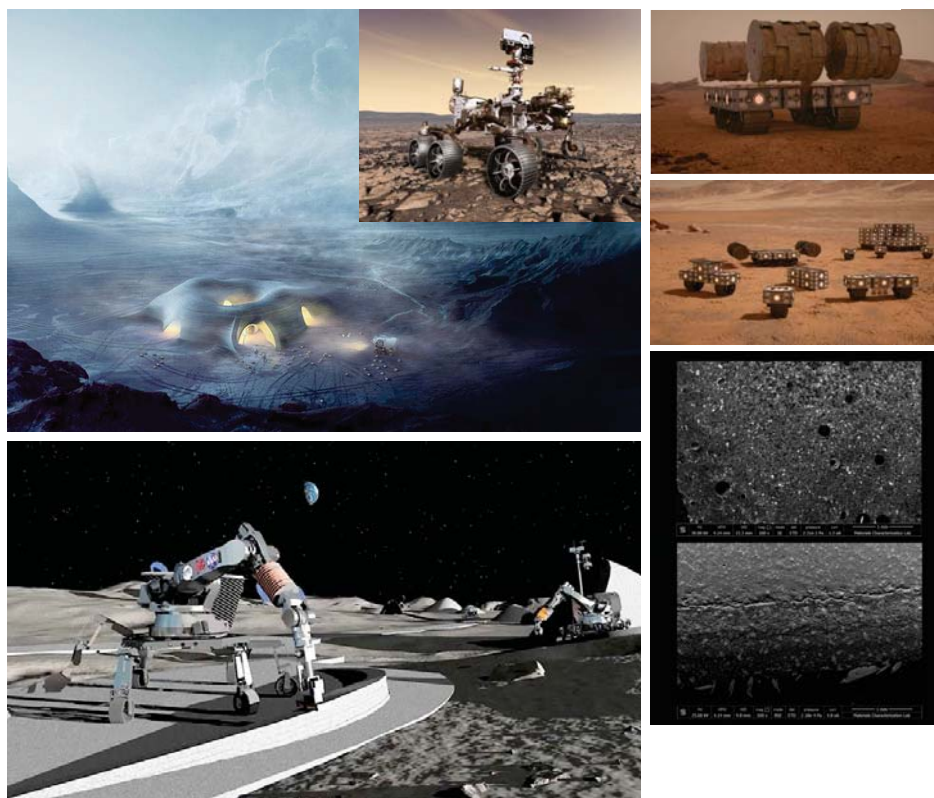
Slika 5. Primer ekstremnega 3D printanja klopi dolžine 2 m. Klop je bila narejena v 60 min. Oblikovanje Jurij Ličen, izvedba Zevnik Lab.

## DIGITALNI BETON

dr. Luka Zevnik, Zevnik Lab  
 mag. Jurij Ličen, FA, Enota  
 ZBS, Lipica, 2023



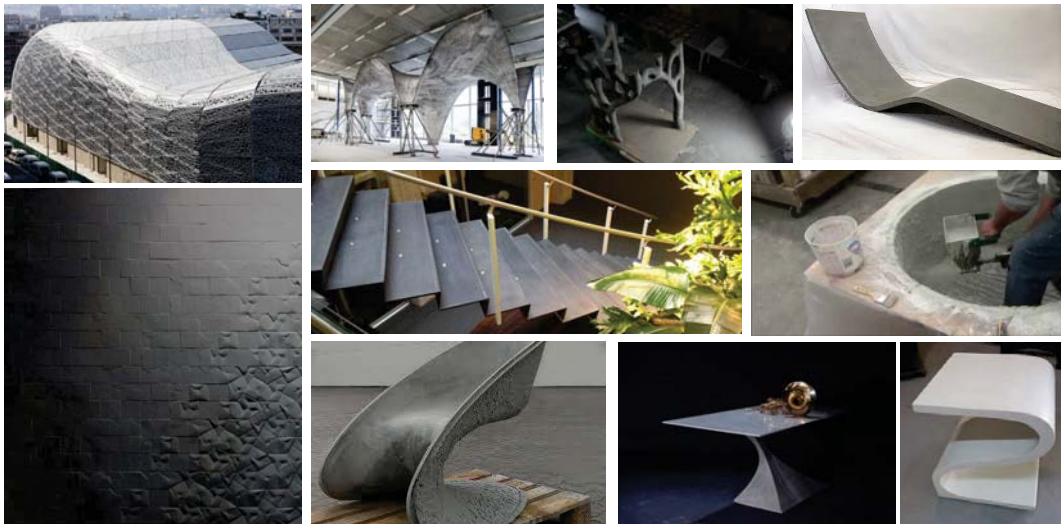
## DIGITALNI BETON



## DIGITALNI BETON

Vrste

ZEVNIK LAB



## DIGITALNI BETON

Digital fabrication

ZEVNIK LAB



<https://dfabhouse.ch/smart-slab/>



## DIGITALNI BETON

Digital casting, ACDC



*Future Tree, ETH, 2020*

<https://www.designboom.com/architecture/gramazio-kohler-research-eth-zurich-future-tree-switzerland-07-07-2020/>

## DIGITALNI BETON

Large scale 3D printing





## DIGITALNI BETON

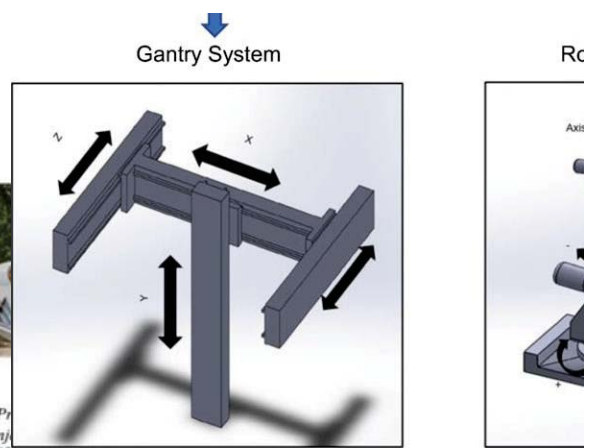
### Large scale 3D printing - beton



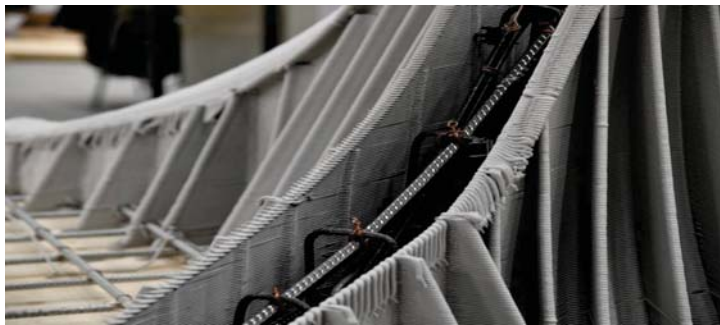
**Slika 11:** 3D tiskan nosilec, ki je oblikovan s tehniko topološke optimizacije. Material je uporabljen zgolj tam, kjer je to najino potrebno, kar privede do manjše porabe v natezni coni in večje količine materiala v tlačni coni (Vianqhem et al., 2020a).



**Slika 13:** Prefabricirani kosovi 3D tiskanih iz betonov (Parakes, 2021b).

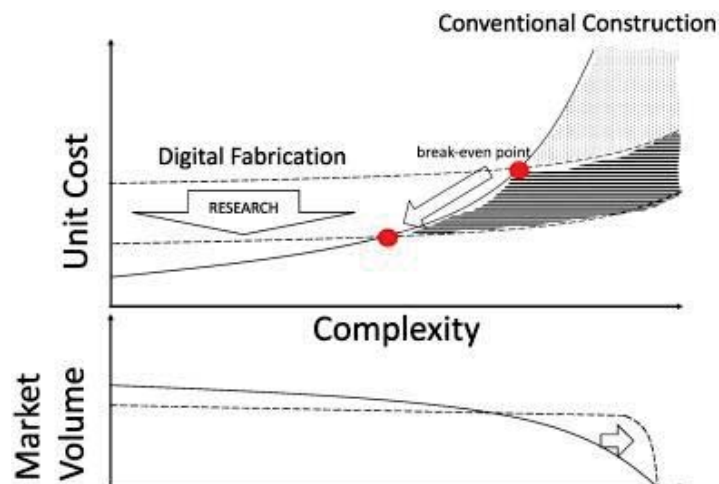


(c in f) 3D tiskana hiša v Italiji, ki je za razliko od ostalih izdelana iz glin, kljub njene geometriji nakazuje zanimive možnosti oblikovanja, ki jih odpira izdelovanje s pomočjo 3D (Parakes, 2021a). (g in h) most izdelan iz prefabriciranih kosov 3D tiskanih iz betonov, ki so sestavljeni iz lupino (Pintos, 2021).



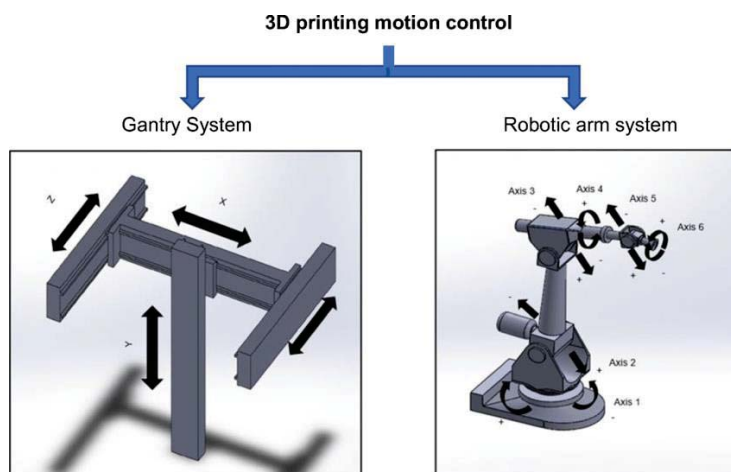
## DIGITALNI BETON

### Prihodnost 3DCP - cena



## DIGITALNI BETON

Large scale 3D printing – beton – gantry vs robot



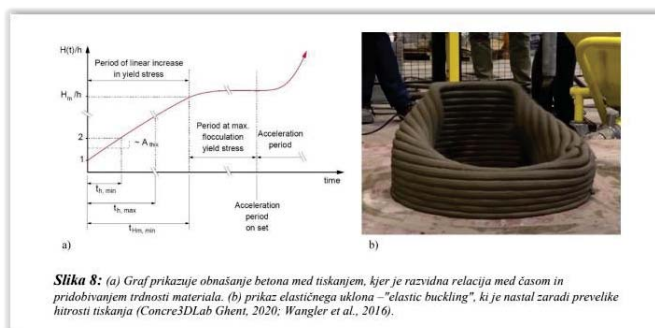
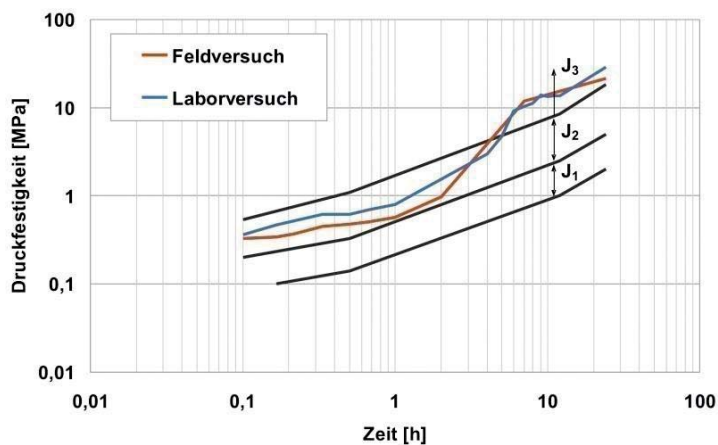
## DIGITALNI BETON

Large scale 3D printing – beton – 1K vs 2K



# DIGITALNI BETON

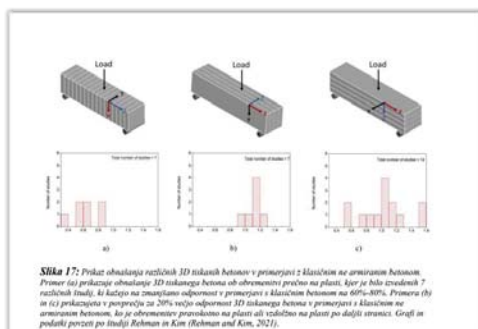
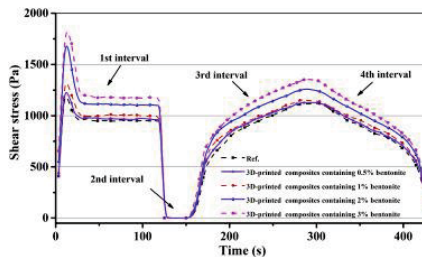
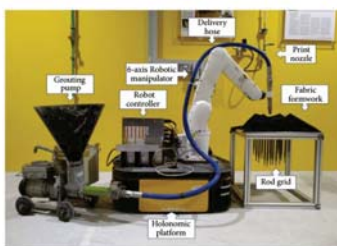
## Material - zahteve



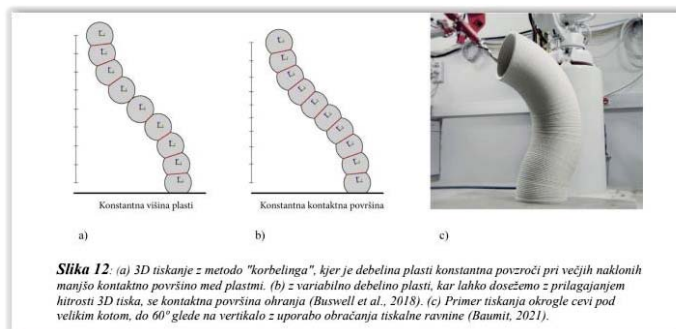
Slika 8: (a) Graf prikazuje obnašanje betona med tiskanjem, kjer je razvidna relacija med časom in pridobivanjem trdnosti materiala. (b) prikaz elastičnega uklona – "elastic buckling", ki je nastal zaradi prevelike hitrosti tiskanja (Concre3DLab Ghent, 2020; Wangler et al., 2016).

# DIGITALNI BETON

## Material - preiskave



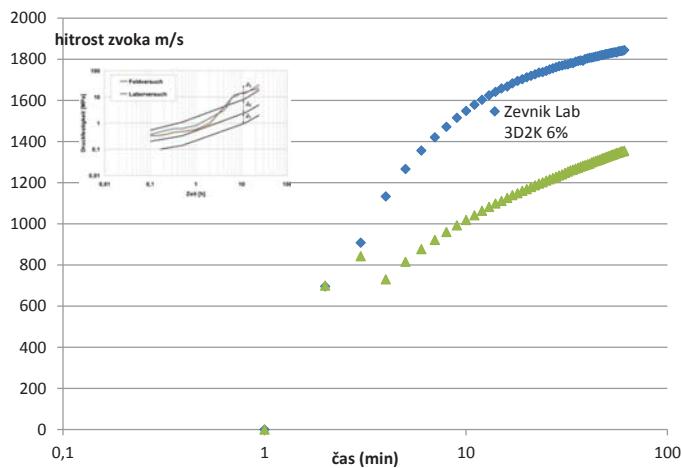
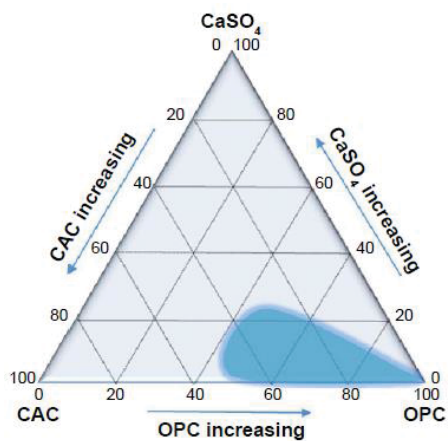
Slika 17: Prikaz obnašanja različnih 3D tiskanih betonov v primerjavi s klasičnim na armiranim betonom. Primer (a) prikazuje obnašanje 3D tiskanega betona ob obremenitvi prvo na plast, kjer je bilo izvedenih 7 različnih tiskov. Ki kažejo na zmanjšano odpornost v primerjavi s klasičnim betonom na 60%-80%. Primeri (b) in (c) prikazujeta v povprečju za 20% večjo odpornost 3D tiskanega betona v primerjavi s klasičnim na armiranim betonom, ko je obremenitev prvo izvedena na plasti ali vzdolžno na plasti po dolgi strani. Grafi in podatki prevzeti po študiji Rehman in Kim (Rehman and Kim, 2021).



Slika 12: (a) 3D tiskanje z metodo "korbelinga", kjer je debelina plasti konstantna povzroči pri večjih naklonih manjšo kontaktno površino med plastmi. (b) z variabilno debelino plasti, kar lahko dosežemo z prilagajanjem hitrosti 3D tiska, se kontaktna površina ohranja (Buswell et al., 2018). (c) Primer tiskanja okrogle cevi pod velikim kotom, do 60° glede na vertikalo z uporabo obračanja tiskalne ravnine (Baumit, 2021).

# DIGITALNI BETON

Material



# DIGITALNI BETON

Zevnik Lab 1K projekti





## DIGITALNI BETON

Zevnik Lab 2K Alpacem

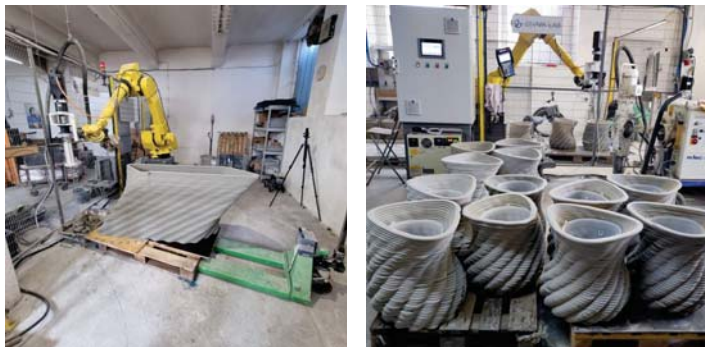
ZEVNIK LAB



## DIGITALNI BETON

Zevnik Lab 2K Alpacem

ZEVNIK LAB



DR. LUCIJA HANŽIČ, DR. LIDIJA KORAT,  
KATARINA ŠTER, DR. MATEJA ŠTEFANČIČ

ZAG

# Dodajalne tehnologije na ZAG za digitalno gradbeništvo



PREDAVATELJICA  
DR. MATEJA ŠTEFANČIČ

## UVOD

Zanimanje za digitalno dodajalno tehnologijo, poljudno imenovano 3D tisk, je tudi v gradbeništvu v izjemnem porastu. To nakazuje število znanstvenih objav, ki je naraslo iz ~25 v letu 2011 na preko 400 objav v letu 2021 (Ma et al., 2022). V tem času je tehnologija napredovala od unikatnih tiskalnikov izdelanih v raziskovalnih laboratorijih do komercialno dostopnih tiskalnikov, ki so primerni za proizvodnjo na gradbišču in lahko tiskajo stavbe v naravni velikosti (Cobod, 2023; CyBe, 2023). Ob globalnem pomanjkanju delovne sile v gradbeni industriji postaja 3D tiskanje vedno bolj zanimiva alternativa za izvajalce gradbenih del, sočasno pa omogoča izdelavo digitalno oblikovanih elementov z optimizirano geometrijo, kar znatno zmanjšuje porabo materiala (Wangler, 2023).

Beton, kot material katerega letna poraba predstavlja ~80 % celotne svetovne porabe materialov (Ashby, 2012), je seveda v središču pozornosti za 3D tisk v gradbeništvu. Glede na svoje lastnosti je izjemno primeren za ekstruzijsko oblikovanje, saj je v svežem stanju plastičen in ga je možno

iztisniti skozi šobo, po iztiskanju ohrani obliko in se v primernem času strdi v kompozit z dobro obstojnostjo in mehanskimi karakteristikami. Cement kot vezivo, ki je bistveno za navedene lastnosti betona, pa je moč uporabiti tudi za 3D tiskanje s kemično induciranim spajanjem slojev praškastega materiala.

Na ZAG tiskamo ne-le s cementnimi materiali, temveč tudi z materiali na osnovi sadre in gline, za kar uporabljamo dva ekstruzijska tiskalnika in en tiskalnik za praškaste materiale. V nadaljevanju prispevka najprej predstavljamo osnovne koncepte in tiskalnike na ZAG, nato pa še naše aktivnosti na področju digitalnih dodajalnih tehnologij.

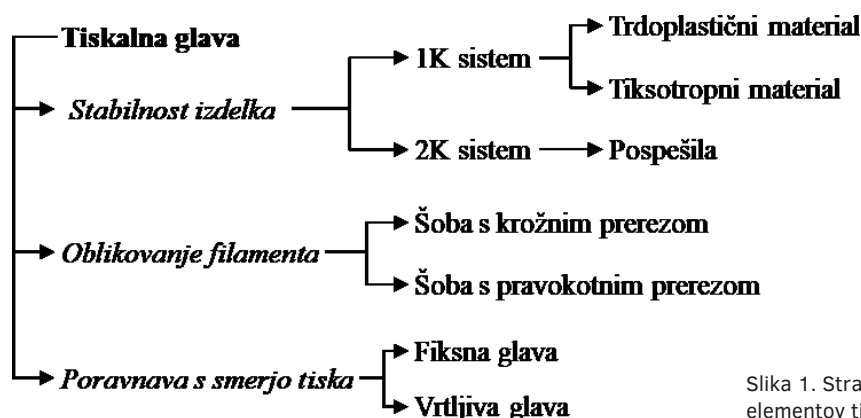
## OSNOVNI KONCEPTI

Digitalna proizvodnja je neločljivo povezana z digitalnim oblikovanjem izdelkov, zato je pospešen razvoj postal možen šele s široko dostopnostjo računalnikov in programskih orodij za tridimenzionalno modeliranje. Posledično je digitalna proizvodnja še v zgodnji razvojni fazi, zato se hitro pojavljajo nove metode in aplikacije, terminologija pa je pogosto nesistematična. V gradbeništvo sta kot najbolj obetavni tehniki prepoznani ekstruzijsko tiskanje in kemično inducirano spajanje slojev praškastih materialov, zato princip teh dveh tehnik predstavljamo v nadaljevanju.

Spajanje slojev praškastih materialov (ang. "powder-bed binding" ali tudi "particle-bed binding") poteka z nanašanjem tankih slojev prahu na tiskalno površino in selektivnim nanašanjem tekoče komponente na mesta, kjer se oblikuje proizvod. Pri tem sta možni dve strategiji, in sicer (i) praškasta komponenta sestoji iz prekursorja (veziva) ter, opcijsko, inertnega polnila (agregata), tekoča komponenta pa je aktivator (npr. voda), in (ii) praškasta komponenta je inertna, tekoča komponenta pa vsebuje prekursor in aktivator, kot na primer cementna pasta. Izraz praškasta komponenta je nekoliko zavajajoč, saj je možno to metodo uporabiti tudi z agregati, katerih zrna so večja od 1 mm. Tekočo komponento je možno nanašati kapljično ali z brizganjem, zato se za tovrstne tehnike pogosto uporablja tudi angleški izraz "binder-jetting".

Oblikovanje betona z ekstruzijo ni noviteta, saj se ekstrudiranje svežega betona v gradbeni proizvodnji že desetletja uporablja v tehnologiji drsnih opažev (ang. "slip-forming" ali tudi "sliding formwork"). Novost je v povezovanju ekstruzijskih tehnik z digitalno vodenimi nosilnimi sistemi, po katerih pogosto razlikujemo ekstruzijske tiskalnike. Najpogostejša sistema sta portalni sistem s tremi prostostnimi stopnjami in artikulirana robotska roka s šestimi prostostnimi stopnjami. Na nosilnem sistemu je nameščena tiskalna glava, katere centralni del je ekstruzijska šoba. Dovajanje materiala na šobo poteka s črpalko, na nekaterih laboratorijskih tiskalnikih pa tudi ročno v zalogovnik na tiskalni glavi. Možna je tudi kombinacija obeh sistemov, kjer črpalka dovaja material v manjši zalogovnik na tiskalni glavi, kar po eni strani omogoča boljšo kontrolo iztekanja materiala pri prekinjenih linijah ter dodajanje komponent, kot so pospešila. Kontrolo iztekanja in mešanje komponent omogoča polžasti vijak, ki material potiska iz zalogovnika skozi šobo.

Pri razvoju tiskalne glave je treba najprej proučiti strategijo zagotavljanja stabilnosti sveže tiskanega 3D izdelka, saj dodajanje slojev lahko povzroči deformacije zaradi poseda naloženih slojev svežega betona ali pa povzroči uklonsko porušitev. Stabilnost izdelka se pri tako imenovanih enokomponentnih (1K) sistemih zagotavlja s sestavo mešanice, in sicer tako, da je beton bodisi trdo plastičen, bodisi tiksotropen. Pri dvokomponentnih (2K) sistemih pa potrebujemo na tiskalni glavi nastavek za doziranje pospešila in mehanizem za mešanje obeh komponent. V odvisnosti od izbrane strategije se izbere oblika šobe. Za 1K trdoplastične materiale so bolj primerne šobe s pravokotnim prerezom, medtem ko 1K tiksotropni materiali in 2K sistemi omogočajo širši izbor šob, a se najpogosteje uporablja šoba okroglega prereza. Za tiskanje ukrivljenih elementov s pravokotno šobo je potrebna vgradnja vrtljive glave, medtem ko je z okroglo šobo možno tiskati ukrivljene linije z nepremično glavo. Na Sliki 1 je grafično prikazana povezava med strategijo tiskanja in izbiro elementov tiskalne glave.



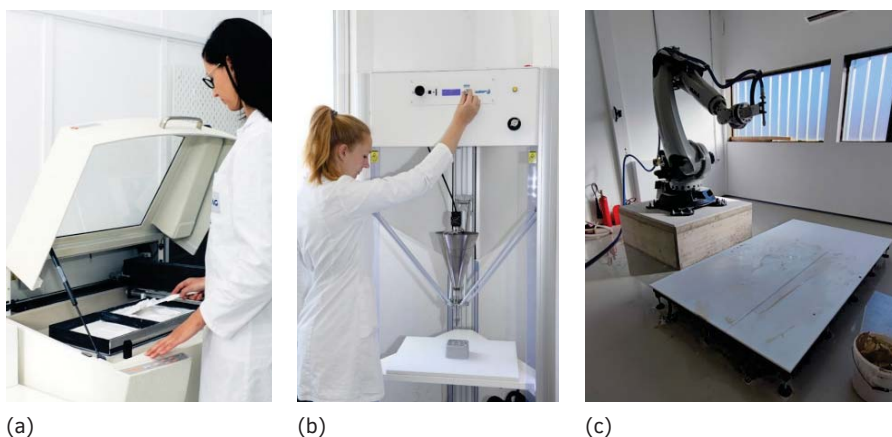
Slika 1. Strategija tiskanja in izbira elementov tiskalne glave.



### 3D TISKALNIKI NA ZAG

Na ZAG smo prvi tiskalnik nabavili leta 2019, in sicer tiskalnik *ZPrinter 310* (Slika 2a) za kapljični nanos aktivatorja na praškasti material. Tiskalnik zaenkrat uporabljamo za tiskanje s sadro, možno pa je tiskanje tudi z drugimi reaktivnimi prahovi. Površina tiskalne komore je  $200 \times 250 \text{ mm}^2$ , višina pa 200 mm. Debelina nanosa prahu je 0,1–0,2 mm, resolucija pa  $300 \times 450 \text{ dpi}$ .

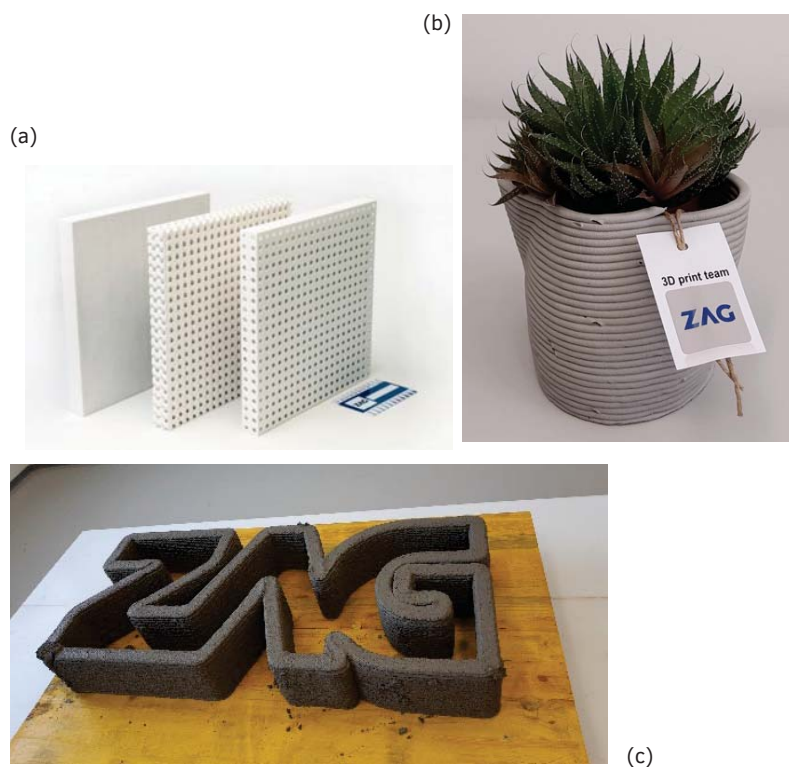
V letu 2022 smo vzpostavili dva ekstruzijska sistema, in sicer najprej manjši tiskalnik *Delta WASP 40100* (Slika 2b) in nato še *Robotsko postajo za digitalno proizvodnjo* (Slika 2c). Prvi tiskalnik s tremi prostostnimi stopnjami sestavljajo nosilni sistem z delta konstrukcijo, ki omogoča tiskanje na površini s premerom 400 mm do 1 m v višino. Tiskalnik ima dve zamenljivi tiskalni glavi, in sicer (a) gravitacijsko glavo za tiskanje mešanice na bazi cementa in (b) kompresijsko glavo za tiskanje z glinenimi materiali. Serija šob različnih velikosti omogoča ekstruzijo 2–10 mm širokih filamentov z maksimalnim zrnem agregata 1 mm.



Slika 2. Naprave za aditivno proizvodnjo na ZAG, in sicer (a) tiskalnik za spajanje slojev praškastih materialov *ZPrinter 310*, in ekstruzijska tiskalnika *Delta WASP 40100* (b) ter *Robotska postaja za digitalno proizvodnjo* z robotsko roko *KUKA KR 240 R2700* (c).

Osrednja komponenta *Robotske postaje* je robotska roka *KUKA KR 240 R2700* s šestimi prostostnimi stopnjami, dosegom 2,7 m in nosilnostjo 240 kg. Tiskalna glava je fiksna in sestoji iz vertikalne šobe okroglega prereza in je torej primerna za 1K mešanice s srednje plastično konsistenco. Dovajanje materiala direktno na šobo poteka s črpalko *MAI 2PUMP Pictor 3D*, ki ima kapaciteto 1,2–9,0 L/min in zalogovnik prostornine 33 L. Črpalka je deklarirana za maksimalno zrno 2 mm. Iztisnjeni filament ima širino ~15–50 mm, odvisno od mešanice, hitrosti črpalke in hitrosti pomika glave. Frontalno postavljena miza za tiskanje ima površino  $2,7 \times 1,5 \text{ m}^2$ , tiskanje pa je možno tudi bočno na levi in desni strani robota.

Na Sliki 3 so prikazani izbrani izdelki, natisnjeni z navedenimi tiskalniki, in sicer (a) akustični paneli izdelani s tehnologijo kemičnega spajanja slojev sadre na tiskalniku *ZPrinter 310*, (b) okrasna posoda za rastline natisnjena z ekstruzijo na tiskalniku *Delta WASP 40100*, in (c) logotip ZAG natisnjen z ekstruzijo na *Robotski postaji za digitalno proizvodnjo*.



Slika 3. Izdelki nastali s tehnikami dodajalne tehnologije na ZAG, in sicer (a) akustični paneli tiskani z industrijsko odpadno sadro na tiskalniku *ZPrinter 310*, (b) okrasna posoda za rastline natisnjena s cementno mešanico z maksimalnim zrnem agregata 1 mm na tiskalniku *Delta WASP 40100* ter (c) logotip ZAG natisnjen s cementno mešanico z maksimalnim zrnem agregata 4 mm na *Robotski postaji za digitalno proizvodnjo*.



## AKTIVNOSTI IN SODELOVANJA

ZAG kot javni zavod deluje na znanstvenih, razvojnih in industrijskih raziskavah s ciljem razvijanja in prenašanja znanja v slovenski prostor. S tem namenom sodelujemo v mednarodnih združenjih in projektih, kakor tudi z izobraževalnimi inštitucijami in industrijo v Sloveniji. Te aktivnosti predstavljamo v nadaljevanju.

### Sodelovanje v združenju RILEM

RILEM (RILEM, 2023) je mednarodno združenje testnih laboratorijev, v okviru katerega deluje večje število področnih tehničnih komitejev (TC). Prvi TC na temo 3D tiska gradbenih proizvodov iz betona, 276-DFC ang. *"Digital fabrication with cement-based materials"*, je deloval v obdobju 2016–2021 in je leta 2022 izdal obsežno pregledno poročilo (Roussel and Lowke, 2022). Potreba po nadaljnjih aktivnostih, ki bi omogočile prenos tehnologije v gradbeno prakso, je vodila v ustanovitev dveh TC-jev za obdobje 2021–2026, in sicer 303-PFC ang. *"Performance requirements and testing of fresh printable cement-based materials"* in ADC ang. *"Assessment of Additively Manufactured Concrete Materials and Structures"*. Cilj obeh je, da raziščeta primernost obstoječih testnih metod in ponudita nove, specifične testne metode in pristope za preverjanje reološkega obnašanja mešanic in strukturne stabilnosti le-teh med 3D tiskanjem (PFC), ter mehanskih lastnosti, strukturne integritete in obstojnosti 3D tiskanih izdelkov (ADC). Oba TC-ja izvajata obsežno medlaboratorijsko raziskavo v katero je vključenih nad 30 laboratorijev iz celega sveta, med njimi tudi ZAG.

Za potrebe raziskave v okviru ADC smo z mešanico na osnovi cementsa, ki smo jo razvili na ZAG, natisnili vzorca prikazana na Sliki 4. Mešanica je vsebovala agregat z maksimalnim zrnem 4 mm, apnenčevino, cement CEM II, mikrosiliko, vodo in kemijski dodatek, in sicer superplastifikator. V skladu z razvito metodologijo smo za mehanske teste izrezali kubične vzorce s stranico 40 mm ter prizmatične vzorce velikosti 40 × 40 × 160 mm<sup>3</sup>. Kubični vzorci so bili izrezani na treh nivojih, in sicer na dnu, v sredini in na vrhu natisnjenega izdelka. Vzorce smo tlačno obremenili v treh smereh glede na smer nalaganja filameta. Prizmatične vzorce smo upogibno obremenili ter jim izmerili modul elastičnosti. Tudi ti testi so bili izvedeni v treh različnih orientacijah glede na smer tiskanja. V okviru preizkušanja obstojnosti se izvajajo testi vpivanja vode, odpornosti na prodor kloridov ter odpornosti na karbonatizacijo.

### Znanstveno-raziskovalna dejavnost

Na področju 3D tiska gradbenih proizvodov smo na ZAG uspešno zaključili nacionalni raziskovalni projekt z naslovom *Razvoj prahu za namene 3D-tiskanih mezostrukturnih izolacijskih materialov* (Korat, 2019), v okviru katerega je bilo raziskanih več vrst odpadne sadre, ki so izvirale iz različnih industrijskih dejavnosti v Sloveniji. Izbrana sadra, ki izvira iz procesa razžvepljevanja dimnih plinov, je bila predhodno pomleta za optimizacijo granulacije (Slika 5a-b) in uporabljena za izdelavo mezoporoznih toplotno oziroma zvočno izolativnih panelov, izdelanih z metodo spajanja slojev prahu na tiskalniku *ZPrinter 310*. Za uspešno tiskanje je bilo treba izvesti tudi optimizacijo parametrov tiskanja, kot so hitrost in debelina nanosa (Slika 5c).

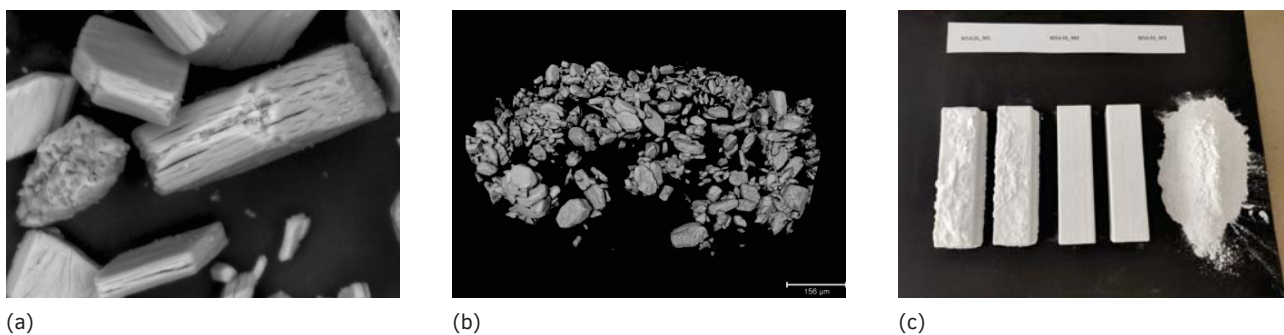


(a)

(b)

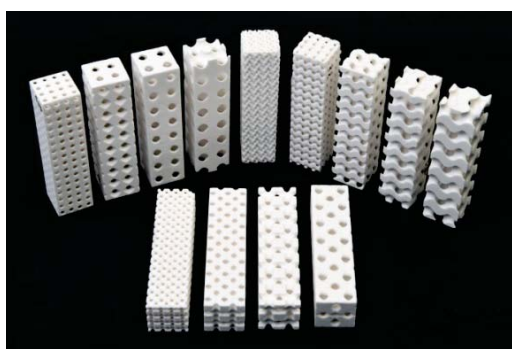


Slika 4. Prikaz vzorcev nastalih za medlaboratorijsko raziskavo RILEM-ovega tehničnega komiteja ADC (a) tiskanje vzorca za teste obstojnosti, in (b) izdelan vzorec za mehanske teste.

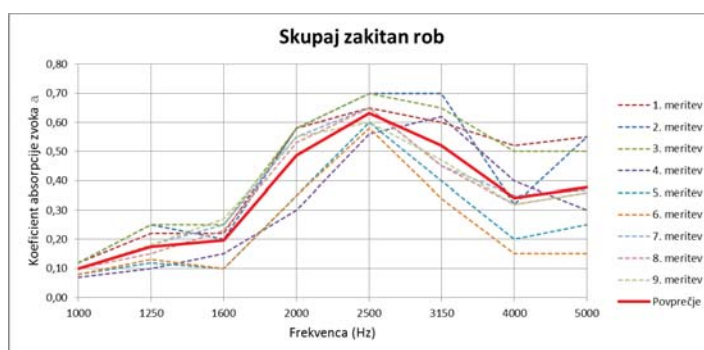


Slika 5. Sadra iz procesa razžvepljevanja dimnih plinov, kjer slika (a) prikazuje morfologijo delcev pod vrstičnim elektronskim mikroskopom, (b) porazdelitev velikosti delcev s tehniko rentgenske računalniške mikrotomografije (mikroXCT) in slika (c) vzorce velikosti  $2 \times 2 \times 8 \text{ mm}^3$  izdelane v procesu optimiziranja parametrov tiskalnika.

Inovativne panele so definirale celične strukture zasnovane z matematično metodo tri-periodične minimalne površine (TPMS), prikazane na Sliki 6a. Z reguliranjem velikosti in oblike celic je možno selektivno izbrati frekvenco zvoka, ki jo paneli absorbirajo (Slika 6b). Tovrstne kompleksne oblike so izvedljive izključno z digitalnimi tehnologijami.



(a)



(b)

Slika 6. Uporaba 3D tiska za izdelavo akustičnih panelov iz odpadne sadre, kjer fotografija (a) prikazuje vzorce velikosti  $2 \times 2 \times 8 \text{ mm}^3$  z različnimi oblikami celičnih struktur zasnovanih z matematično metodo tri-periodične minimalne površine (TPMS), medtem ko so na grafu (b) prikazani rezultati meritev koeficienta absorpcije zvoka v impedančni cevi.

V letu 2023 pričujemo z izvedbo treh projektov, v katerih je zastopano ekstruzijsko 3D tiskanje s cementnimi kompoziti. V pilotnem projektu *Ultra* (2023) sodelujemo z več fakultetami Univerze v Ljubljani, in sicer s Pedagoško fakulteto, Oddelek za likovno pedagogiko, Naravoslovnotehniško fakulteto, Katedra za oblikovanje tekstilij in oblačil in s Filozofsko fakulteto, Oddelek za arheologijo, pri oživiljanju degradiranih prostorov z znanstveno-umetniškim pristopom. Avtohtoni materiali degradiranih industrijskih okolij, kot je na primer limonitno rudniško blato iz rudnika Sitarjevec iz Litije, bodo deloma nadomestili komponente mešanic cementnih kompozitov, ki bodo uporabljene za 3D tisk umetniških prototipov. Eden izmed ciljev projekta je, da se degradirani industrijski prostor preko umetniških intervencij oživi v kulturni prostor, ki postane tudi učno okolje.

Projekt *Circuit* (2023) je mednarodni projekt, katerega osrednji del je pet pilotnih objektov. ZAG bo v sodelovanju z Občino Črna na Koroškem zgradil manjši premostitveni objekt čez potok Bistra, pri čemer bodo implementirane tri inovativne tehnologije, in sicer (i) krajni oporniki iz geosintetične armirane zemljine, (ii) modularna prekladna konstrukcija iz rabljenih nosilcev in prefabriciranih plošč, in (iii) 3D tiskana betonska varovalna ograja. Za slednjo bomo razvili betonsko mešanico, ki bo vsebovala reciklirane materiale, segmenti ograje pa bodo zasnovani po načelu "oblika sledi sili" (ang. "force follows form"), kar zagotavlja bistveno zmanjšanje količin vgrajenega betona. Oblika ograje bo zasnovana s parametričnimi in generativnimi metodami.

V projektu *Transition* (2023) sodelujemo z Riga Technical University in industrijskim partnerjem Sakret, oba iz Latvije, ter Kaunas University of Technology iz Litve. Namen projekta je razviti trajnostni cementni kompozit, ki vsebuje čim večjo količino pepela iz oljnega skrila in je prime-

ren za ekstruzijsko 3D tiskanje gradbenih proizvodov. Za dosego ciljev bomo inovativno implementirali dve tehnologiji, in sicer (i) kolizijsko mletje za optimizacijo granulacijske sestave delcev pepela oljnega skrilavca in (ii) visokofrekvenčno ultrazvočno disperzijo za spodbujanje strjevanja kompozita ter posledično izboljšanje lastnosti, ki zagotavljajo stabilnost svežega proizvoda med tiskanjem.

Poleg že odobrenih projektov pa smo na domačem razpisu *Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije* in na mednarodnem razpisu *ERA-MIN* prijavili še projekte za tiskanje z zemljo in alkalno-aktiviranimi betoni.

### Strokovne aktivnosti

Zaradi neobstoja zakonodaje in standardizacije, ki bi regulirala kvaliteto in kakovosti 3D tiskanih gradbenih proizvodov, se gradbena podjetja le težka odločajo za vpeljevanje aditivnih digitalnih tehnologij v proizvodne procese. K temu pomembno prispeva tudi pomanjkanje kompetentnih kadrov, ki bi to tehnologijo vpeljali v proizvodnjo. ZAG nudi podporo držnim podjetjem, katerih vizija je usmerjena v digitalni prehod, pri njihovem odkrivanju neznank, reševanju izzivov in iskanju poti za uresničevanje prototipnih projektov, ki vključujejo izgradnjo avantgardnih bivanjskih in poslovnih prostorov, turističnih objektov, unikatnih strukturnih elementov in krajinske arhitekture. Trenutno imamo vzpostavljeno sodelovanje z dvema industrijskima partnerjema. V tem kontekstu izvajamo razvoj in optimizacijo materialov za tiskanje, mehanske teste tiskanih materialov, obremenilne teste tiskanih struktur v merilu 1:1 in teste obstojnosti glede na predvideno stopnjo izpostavljenosti.

### Delovno mentorstvo pri usposabljanju študentov

V skrbi za izobraževanje kadrov s kompetencami na področju digitalnih tehnologij v gradbeništvu nudimo delovno mentorstvo in praktično usposabljanje študentom višje in visokošolskih študijskih programov, pri čemer jih skozi pripravo zaključne naloge uvajamo v raziskovalne in razvojne pristope in metode. Tako smo že vključeni v zaključne naloge študentov magistrskega študija *Univerze na Primorskem, Fakultete za matematiko, naravoslovje in informacijske tehnologije* in *Univerze v Ljubljani, Fakultete za strojništvo*, dogovarjamo pa se tudi s študenti programa gradbeništvu na *Višji strokovni šoli Celje*. Pri teh nalogah se ukvarjamo s projektiranjem mešanice za ekstruzijsko 3D tiskanje, pri katerih je poudarek na trajnostnosti mešanic. Za le-te tako izbiramo lokalne vhodne komponente ter odpadne materiale iz industrije, kot na primer odpadni mulj, ki nastane pri žaganju in oblikovanju naravnega kamna. Ukvarjamo pa se tudi z izboljšavami tehnologije, in sicer z implementacijo senzorjev za detekcijo posedanja slojev in korekcijo poti tiskanja.

## ZAKLJUČEK

Na ZAG imamo vpeljani dve tehnologiji za aditivno digitalno proizvodnjo gradbenih izdelkov, in sicer spajanje slojev praškastih materialov s tiskalnikom *ZPrinter 310* in ekstruzijsko tiskanje s tiskalnikom *Delta WASP 40100* in z *Robotsko postajo za digitalno proizvodnjo*. Na tem področju izvajamo več domačih in mednarodnih projektov, delujemo v mednarodnih razvojnih skupinah, nudimo podporo slovenski industriji pri prehodu na digitalne tehnologije in v sodelovanju z višje in visokošolskimi izobraževalnimi inštitucijami skrbimo za vzgojo kompetentnih kadrov na področju digitalne proizvodnje. K sodelovanju vabimo vse zainteresirane deležnike.

## VIRI

- Ashby, M.F., 2012. *Materials and the Environment: Eco-informed Material Choice*. Butterworth-Heinemann, Waltham, ZDA in Oxford, ZK.
- Cobod, 2023. Cobod International, spletni vir <https://cobod.com/>, dostop 08/05/2023.
- CyBe, 2023. CyBe Construction, spletni vir <https://cybe.eu/>, dostop 08/05/2023.
- Circuit, 2022. Holistic approach to foster CIRCULAR and resilient transport InfraStructures and support the deployment of Green and Innovation Public Procurement and innovative engineering practices. HORIZON-CL5-2022-D6-02-06, trajanje projekta 2023-2027.
- Korat, L., 2019. Razvoj prahu za namene 3D-tiskanih mezostrukturnih izolacijskih materialov. Trajanje projekta 2019-2021. Spletni vir <https://cris.cobiss.net/ecris/si/sl/project/17998>, dostop 08/05/2023.
- Ma, G., Buswell, R., Leal da Silva, W.R., Wang, L., Xu, J., Jones, S.Z., 2022. Technology readiness: A global snapshot of 3D concrete printing and the frontiers for development. *Cement and Concrete Research* 156, 106774, doi: 10.1016/j.cemconres.2022.106774.
- RILEM, 2023. RILEM Active TCs, spletni vir <https://www.rilem.net/activetcs>, dostop 08/05/2023.
- Roussel, N., Lowke, D. (ur.), 2022. *Digital Fabrication with Cement-Based Materials: State-of-the-Art Report of the RILEM TC 276-DFC*. Springer International Publishing, Cham, Švica, doi:10.1007/978-3-030-90535-4.
- Transition, 2022. Transforming waste into high-performance 3D printable cementitious composite. M-ERA.NET Call 2022, trajanje projekta 2023-2026.
- Ultra, 2022. Vseživljenjsko učenje in mikrodokazila (pilotni program): Degradirana okolja in njihovo oživljanje v kulturni prostor z umetnostjo. Trajanje projekta 2023-2025.
- Wangler, T., 2023. Process-Properties-Performance in 3D printed concrete: Focus on sustainability. Konferenca *RILEM Spring Convention – 4th International Congress on Materials and structural sustainability*, RSC-CMSS23 Abstracts and Proceedings, Keynote Lecture, Rabat, Morocco.

MARUŠA MRAK<sup>1, 2</sup>, DR. SABINA DOLENEC<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ZAG

<sup>2</sup>MEDNARODNA PODIPLOMSKA ŠOLA JOŽEFA STEFANA

# Termodinamsko modeliranje - uporabno orodje za določanje poteka hidratacije s prikazom razvoja faz



PREDAVATELJICA  
MARUŠA MRAK

## POVZETEK

Termodinamsko modeliranje je vsestransko orodje za analizo kompleksnih cementnih sistemov in pomaga pri razumevanju ter razvoju sodobnih hidravličnih veziv. V zadnjih dvajsetih letih se je uveljavilo predvsem pri proučevanju hidratacije in nastanku hidratacijskih produktov Portlandskega cementa, pa tudi drugih cementov, kot so kalcijevo sulfoaluminatni cement, kalcijevo aluminatni cement ter alkalijsko aktivirani cementov. Z modeliranjem termodinamskih procesov in izračunov lahko predvidimo nastanek stabilnih faz



(npr. etringit, kalcijev silikat hidrat, monosulfat, portlandit, strätlingit itd.), ki nastanejo v odvisnosti od sestave nehidratiziranega cementa (Kulik et al., 2021; Kunther, 2016; Winnefeld & Lothenbach, 2010).

Poleg napovedovanja sestave in deleža združb hidrationskih produktov v času hidrationske, pa je možno hitro in enostavno spreminjanje različnih parametrov. Tako je možno modeliranje faznih sprememb, ki nastanejo v odvisnosti od sestave porne vode, vodocementnega razmerja, mineralnih dodatkov ali vplivov okolja, kot je na primer temperatura, relativna vlažnost, prisotnost sulfatov in kloridov ter procesov karbonatizacije (Kulik et al., 2021; Lothenbach et al., 2008, 2019; Lothenbach & Zajac, 2019).

Številne študije so pokazale, da lahko termodinamsko modeliranje, skupaj z natančnimi in popolnimi termodinamskimi bazami podatkov, zanesljivo napove sestavo hidratiziranega cementa in kemijsko sestavo. Termodinamski izračuni in eksperimenti se tako lahko medsebojno dopolnjujejo; po eni strani izračuni omogočajo popolnejše interpretacije pridobljenih rezultatov z eksperimenti in pomagajo prepoznati ključne poskuse, ki jih je še treba izvesti. Po drugi strani pa eksperimenti dajo podatke, ki zagotavljajo vhodne parametre modela in potrjujejo rezultate modeliranja (Lothenbach & Zajac, 2019). Ker termodinamsko modeliranje omogoča ekstrapolacijo na daljša časovna obdobja, je v nekaterih primerih tudi edino možno sredstvo za ocenjevanje trajnosti cementnih materialov (Lothenbach & Zajac, 2019).

Prednost termodinamskih izračunov je, da končne sestave faz ni treba poznati vnaprej, ampak se predvidi na podlagi sestave vhodnega materiala ali časa hidrationske. Izračuni termodinamskega ravnotežja, ki temeljijo na podlagi termodinamskih baz podatkov, kateri veljajo za kateri koli geokemični sistem, napovejo, katere trdne snovi in raztopine so stabilne v posebnih pogojih poskusa, medtem ko se nestabilne faze zanemari (Kulik et al., 2013; Lothenbach & Zajac, 2019). Upošteevane so vse kemijske interakcije med trdnimi snovmi, trdnimi raztopinami, plinasto fazo in elektroliti. Termodinamsko modeliranje torej temelji na poznavanju termodinamskih podatkov (npr. topnosti) vseh trdnih, vodnih in plinastih snovi, ki lahko nastanejo v sistemu (Kulik et al., 2013; Lothenbach & Zajac, 2019).

Obstajajo različni programi za geokemično modeliranje kot na primer PHREEQC, EQ3/6, CHES ali GEMS za izračun fazne sestave, ki imajo med seboj zelo majhne razlike v rezultatih, pod pogojem, da se uporablja ista baza podatkov. V programih se ponavadi uporabljata dva osnovna pristopa za izračun termodinamskega ravnotežja: a) reševanje enačb zakona o delovanju mas in b) minimizacija Gibbsove proste energije sistema (Kulik et al., 2021; Lothenbach & Zajac, 2019).

V prispevku so predstavljeni termodinamski modeli hidrationske različnih belitno-kalcijevo sulfoaluminatnih

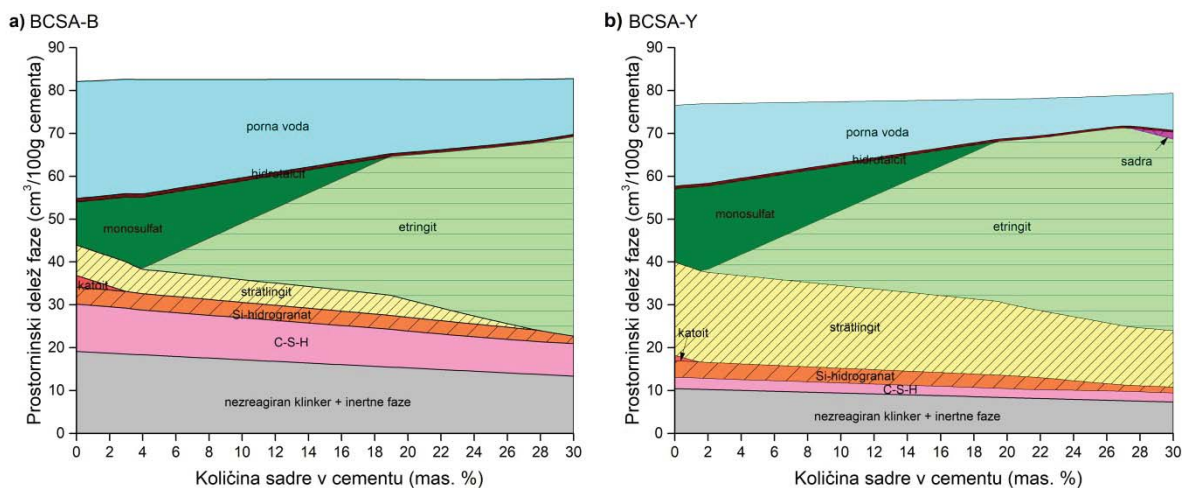
cementov v odvisnosti od količine dodane sadre ter temperature in ekstrapolirani na daljša časovna obdobja. V namen modeliranja smo uporabili program GEMS (Kulik et al., 2013; Wagner et al., 2012) v povezavi s specifično bazo podatkov za cemente CEMDATA 18 (Lothenbach et al., 2019). Vsi termodinamski izračuni so bili izvedeni v oksidacijskih pogojih. Uporabljeno je bilo vodocementno razmerje 0,5, kar ustreza razmerju, uporabljenemu v poskusih. Kot vhodni podatek je bila uporabljena sestava klinkerjevih faz in sadre, določena z rentgensko praškovno difrakcijo (XRD). V primeru modeliranja sestave faz v odvisnosti od časa so bile uporabljene tudi reakcijske stopnje klinkerjevih faz v času hidrationske dobljene na podlagi XRD in prilagojene s sigmoidno nelinearno enačbo.

## VPLIV KEMIJSKE SESTAVE IN TEMPERATURE

Najpogostejša uporaba termodinamskega modeliranja je izračun termodinamsko stabilnih faz po dolgem času hidrationske, tj. ob predpostavki popolne ali skoraj popolne hidrationske. V tem primeru so rezultati določeni na podlagi začetne kemijske sestave vzorcev, količine dodane vode, tlaka in temperature.

Na Sliki 1a je prikazana izračunana fazna sestava belitno-kalcijevo sulfoaluminatnega klinkerja BCSA-B, z dodanimi različnimi količinami sadre, od 0 do 30 mas. % (Mrak et al., 2021). Brez sadre ali kadar je vsebnost sadre majhna (< 3 mas. %) nastanejo monosulfat, strätlingit, katoit, silicijev hidrogranat, kalcijevi silikat hidrati (C-S-H) in hidrotalcit. Nad 4,5 mas. % sadre začne nastajati etringit, njegova količina pa narašča s povečanjem količine sadre na račun monosulfata. Zaradi prisotnosti večje količine etringita bogatega z vodo je prisotna manjša količina porne vode. Več je tudi C-S-H kot strätlingita. Količina sadre je vplivala na količino nastalega strätlingita, in sicer več strätlingita je nastalo pri manjši dodani količini sadre, zaradi manj nastalega etringita in posledično manj aluminija, ki je potreben za nastanek strätlingita. Aluminijev hidroksid ni prisoten, če je vsebnost sadre nad 2 mas. %, saj se aluminijev hidroksid, ki se sprosti s hidrationsko ye'elimita, porabi za tvorbo strätlingita. Reakcija ferita in belita vodi v nastanek silicijevega hidrogranata, ki vsebuje železo in aluminij.

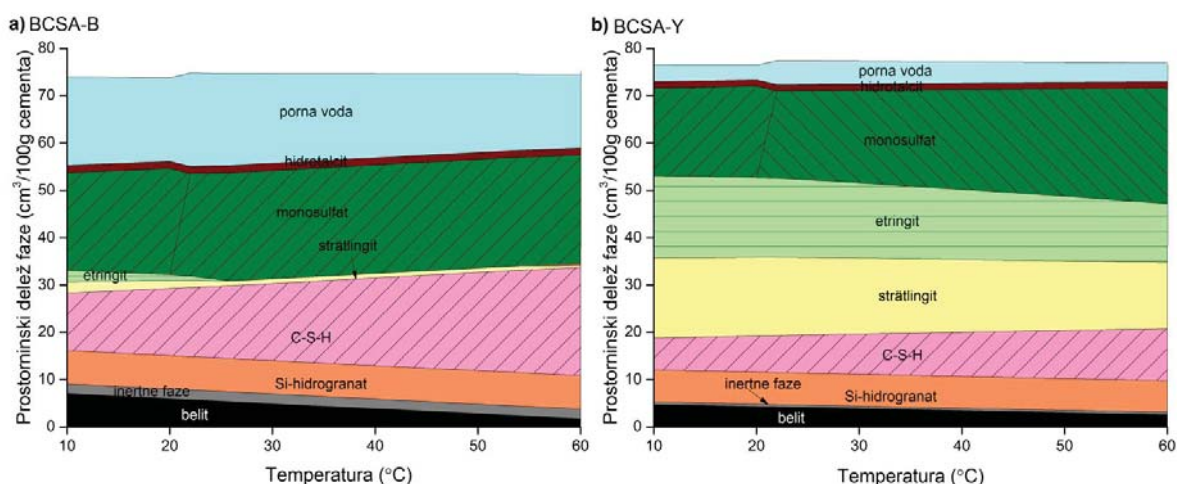
Slika 1b prikazuje izračunano fazno sestavo hidratiziranega belitno-kalcijevo sulfoaluminatnega cementa BCSA-Y z različnimi deleži sadre (Mrak et al., 2021). Ker ta cement vsebuje manj belita in več ye'elimita kot BCSA-B, pri enakem razmerju kalcijevega sulfoaluminata in sadre, ustreza višji vsebnosti sadre in tako nastane več etringita in strätlingita. Nastanek etringita je tako predviden že pri vsebnosti sadre okoli 2 mas.% in več, medtem ko je aluminijevega hidroksida ni. Zaradi manj belita in več ye'elimita v tej mešanici, se pričakuje, da bo nastalo manj C-S-H, a več strätlingita.



Slika 1: Termodinamsko modeliranje vpliva dodane količine sadre na hidratacijo belitno-kalcijevo sulfoaluminatnega cementa (povzeto po Mrak et al., 2021).

Modelirana fazna sestava cementne paste BCSA-B v odvisnosti od temperature je prikazana na Sliki 2a (Mrak et al., 2023). Stabilne faze, predvidene v celotnem temperaturnem območju med 10 in 85 °C, so silicijev hidrogranat, C–S–H, monosulfat in hidrotalcit. Izračunano je, da so majhne količine etringita prisotne od 10 do 25 °C. Majhne količine katoita se pojavijo med 55–70 °C. Nad 70 °C nastane malo portlandita, več belita pa reagira pri višjih temperaturah. C–S–H in monosulfat sta zastopana v največjih količinah, sledi silicijev hidrogranat, kateri je prisoten v celotnem temperaturnem območju kot posledica hidratacije ferita in belita.

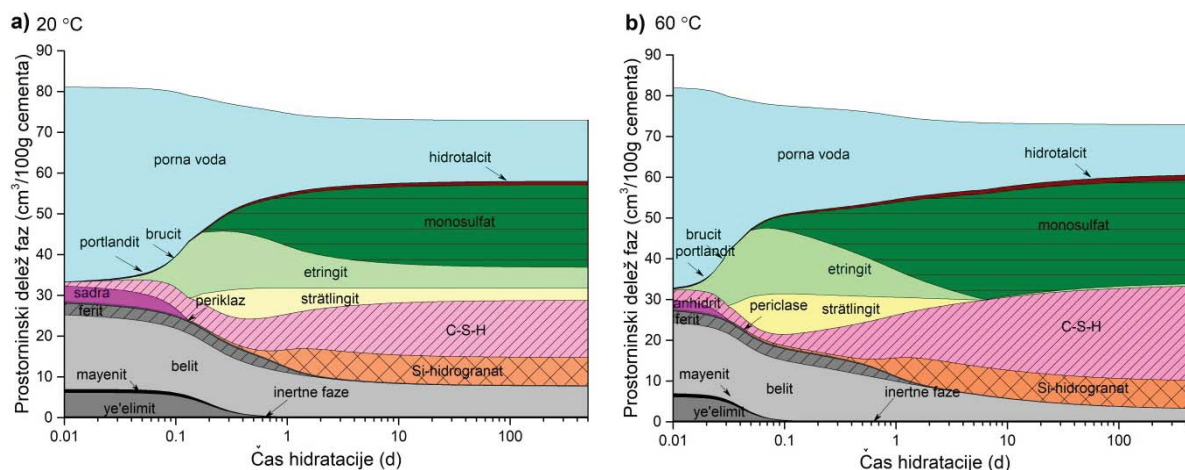
Na Sliki 2b je prikazana izračunana fazna sestava belitno-kalcijevo sulfoaluminatnega cementa BCSA-Y pri različnih temperaturah (Mrak et al., 2023). Količine strätlingita, C–S–H in silicijevega hidrogranata ostajajo v temperaturnem območju med 10 in 85 °C skoraj enake, medtem ko se količina etringita s temperaturo zmanjšuje, količina monosulfata pa povečuje. Količina porne vode je manjša v primerjavi z BCSA-B zaradi prisotnosti več z vodo bogatega etringita in nekoliko narašča z višjimi temperaturami. Višja vsebnost ye'elimita v cementu BCSA-Y povzroči več etringita in strätlingita kot za BCSA-B, medtem ko nižja vsebnost belita v BCSA-Y vodi k nastanku manj C–S–H.



Slika 2: Termodinamsko modeliranje vpliva temperature na hidratacijo belitno-kalcijevo sulfoaluminatnega cementa (povzeto po Mrak et al., 2023).

Termodinamsko modeliranje se lahko uporablja tudi za kvantitativno napovedovanje količine hidrationskih produktov. Te izračune je mogoče izvesti za različne temperature, vodocementna razmerja ter tlake. Izračuni sprememb med hidratacijo zahtevajo tudi natančno poznavanje kinetike reakcij klinkerjevih faz, namreč le-te potekajo z različnimi hitrostmi, odvisno od vodocementnega razmerja, temperature in prisotnosti dodatkov. Modeliranje razvoja faz ponuja številne

možnosti, vključno s primerjavo z eksperimentalnimi rezultati, analizo vrste in količine amorfnih faz ter izračune masne bilance. Primer razvoja fazne sestave belitno-kalcijevo sulfoaluminatnega cementa s časom je prikazan na Sliki 3 (Mrak et al., 2023).



Slika 3: Termodinamsko modeliranje fazne sestave v odvisnosti od časa hidratacije pri različnih temperaturah (povzeto po Mrak et al., 2023).

Izračune termodinamskega modeliranja smo primerjali z izsledki eksperimentov. Rezultati se dobro ujemajo, kar nakazuje da se modeli lahko uporabijo za napovedovanje sestave hidratacijskih produktov in nadalje pri razumevanju procesov hidratacije.

## ZAHVALA

Raziskave so potekale v okviru usposabljanja mladega raziskovalca in so financirane s strani Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije, številka pogodbe 1000-18-1502.

## LITERATURA

- Kulik, D. A., Wagner, T., Dmytrieva, S. V., Kosakowski, G., Hingerl, F. F., Chudnenko, K. V., & Berner, U. (2013). GEM-Selektor geochemical modeling package: Revised algorithm and GEMS3K numerical kernel for coupled simulation codes. *Computational Geosciences*, 17(1), 1–24. <https://doi.org/10.1007/s10596-012-9310-6>
- Kulik, D. A., Winnefeld, F., Kulik, A., Miron, G. D., & Lothenbach, B. (2021). CemGEMS – an easy-to-use web application for thermodynamic modeling of cementitious materials. *RILEM Technical Letters*, 6, 36–52. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2021.140>
- Kunther, W. (2016). Thermodynamic modeling of hydrated white Portland cement-metakaolin-limestone blends utilizing hydration kinetics from  $^{29}\text{Si}$  MAS NMR spectroscopy. *Cement and Concrete Research*, 13.
- Lothenbach, B., Kulik, D. A., Matschei, T., Balonis, M., Baquerizo, L., Dilnesa, B., Miron, G. D., & Myers, R. J. (2019). Cemdata18: A chemical thermodynamic database for hydrated Portland cements and alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 115, 472–506. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.018>
- Lothenbach, B., Matschei, T., Möschner, G., & Glasser, F. P. (2008). Thermodynamic modelling of the effect of temperature on the hydration and porosity of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 38(1), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.017>
- Lothenbach, B., & Zajac, M. (2019). Application of thermodynamic modelling to hydrated cements. *Cement and Concrete Research*, 123, 105779. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105779>
- Mrak, M., Winnefeld, F., Lothenbach, B., & Dolenc, S. (2021). The influence of calcium sulfate content on the hydration of belite-calcium sulfoaluminate cements with different clinker phase compositions. *Materials and Structures*, 54(6), 212. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01811-w>
- Mrak, M., Winnefeld, F., Lothenbach, B., & Dolenc, S. (2023). Experimental study and thermodynamic modelling of the temperature effect on the hydration of belite-ye'elimite-ferrite cements (in preparation).
- Wagner, T., Kulik, D. A., Hingerl, F. F., & Dmytrieva, S. V. (2012). GEM-Selektor geochemical modeling package: TSolMod library and data interface for multicomponent phase models. *Canadian Mineralogist*, 50(5), 1173–1195. <https://doi.org/10.3749/canmin.50.5.1173>
- Winnefeld, F., & Lothenbach, B. (2010). Hydration of calcium sulfoaluminate cements—Experimental findings and thermodynamic modelling. *Cement and Concrete Research*, 40(8), 1239–1247. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.014>

# Notranja kontrola brizganega in mikroarmiranega brizganega betona v predorih na drugem tiru



## POVZETEK

Notranja kontrola brizganega in mikroarmiranega brizganega betona v predorih na drugem tiru poteka skladno s Tehnično specifikacijo 2TDK\_LEA\_PZI\_TS\_DOC\_3: Izkop in podpiranje predora (v nadaljevanju TS-03). V prispevku so podani glavni poudarki pri izvajanju notranje kontrole s povprečnimi vrednostmi zahtevanih parametrov.

Glavni poudarki notranje kontrole so:

1. preizkus kompatibilnosti cementa in pospešila vezanja za brizgan beton,
2. obdelavnost sveže betonske mešanice brizganega betona,
3. gradbiščni preizkusi,
4. sprejemni preizkusi za upravljalca šobe,
5. preizkusi ustreznosti pred gradnjo,
6. redna notranja kontrola brizganega in mikroarmiranega brizganega betona.

Kompatibilnost predlaganih cementov in pospešil vezanja za brizgan beton smo skladno s TS-03 preskušali v Akreditiranemu laboratoriju. Cement in pospešilo se smatrata kot kompatibilna, če so izmerjeni časi vezanja po SIST EN 196-3:2017 sledeči: začetno vezanje < 3 minute, končno vezanje < 10 minut. V diagramu so podani rezultati preizkusa z izbranim pospešilom pod številko 3.

Zahteva za obdelavnost sveže betonske mešanice za izdelavo brizganega betona na projektu je: Priporočen posed stožca v območju 150–200 mm za preizkus po



SIST EN 12350-2:2019 ali priporočen premer razleza v območju 550–620 mm za preizkus po SIST EN 12350-5:2019. Med izvajanjem laboratorijskih preizkusov smo izvajali tudi preizkuse Razleza s posedom po SIST EN 12350-8:2019. V diagramu so podane vrednosti in priporočen razlez s posedom 380–500 mm. Metoda preizkusa razleza s posedom se je izkazala za najbolj robustno metodo, povprečna vrednost razleza s posedom brizganega betona je 520 mm.

Za zmanjšanje volumna potrebne zamesne vode ter s tem zmanjšanje krvavenja in segregacije betona med transportom in črpanjem ter zmanjšanje krčenja med sušenjem, se v sveži betonski mešanici uporabljajo dodatki z visoko zmožnostjo znižanja količine zamesne vode pri enaki obdelavnosti betona (hiperplastifikatorji) ter dodatki za vzdrževanje obdelavnosti (zavlačevalci) sveže betonske mešanice. V diagramu so podane konsistence brizganega betona z različnimi hiperplastifikatorji in zavlačevalci v odvisnosti od časa. Izbrani hiperplastifikator in zavlačevalec nam omogoča ustrezno konsistenco pri vgrajevanju brizganega betona do 235 minut.

Z gradbiščnimi preizkusi se preveri ustreznost opreme pri mešanju zraka in pospešila v tok mokre mešanice betona na šobi. Na podlagi rezultatov 28-dnevnih preizkusov tlačne trdnosti in žilavosti brizganega betona ter ostalih rezultatov med gradbiščnimi preizkusi se določi končno recepturo za vsako posamezno mešanico. Potrjene mešanice (s strani inženirja) so v nadaljevanju podvržene preizkusu ustreznosti. V prispevku so prikazane: meritve in preizkusi za potrditev kompatibilnosti dodatkov, meritve konsistence za določanje optimalne količine zamesne vode in za preveritev razpona konsistence ter obdelavnosti in časa uporabnosti betonske mešanice. Prikazane so meritve razvoja tlačne trdnosti s penetrometrom in žebljanjem ter diagram razvoja zgodnjih tlačnih trdnosti v odvisnosti od količine pospešila. Prikazano je brizganje mikroarmiranega betona v kalup po ASTM C1550 z merjenjem količine vlaken in preizkusom žilavosti v laboratoriju.

Vsak upravljavec šobe mora pred pričetkom dela izkazati ustrezno znanje o vgradnji brizganega betona. Sprejemni preizkus vključuje vgradnjo brizganega betona na delu primarne obloge z največ armature. V ta namen smo pripravili kalup z nameščeno armaturo, ki ustrezno predstavlja to območje. Vsak od upravljavcev šobe mora z uporabo enake opreme za vgradnjo brizganega betona, kot jo bo uporabljal med izvajanjem del, vgraditi brizgani beton v dva takšna kalupa, enega na steni in drugega na stropu tako, da zapolni celoten kalup. V prispevku je prikazan sprejemni preizkus za upravljalce šobe s poudarki na nastavitvi parametrov na stroju, šolanja upravljalcev šob pred preizkusom in prikazom delovanja stroja med brizganjem. Sprejemni preizkusi za upravljavce šobe so izvedeni v prisotnosti predstavnikov inženirja in zunanje kontrole kakovosti, ki ocenijo učinkovitost vsakega posameznega upravljavca

šobe. V prispevku je prikazan primer vizualnega ocenjevanja iz kalupov izvrtanih vzorcev brizganega betona.

Po zaključku gradbiščnih testov in odobritvi rezultatov, izvajalec v dogovoru z inženirjem izvede preizkus ustreznosti brizganega betona. V sklopu preizkusa ustreznosti se izvede: določitev razvoja tlačne trdnosti in določitev razvoja žilavosti. Za preizkus tlačne trdnosti brizganega betona smo zagotoviti 6 kalupov, nameščenih na stropu in 6 kalupov nameščenih na steni (3 kalupi za vsako smer vgradnje so za akreditiran laboratorij notranje kontrole in 3 kalupi za zunanjo kontrolo kakovosti). Preizkusi tlačne trdnosti smo izvedli po 1, 3, 7, 14, 28 in 56 dneh od dneva vgradnje brizganega betona. Za preizkusi žilavosti mikroarmiranega brizganega betona smo zagotoviti 6 kalupov, nameščenih na stropu in 6 kalupov, nameščenih na steni (3 kalupi za vsako smer vgradnje so za Akreditiran laboratorij notranje kontrole in 3 kalupi za zunanjo kontrolo kakovosti). V prispevku so prikazani nameščeni kalupi, izvajanje meritev zgodnjih trdnosti in meritve tlačnih trdnosti s pripravo vzorcev. V diagramu je prikazan celoten razvoj tlačne trdnosti (zgodnje v območju J2) brizganih in mikroarmiranih brizganih betonov na preskusih ustreznosti. V preglednici so podane vrednosti osmih različnih polimernih vlaken za mikroarmiran beton glede na zahtevane vrednosti v TS-03.

Redna notranja kontrola kakovosti brizganega in mikroarmiranega brizganega betona zajema:

#### 1) Preizkušanje vzorcev brizganega betona iz kalupov

- obdelavnost – razlez s posedom (prvih 5 na 100 m<sup>3</sup>, nato na 250 m<sup>3</sup>)
- razvoj tlačne trdnosti – penetracija, žebljanje, valji 1, 7, 28, 56 dni (prvih 5 na 100 m<sup>3</sup>, nato na 250 m<sup>3</sup>)
- količina vlaken MABB (prvih 5 na 100 m<sup>3</sup>, nato na 250 m<sup>3</sup>)
- žilavost MABB (prvih 5 na 100 m<sup>3</sup>, nato na 250 m<sup>3</sup>, prve 3 na 7 dni in 28 dni, nato na 7 dni)

#### 2) Preizkušanje vzorcev brizganega betona izvrtanih iz primarne obloge (po 90 dneh)

- končne tlačne trdnosti – 3 valji Ø 100 mm x 100 mm (na 200 m)
- žilavosti MABB – 3 valji Ø 150 mm x 150 mm – cepitev z zagozdo (na 400 m)

V prispevku so na preglednicah in diagramih prikazani rezultati tlačnih trdnosti brizganih in mikroarmiranih brizganih betonov v predoru T8. Prav tako so prikazani rezultati žilavosti po ASTM C1550 mikroarmiranih betonov v predorih na drugem tiru. Prikazane so tudi žilavosti mikroarmiranih betonov po metodi s cepitvijo z zagozdo na izvrtanih valjih iz primarne obloge predorov, starosti betona več kot 90 dni.



## Notranja kontrola brizganega in mikroarmiranega brizganega betona v predorih na 2. TIR-u

Zvonko COTIČ, dipl.inž.grad.

DAN ZBS 2023 - 20 LET ZDRUŽENJA  
*Lipica, 24.- 25. maj 2023*

## Notranja kontrola brizganega in mikroarmiranega brizganega betona v predorih na 2. TIR-u

### VSEBINA

1. Preizkus kompatibilnosti cementa in pospešila vezanja za brizgan beton
2. Obdelavnost sveže betonske mešanice brizganega betona
3. Gradbiščni preizkus
4. Sprejemni preizkus za upravljalca šobe
5. Preizkus ustreznosti pred gradnjo
6. Redna notranja kontrola kakovosti

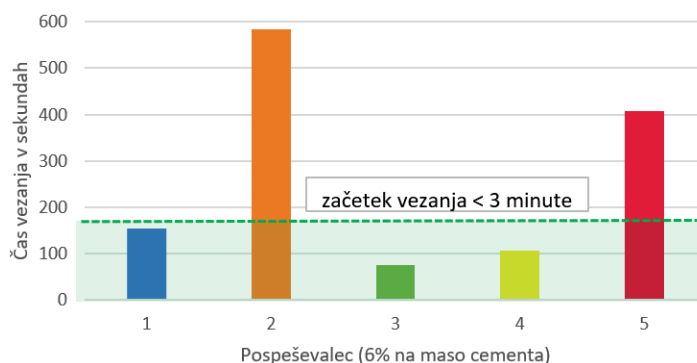
## Preizkus kompatibilnosti cementa in pospešila vezanja za brizgan beton

Cement in pospešilo vezanja za brizgan beton se smatrata kot kompatibilna, če so izmerjeni časi vezanja po SIST EN 196-3:2017:

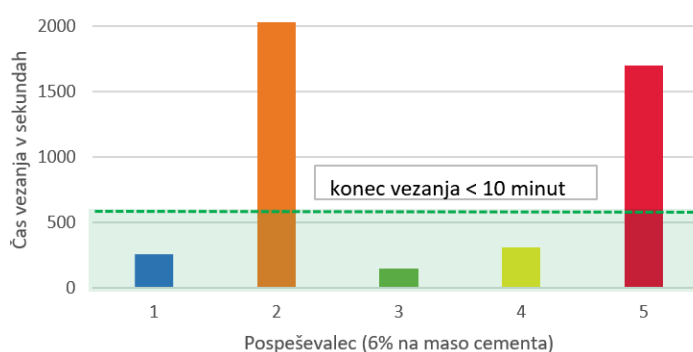
- začetno vezanje < 3 minute
- končno vezanje < 10 minut



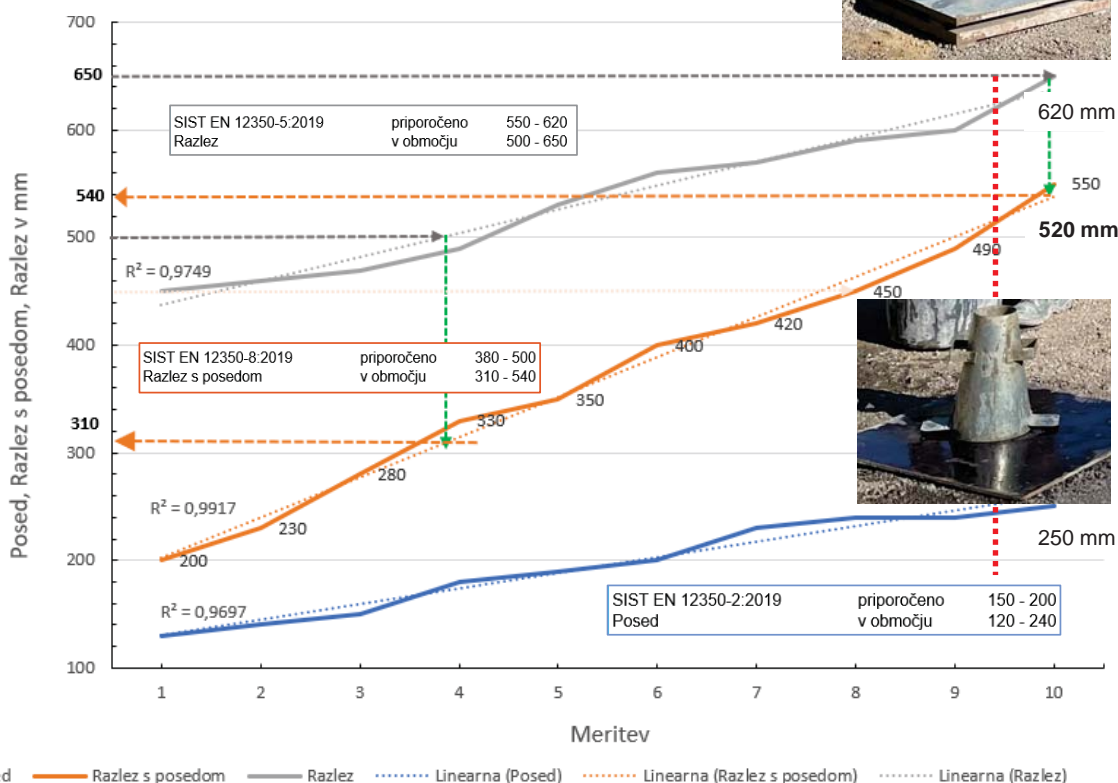
Čas začetka vezanja pospeševalcev



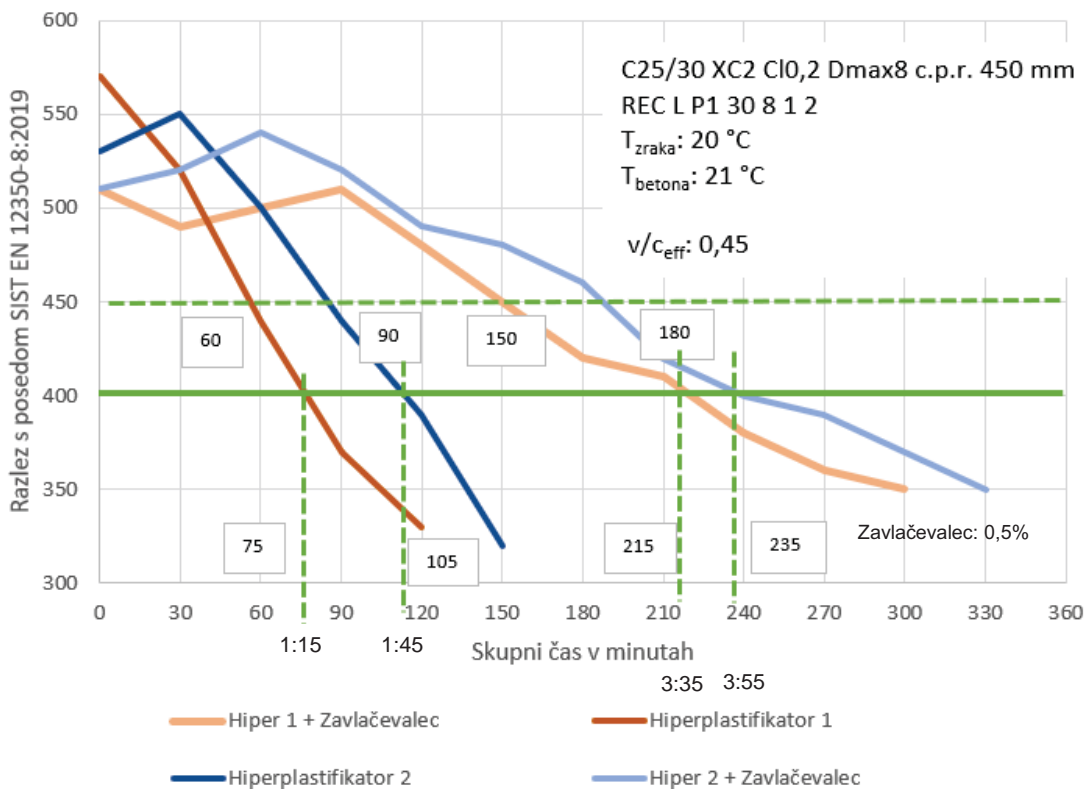
Čas konca vezanja pospeševalcev



## Obdelavnost sveže betonske mešanice brizganega betona



## Konsistenca brizganega betona v odvisnosti od časa



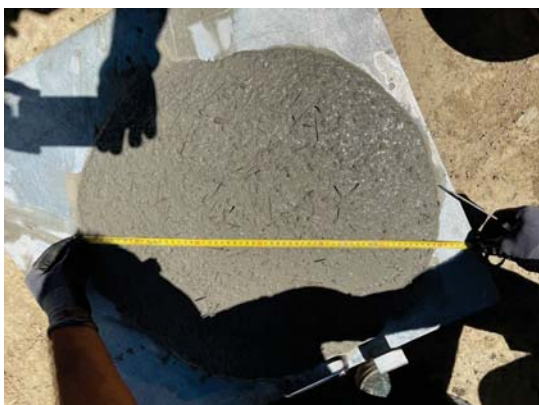
## GRADBIŠČNI PREIZKUSI



Meritve in preskusi na obratu za potrditev kompatibilnosti dodatkov



Meritve konsistence za določanje optimalne količine zamesne vode



Meritve konsistence za preveritev razpona konsistence



Obdelavnost in čas uporabnosti betonske mešanice



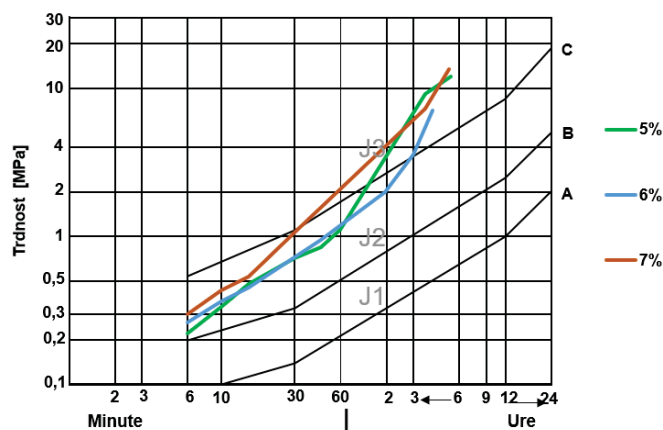


Merjenje razvoja tlačne trdnosti s penetrometrom



Merjenje razvoja tlačne trdnosti z žebljanjem

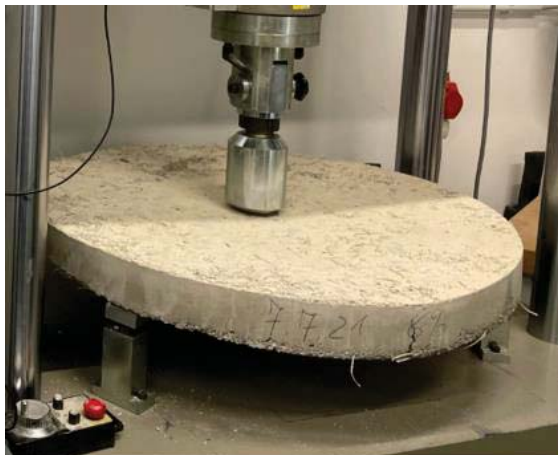
Zgodnje trdnosti: Gradbiščni prekus brizganega betona 6.7. - 7.7.2021



Razvoj zgodnje tlačne trdnosti v odvisnosti od količine pospešila



Brizganje mikroarmiranega betona v kalup po ASTM C1550



Preskus žilavosti v laboratoriju



Merjenje količine vlaken v mikroarmiranem brizganem betonu



## SPREJEMNI PREIZKUSI ZA UPRAVLJAVCE ŠOBE



Stroj za brizganje betona NORMET 8100



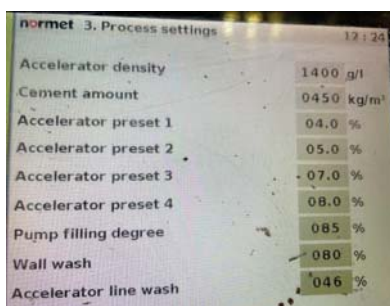
Kalup z vgrajenim lokom in armaturo



Brizganje v kalup na steni



Brizganje v kalup na stropu



Nastavitve parametrov na stroju



Šolanje upravljalcev šob pred preskusom



Nabrizgani kalupi na stenah in stropu na sprejemnem preskusu za upravljalce šobe



Prikaz delovanja stroja med brizganjem



Izgled betona po razkalupljenju



## VIZUELNO OCENJEVANJE VZORCEV BRIZGANEGA BETONA



|       |   |   |   |   |   |            |
|-------|---|---|---|---|---|------------|
| strop | 2 | 1 | 1 | 1 | 5 | neustrezno |
|-------|---|---|---|---|---|------------|



|       |   |   |   |   |   |          |
|-------|---|---|---|---|---|----------|
| strop | 1 | 2 | 3 | 2 | 2 | ustrezno |
|-------|---|---|---|---|---|----------|

## PREIZKUS USTREZNOSTI PRED GRADNJO



Meritve obdelavnosti sveže betonske mešanice na gradbišču



6 kalupov, nameščenih na stropu in 6 kalupov, nameščenih na steni



Meritve zaodnih trdnosti s penetrometrom



Meritve zgodnjih trdnosti z žebljanjem

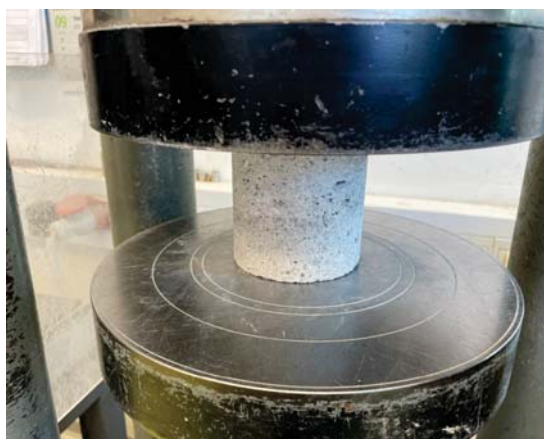




Vrtanje jeder  $\varnothing$  100 mm iz kalupa



Rezanje jeder  $\varnothing$  100 mm na višino 100 mm



Merjenje tlačne trdnosti jedra po 1, 3, 7, 14, 28 in 56 dneh



Brizganje mikroarmiranega betona v kalup po ASTM C1550



Priprava, ravnanje mikroarmiranega betona v kalupu



Razkalupljanje, nega, prevoz v laboratorij



Preizkus žilavosti mikroarmiranega betona po ASTM C1550

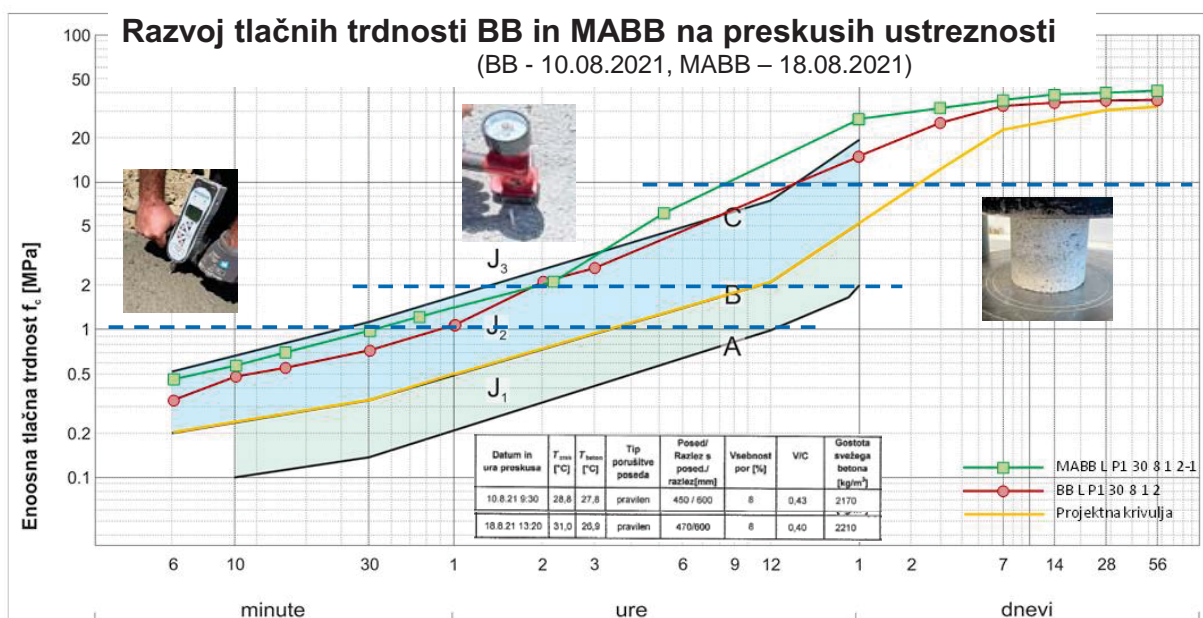


## ZAHTEVE ZA TLAČNO TRDNOST

### 2TIR

- razred tlačne trdnosti J2 (po 24 urah min. 5 MPa)
- po 3 dnevih min. 12 MPa
- po 7 dnevih min. 22 MPa
- po 28 dneh min. 30 MPa,
- po 56 dneh min. 5% višja kot po 28 dneh

| Čas    | Zgodnja trdnost [N/mm <sup>2</sup> ] |      |       |
|--------|--------------------------------------|------|-------|
|        | A                                    | B    | C     |
| 6 min  | -                                    | 0,20 | 0,50  |
| 10 min | 0,10                                 | 0,25 | 0,66  |
| 30 min | 0,153                                | 0,40 | 1,20  |
| 1 h    | 0,20                                 | 0,61 | 1,82  |
| 3 h    | 0,41                                 | 1,20 | 3,50  |
| 6 h    | 0,64                                 | 1,83 | 5,29  |
| 9 h    | 0,83                                 | 2,35 | 6,74  |
| 12 h   | 1,00                                 | 2,80 | 8,00  |
| 24 h   | 2,00                                 | 5,00 | 16,00 |



## Polimerna vlakna za mikroarmiran brizgan beton

EN 14889-2:2006

Fibres for concrete - Part 2: Polymer fibres - Definition, specifications and conformity

SIST EN 14889-2:2006

Vlakna za beton - 2. del: Polimerna vlakna - Definicija, specifikacije in skladnost

Zahteve:

Tehnočne specifikacije za izgradnjo drugega tira železniške proge Divača - Koper

2TDK\_LEA\_PZI\_TS\_DOC\_3: Izkop in podpiranje predora, 30 junij 2020

| Številka vzorca vlaken | Dolžina        | Presečno razmerje | Natezna trdnost            | Elastični modul |
|------------------------|----------------|-------------------|----------------------------|-----------------|
|                        | med 45 in 65mm | med 50 in 100mm   | min. 500 N/mm <sup>2</sup> | min. 7 GPa      |
| 1                      | 50             | 59                | 490                        | 4,7             |
| 2                      | 55             | 79                | 500                        | 6,0             |
| 3                      | 48             | 56                | 540                        | 5,5             |
| 4                      | 50             | 64                | 580                        | 2,5             |
| 5                      | 50             | 70                | 450                        | 7,5             |
| 6                      | 60             | 71                | 430                        | 6,0             |
| 7                      | 54             | 55                | 500                        | 7,8             |
| 8                      | 54             | 64                | 640                        | 12,0            |

## Ugotavljanje količine vlaken v MABB



Vzorec za določanje vsebnosti vlaken v svežem MABB



Merjenje volumna vzorca MABB z vodnim tehtanjem

### 6.2. Vsebnost vlaken v svežem betonu

Datum in ura: 18.8.2021 13:45  
 Oprema: Vodna kopel, posoda z znano prostornino  
 Izvajalec preksusa: Matevž Štokelj

| Št.meritve:                           | 1     | 2     | 3     | Povprečje    |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|--------------|
| Masa vzorca [kg]:                     | 1,429 | 1,770 | 1,506 | <b>1,568</b> |
| Volumen vzorca [ml]:                  | 650   | 800   | 680   | <b>710</b>   |
| Masa vlaken [g]:                      | 3,9   | 4,7   | 4,6   | <b>4,4</b>   |
| Vsebnost vlaken [kg/m <sup>3</sup> ]: | 6,00  | 5,88  | 6,76  | <b>6,21</b>  |

### 6.3. Vsebnost vlaken v brizganem betonu

Datum in ura: 18.8.2021 14:15  
 Oprema: Vodna kopel, posoda z znano prostornino  
 Izvajalec preksusa: Matevž Štokelj

| Št.meritve:                           | 1     | 2    | 3     | Povprečje    |
|---------------------------------------|-------|------|-------|--------------|
| Masa vzorca [kg]:                     | 2,176 | 1,61 | 1,938 | <b>1,908</b> |
| Volumen vzorca [ml]:                  | 960   | 710  | 860   | <b>843</b>   |
| Masa vlaken [g]:                      | 5,9   | 4,1  | 5,2   | <b>5,1</b>   |
| Vsebnost vlaken [kg/m <sup>3</sup> ]: | 6,15  | 5,77 | 6,05  | <b>5,99</b>  |

### 6.4. Izračun razmerja odboja vlaken

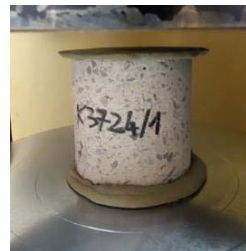
| Vsebnost vlaken v svežem betonu [kg/m <sup>3</sup> ] | Vsebnost vlaken v brizganem betonu [kg/m <sup>3</sup> ] | Razmerje odboja vlaken RRF: |
|--|---|-----------------------------|
| 6,21   | 5,99  | 0,0354                      |

## Redna notranja kontrola kakovosti - Predori 2TIR

- Preizkušanje vzorcev brizganega betona iz kalupov
  - obdelavnost – razlez s posedom (prvih 5 na 100m<sup>3</sup> nato na 250m<sup>3</sup>)
  - razvoj tlačne trdnosti – penetracija, žebljanje, valji 1, 7, 28, 56 dni (prvih 5 na 100m<sup>3</sup> nato na 250m<sup>3</sup>)
  - količina vlaken MABB (prvih 5 na 100m<sup>3</sup> nato na 250m<sup>3</sup>)
  - žilavost MABB (prvih 5 na 100m<sup>3</sup> nato na 250m<sup>3</sup>, prve 3 na 7 dni in 28 dni, nadalje na 7 dni)
- Preiskušanje vzorcev brizganega betona izvrtanih iz primarne obloge (po 90 dneh)
  - končne tlačne trdnosti – 3 valji Ø 100mm x 100mm (na 200m)
  - žilavosti MABB – 3 valji Ø 150mm x 150mm – cepitev z zagozdo (na 400m)

## Redna kontrola kakovosti - Predori 2TIR

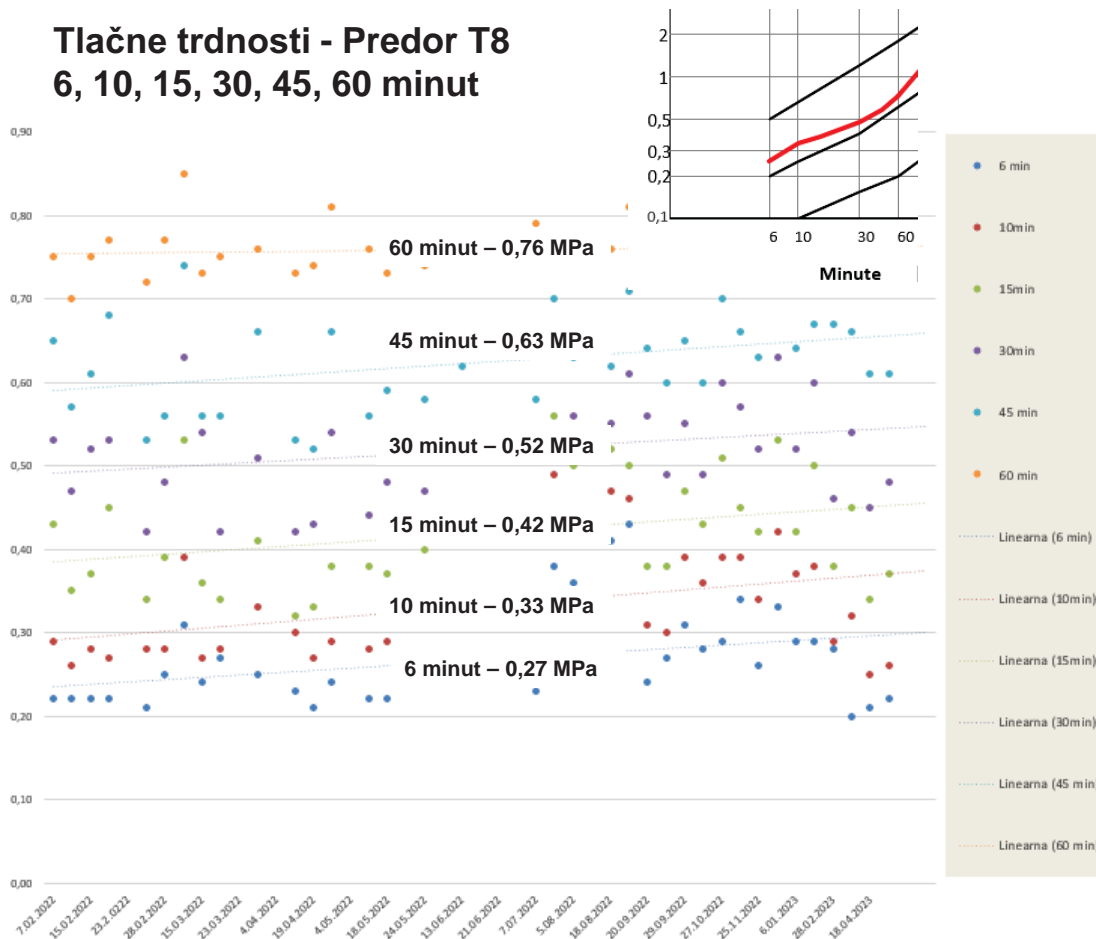
- končne tlačne trdnosti – 3 valji Ø 100mm x 100mm (na 200m)



- žilavosti MABB – 3 valji Ø 150mm x 150mm – cepitev z zagozdo (na 400m)



## Tlačne trdnosti - Predor T8 6, 10, 15, 30, 45, 60 minut

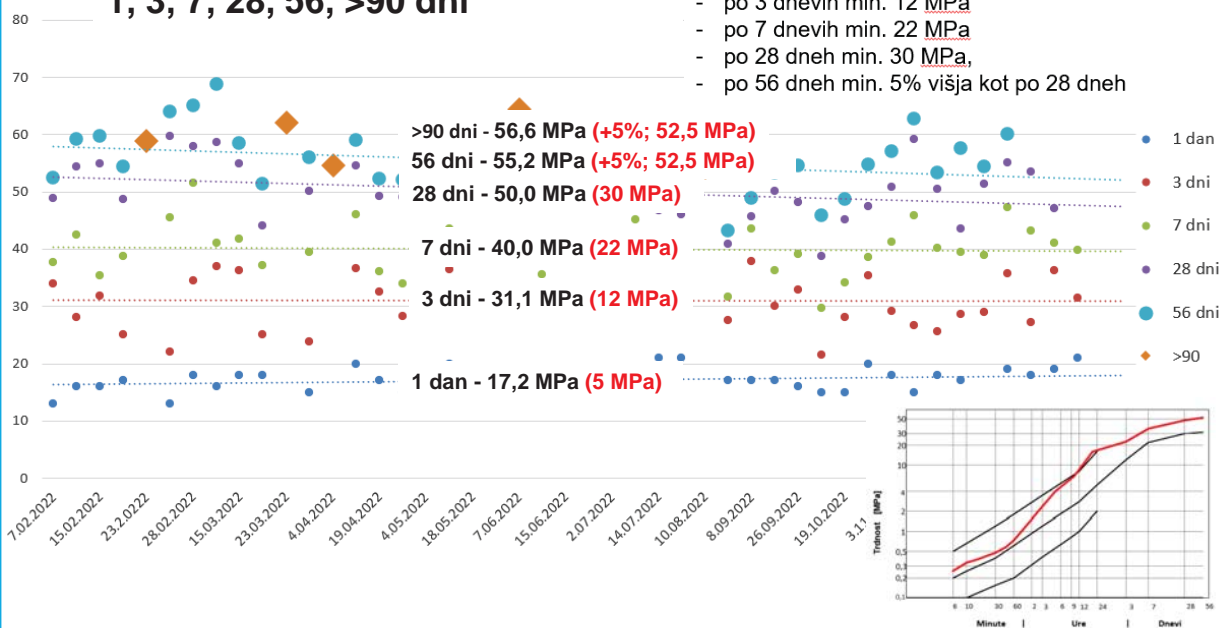


## Tlačne trdnosti - Predor T8 1, 3, 7, 28, 56, >90 dni

### ZAHTEVJE ZA TLAČNO TRDNOST

2TIR

- razred tlačne trdnosti J2 (po 24 urah min. 5 MPa)
- po 3 dnevih min. 12 MPa
- po 7 dnevih min. 22 MPa
- po 28 dneh min. 30 MPa,
- po 56 dneh min. 5% višja kot po 28 dneh



| Predor T8   |       | Razlez s posedom | Temp. betona | Zgodnje tlačne trdnosti (min.) |      |      |      |      |      |      | TT   | TT   | TT   | TT   | TT  | vrtiline iz konstrukcije | starost |
|-------------|-------|------------------|--------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|--------------------------|---------|
| Št. meritv. | 35    | 35               | 6            | 10                             | 15   | 30   | 45   | 60   | 35   | 1    | 3    | 7    | 28   | 56   | >90 | 9                        |         |
| Povprečje   | 517,7 | 23,1             | 0,27         | 0,33                           | 0,42 | 0,52 | 0,63 | 0,76 | 17,2 | 31,1 | 40,0 | 50,0 | 55,2 | 56,6 | 155 |                          |         |
| Najmanjša   | 410   | 18               | 0,20         | 0,25                           | 0,32 | 0,42 | 0,52 | 0,7  | 10   | 21,5 | 29,7 | 38,8 | 43,2 | 51,5 | 114 |                          |         |
| Največja    | 590   | 31               | 0,43         | 0,49                           | 0,56 | 0,64 | 0,74 | 0,85 | 21   | 42,1 | 51,6 | 59,7 | 68,8 | 64,4 | 197 |                          |         |

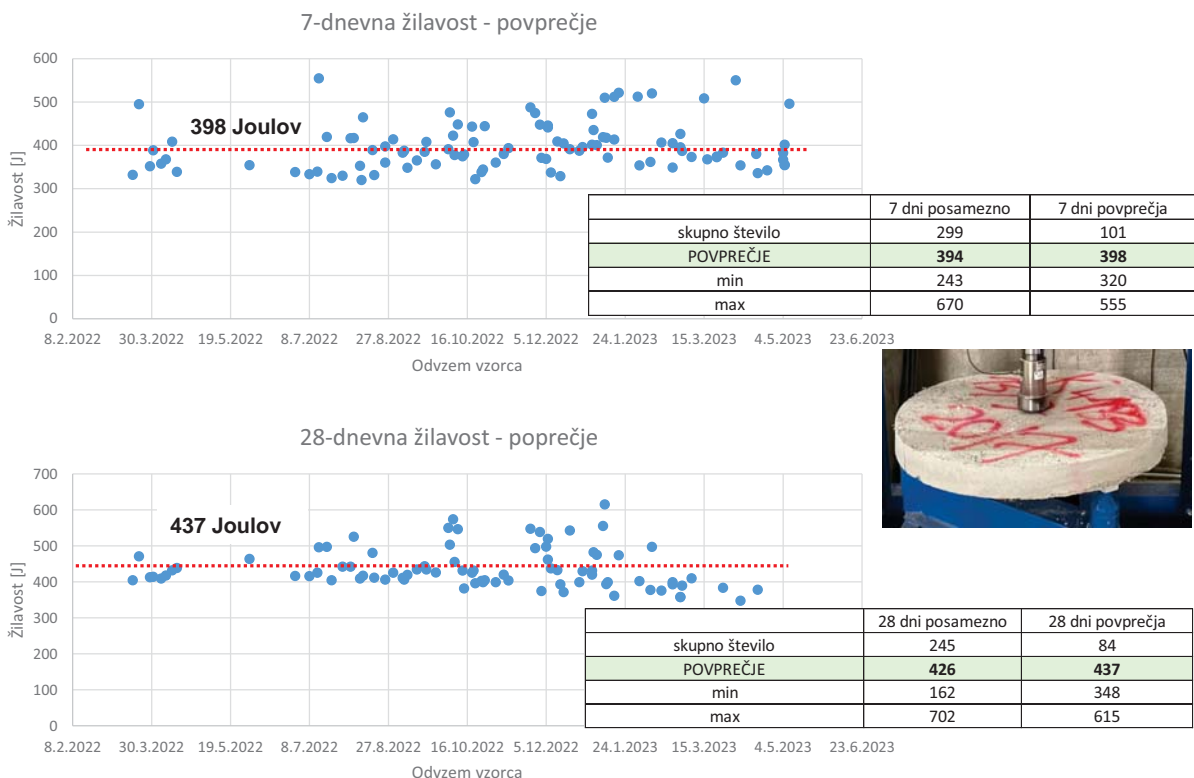
## Žilavost - Predori 2TIR „pizza test“

### ZAHTEVJE ZA ŽILAVOST

2TIR

ASTM C1550-12a

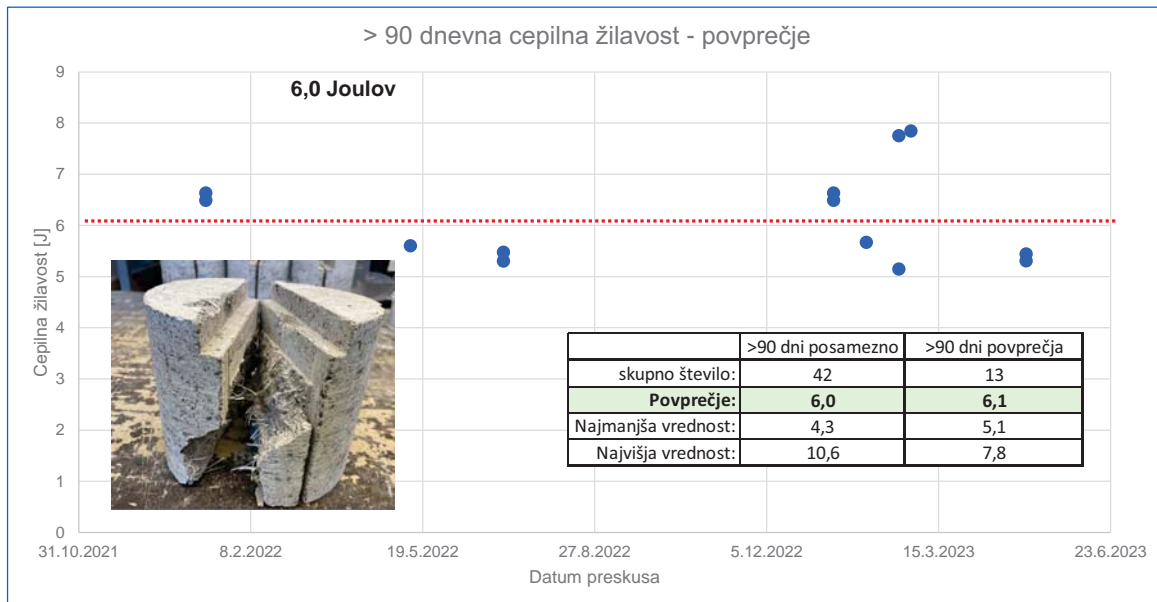
- po 7 dnevih: 320 Joulov
- po 28 dnevih: 400 Joulov





## Žilavost - Predori 2TIR cepitev z zagozdo

**ZAHTEVE ZA ŽILAVOST**  
po > 90 dni: 5 Joulov



DR. ANKA ILC

STRUCTUM, INŠTITUT ZA GRADBENIŠTVO

# Vpliv tehnologije gradnje na izbiro betonskih mešanic za viadukta Gabrovica in Vinjan na drugem tiru

---



## POVZETEK

Proga drugega sklopa projekta Drugi tir železniške proge Divača–Koper vključuje tudi dva viadukta, poimenovana Gabrovica in Vinjan. Viadukt Gabrovica poteka pod obstoječim cestnim viaduktom Črni Kal in leži med predoroma T2 in T3. Viadukt Vinjan leže čisto blizu meje Slovenije z Italijo, blizu mesta Trst, na progi drugega tira pa premošča dolino med predoroma T7 in T8.

Čeprav sta viadukta projektirali isti projektantski podjetji, in sicer Pipenbahr inženirji ter Ponting inženirski biro, pa sta oba objekta po tehnologiji gradnje precej različna. Viadukt Gabrovica se gradi po metodi narivanja, medtem ko se viadukt Vinjan gradi večinoma po metodi prostokonzolne gradnje, ob opornikih pa tudi klasično, na odru.

Podporni konstrukciji viaduktov sta si bolj podobni. Pri obeh so oporniki temeljeni na pilotih, stebri pa na vodnjakih in oba imata votle stebre pravokotnega prereza. Temeljenje dveh stebrov viadukta Vinjan je zaradi geološke podlage zahtevnejše in ta dva sta temeljena na globljih vodnjakih – najgloblji je globok 40 m.

Predvsem pri vodnjakih, pa tudi pri stebrih in prekladnih konstrukcijah so betonski prerezi masivni, zato smo pri pripravi betonskih mešanic posebno pozornost posvetili nadzoru sproščanja hidratacijske toplote z izbiro ustreznega veziva. Betonskim mešanicam smo predhodno določili adiabatno krivuljo, da smo lahko predvideli najvišjo temperaturo in največji temperaturni gradient, ki bo v konstrukciji dosežen. Na tak način se lahko izognemo razpokam zaradi prevelikega temperaturnega gradienta ali tvorjenja etringita in prenizkim končnim tlačnim trdnostim konstrukcije zaradi prehitrega začetnega vezanja cementa.

Pri gradnji stebrov na viaduktu Vinjan in pa ležiščnih blokov obeh viaduktov smo naleteli na tako gosto armaturo, da uporaba klasičnih tehnik zgoščanja s paličnimi vibratorji ni bila možna. Za te elemente smo zato pripravili samozgoščevalni beton, ki ga pri vgradnji ni treba dodatno zgoščati. Zaradi izkušenj izvajalcev del na betonarni in na gradbišču ter tudi dosledne kontrole kakovosti lahko tak beton transportiramo na velike razdalje s transportnimi vozili, pa tudi na višino s črpalkami in tudi z žerjavom in kiblo.

Poseben izziv predstavlja priprava betona za prekladno konstrukcijo. Viadukt Gabrovica, ki se gradi po metodi narivanja, ima prekladno konstrukcijo v obliki črke U, sestavljajo jo plošča in dve steni. Plošča je predvsem nad stebri masivna, debeline 120 cm. Zaradi masivnosti preklade bi si želeli počasnejši beton, a projektant je predvidel napenjanje po 2,5 dneva oziroma po dosežene 45 MPa tlačne trdnosti na tehnoloških kockah.

Zaradi kratkih rokov je zahteva izvajalca, da beton po 2,5 dnevih doseže 45 MPa, kar je 90 % končne tlačne trdnosti. Obema zahtevama smo ugodili tako, da smo uporabili počasnejši beton za ploščo in hitrejši za stene, ki se jih napenja kmalu po vgradnji, in pa tako, da smo tlačno trdnost tehnoloških kock dokazovali z uporabo maturometra.

Maturometer je naprava, ki vzdržuje enako temperaturo vodne kopeli, kot jo ima konstrukcija, v kateri je temperaturni senzor. Zaradi sproščanja hidratacijske toplote je temperatura betona v konstrukciji vedno višja, kot jo ima okoliški zrak, zato beton tudi hitreje pridobiva na trdnosti. Z uporabo maturometra pridobimo realen podatek o tem, kakšna je trdnost betonske konstrukcije v določenem času.

Z uporabo obeh ukrepov – to je dveh različnih receptur za preklado in stene in dokazovanje tlačne trdnosti kock z maturometrom, smo uspeli zagotoviti predpisano tlačno trdnost na kocki 45 MPa po 2,5 dneh.

Dodaten izziv pri gradnji prekladne konstrukcije viadukta Gabrovica je predstavljala gradnja nastavka sten hkrati s ploščo. Zaradi tega je bil uporabljen tudi zgodnji opaž na delu plošče, ki ga je bilo treba podliti. Problem smo rešili z uporabo betona z malo višjo konsistenco ob uporabi opažnih vibratorjev.



Slika 1: Prekladna konstrukcija viadukta Gabrovica





Slika 2: Maturometer



Velike del prekladne konstrukcije viadukta Vinjan se gradi po metodi prostokonzolne gradnje. Pri tej gradnji je s stališča tehnologije betona največji izziv predstavljala zahteva projektanta, da se spodnja plošča, stene in krovna plošča prekladne konstrukcije vgradijo zaporedoma v enem dnevu. Zaradi montiranih cevi v plošči nad stenami so le-te težko dostopne in zgoščanje z igličnimi vibratorji je praktično nemogoče, zato se je tu kot rešitev ponujala uporaba samozgoščevalnega be-

tona. Po drugi strani imajo plošče prekladne konstrukcije vzdolžni in prečni naklon ter sidrne bloke, hkrati pa mora beton spodnje plošče preprečiti izpodrivanje betona iz stene v ploščo, saj tu ni zgornjega opaža. Končna rešitev je tako vsebovala beton konsistence S4 v spodnji in zgornji plošči ter samozgoščevalni beton v stenah. S tako rešitvijo smo do sedaj uspešno zgradili že kar nekaj segmentov.



Slika 3: Viadukt Vinjan: levo vodnjak, desno steber in prekladna konstrukcija

S tema dvema primeroma iz prakse lahko vidimo, da se z uporabo primernih betonskih mešanic lahko prilagodimo tehnologiji gradnje konstrukcije tako, da dobimo izdelek, ki izpolnjuje tehnične zahteve in je lep ter trajen.



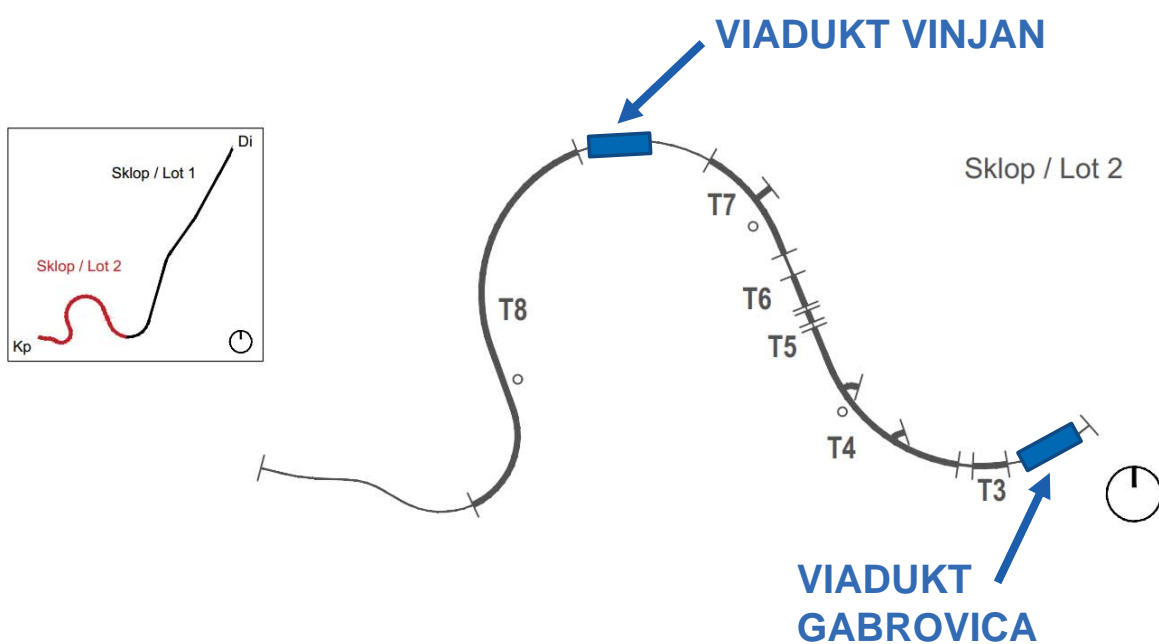


## Vpliv tehnologije gradnje na izbiro betonskih mešanic za viadukta Gabrovica in Vinjan na Drugem tiru

dr. Anka ILC, univ.dipl.inž.grad.

DAN ZBS 2023 - 20 LET ZDRUŽENJA  
*Lipica, 24.- 25. maj 2023*

### II. TIR – SKLOP 2



## VIADUKT GABROVICA

Dolžina: 416 m (med osmi opornikov)  
452 m v celoti

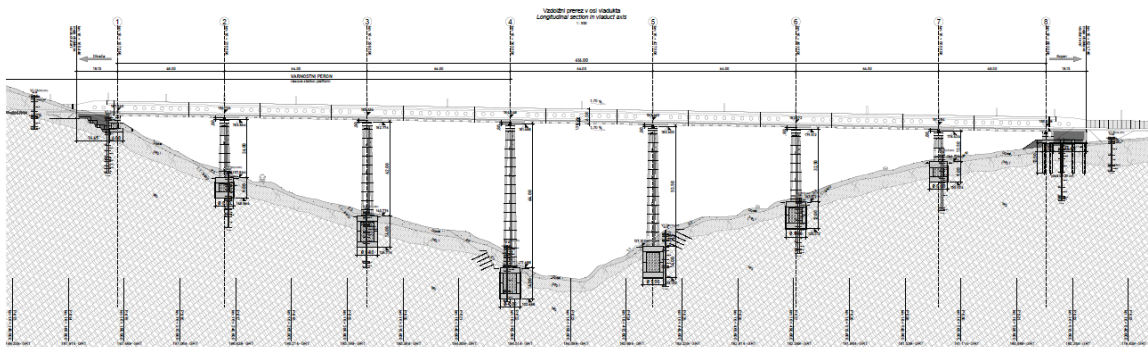
Razpon: 64 m

Najvišji stebel: 64 m

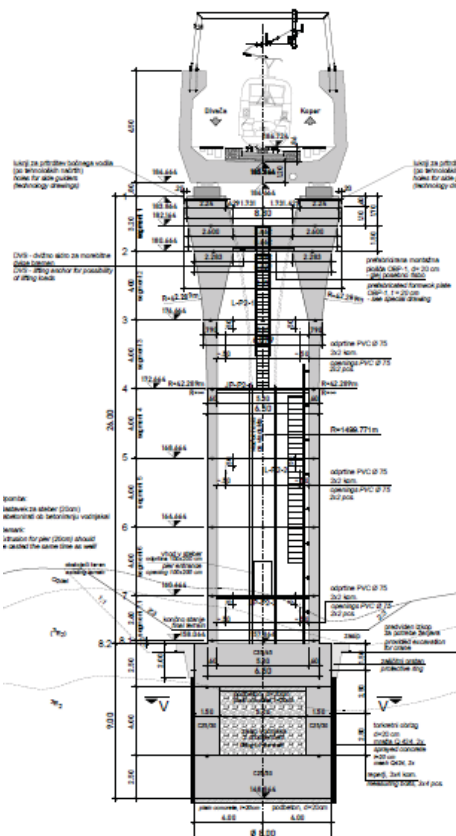
Metoda gradnje: narivanje

Projektant: Pipenbahr inženirji,  
Ponting inženirski biro

Izvajalec: Yapi Merkezi

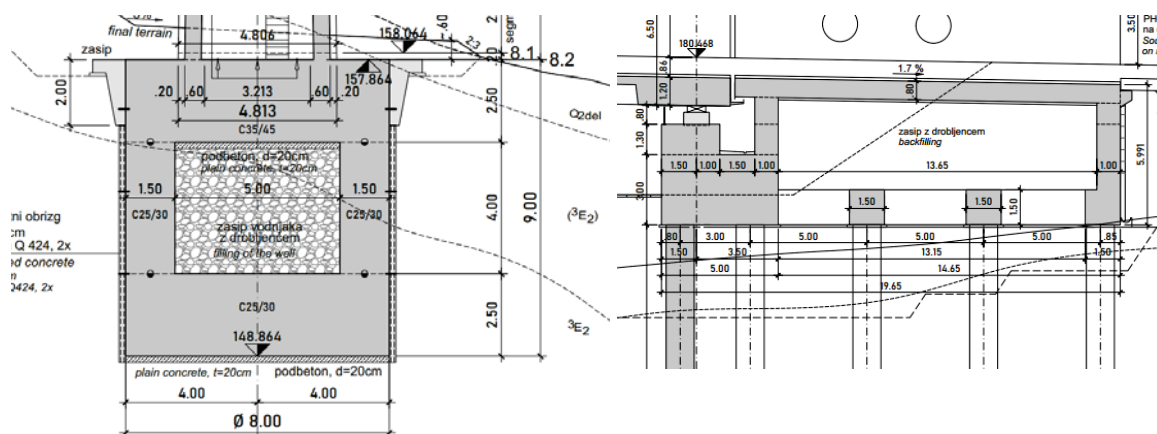


## VIADUKT GABROVICA – ZAHTEVE ZA BETON



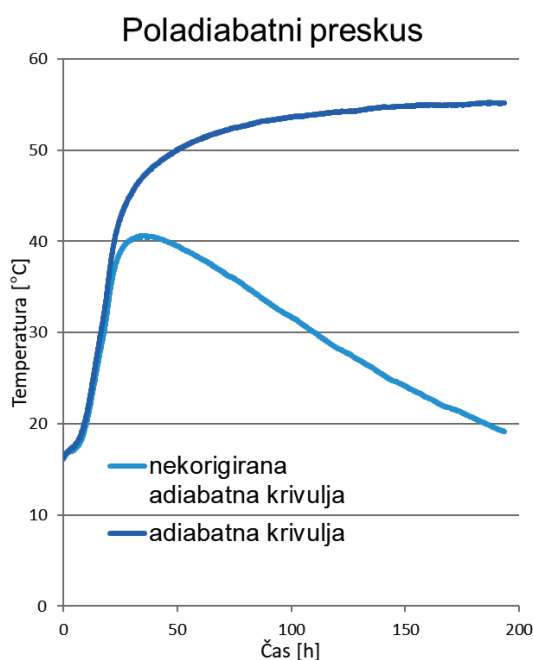
| Beton                            | Specifikacija                 |
|----------------------------------|-------------------------------|
| Brizgan beton                    | C 25/30                       |
| Piloti                           | C 25/30 XC2 Dmax32 S4         |
| Spodnja plošča in stene vodnjaka | C 25/30 XC2 Dmax32 S4         |
| Zgornja plošča vodnjaka          | C 35/45 XC2 Dmax32 S4         |
| Stebri                           | C 35/45 XD1/XF2<br>Dmax 32 S4 |
| Oporniki                         | C 30/37 XC4/XF1<br>Dmax 32 S4 |
| Ležišni bloki                    | C 50/60 XC4/XF1<br>Dmax16 S4  |
| Prekladna konstrukcija           | C 40/50 XC4/XF3<br>Dmax32 S4  |

## VIADUKT GABROVICA – VODNJAKI IN OPORNIKI

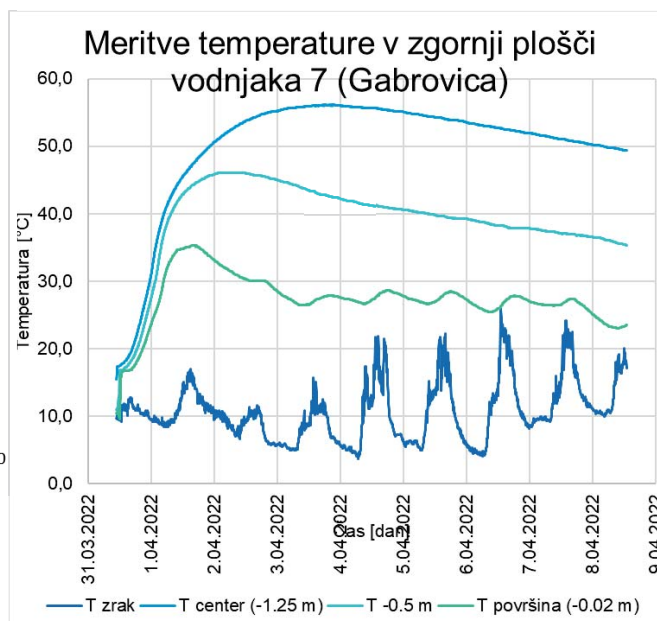


| Beton                            | Specifikacija              |
|----------------------------------|----------------------------|
| Spodnja plošča in stene vodnjaka | C 25/30 XC2 Dmax32 S4      |
| Zgornja plošča vodnjaka          | C 35/45 XC2 Dmax32 S4      |
| Oporniki                         | C 30/37 XC4/XF1 Dmax 32 S4 |

## VIADUKT GABROVICA – MASIVNI BETON



| Beton                   | Specifikacija         |
|-------------------------|-----------------------|
| Zgornja plošča vodnjaka | C 35/45 XC2 Dmax32 S4 |





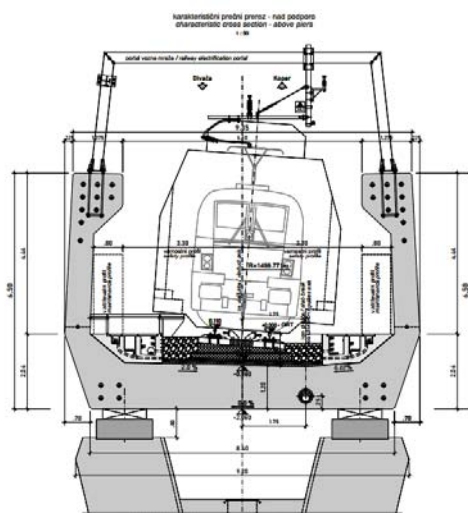
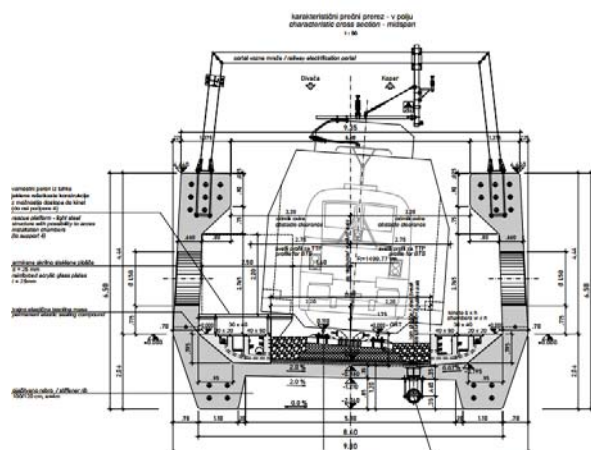
## VIADUKT GABROVICA – LEŽIŠČNI BLOKI



| Beton          | Specifikacija                           |
|----------------|---|
| Ležiščni bloki | C 50/60 XC4/XF1<br>Dmax16 <b>⊘4 SF2</b> |



## VIADUKT GABROVICA – PREKLADNA KONSTRUKCIJA



| Beton                  | Specifikacija   |
|------------------------|---|
| Prekladna konstrukcija | C 40/50 XC4/XF3<br>Dmax32 Dmax16<br><b>⊘4 ciljni posed 210 mm, manjši del SF2</b> |



## VIADUKT GABROVICA – PREKLADNA KONSTRUKCIJA

|   |   |
|---|---|
| <b>1. pogoj:</b><br>starost betona v času prednapenjanja  | $T > 2.5 \text{ dni} / 60 \text{ ur}$   |
| <b>2. pogoj:</b><br>srednja vrednost tlačne trdnosti betona določena na valju d150/h300 ali kocki 150/150/150 | $f_{cm,cyl, t=2.5} \geq 35 \text{ MN/m}^2$<br>$f_{cm,cube, t=2.5} \geq 45 \text{ MN/m}^2$ |

### UKREPI:

#### - 2 RECEPTURI

#### - MATUROMETER

Princip: Kocke so v kopeli z grelcem, ki je elektronsko krmiljen tako, da je temperatura vode v kopeli enaka temperaturi v konstrukciji.



## VIADUKT GABROVICA – PREKLADNA KONSTRUKCIJA



## VIADUKT GABROVICA – PREKLADNA KONSTRUKCIJA



## VIADUKT GABROVICA





## VIADUKT VINJAN

Dolžina: 620 m (med osmi opornikov)

650 m v celoti

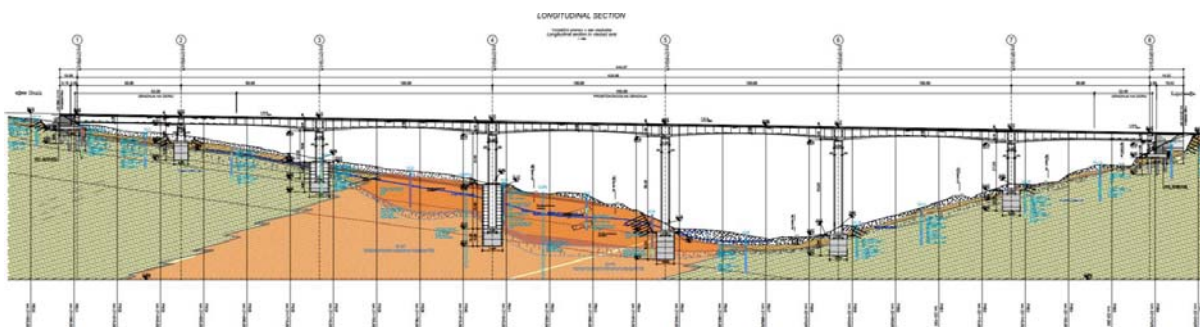
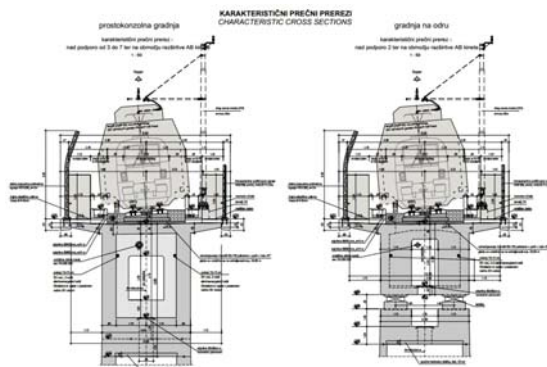
Razpon: 100 m

Najvišji steber: 55 m

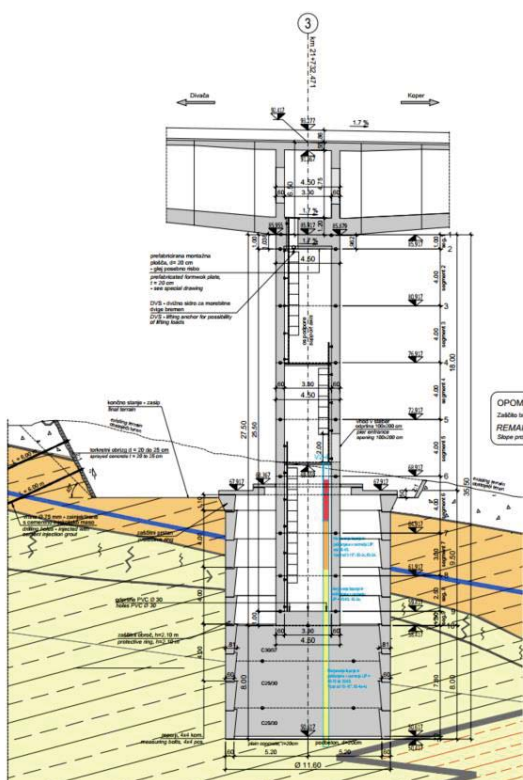
Metoda gradnje: prostokonzolna gradnja,  
ob opornikih gradnja na odru

Projektant: Pipenbaher inženirji,  
Ponting inženirski biro

Izvajalec: Kolektor CPG

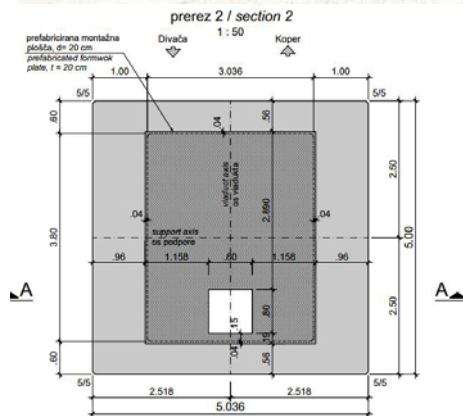


## VIADUKT VINJAN – ZAHTEVE ZA BETON



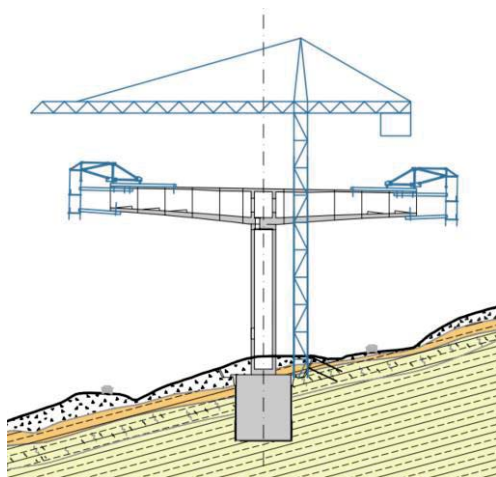
| Beton                                    | Specifikacija                 |
|--|-------------------------------|
| Brizgan beton                            | C 25/30                       |
| Piloti                                   | C 25/30 XC2 Dmax32 S4         |
| Zaščitni prstani<br>plitvejših vodnjakov | C 25/30 XC2 Dmax32 S4         |
| Zaščitni prstani<br>globljih vodnjakov   | C 25/30 XC2 Dmax32 S4         |
| Ostale plošče<br>vodnjakov               | C 25/30 XC2 Dmax32 S4         |
| Zgornje plošče<br>vodnjakov              | C 30/37 XC2 Dmax32 S4         |
| Stebri                                   | C 35/45 XC4/XF1<br>Dmax 32 S4 |
| Oporniki                                 | C 30/37 XC4/XF1<br>Dmax 32 S4 |
| Ležiščni bloki                           | C 50/60 XC4/XF1<br>Dmax16 S4  |
| Prekladna<br>konstrukcija                | C 40/50 XC4/XF3<br>Dmax22 S4  |

## VIADUKT VINJAN - STEBRI

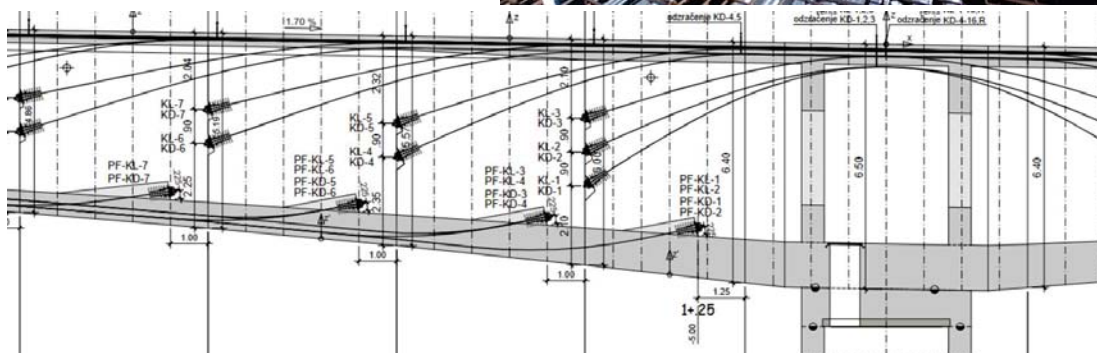


| Beton  | Specifikacija                     |
|--------|-----------------------------------|
| Stebri | C 35/45 XC4/XF1<br>Dmax 32 S4 SF2 |

## VIADUKT VINJAN – PREKLADNA KONSTRUKCIJA

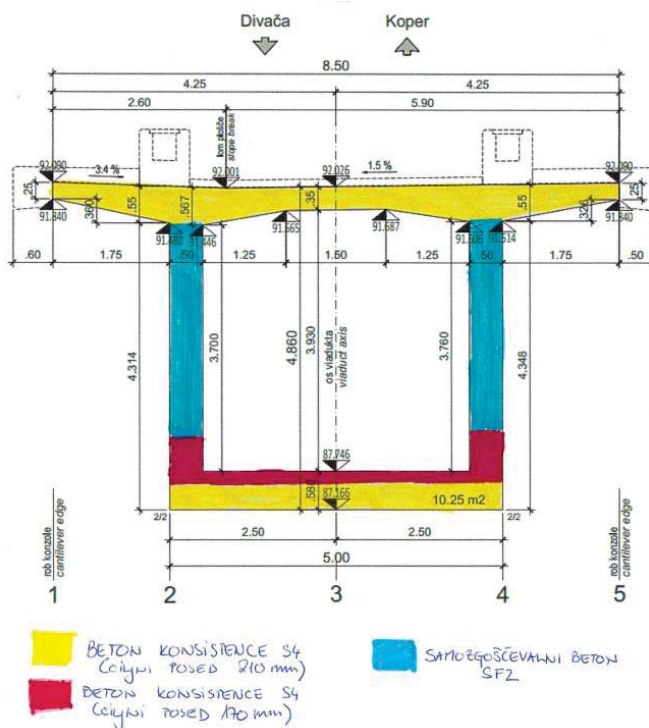


| Beton                  | Specifikacija                |
|------------------------|------------------------------|
| Prekladna konstrukcija | C 40/50 XC4/XF3<br>Dmax22 S4 |

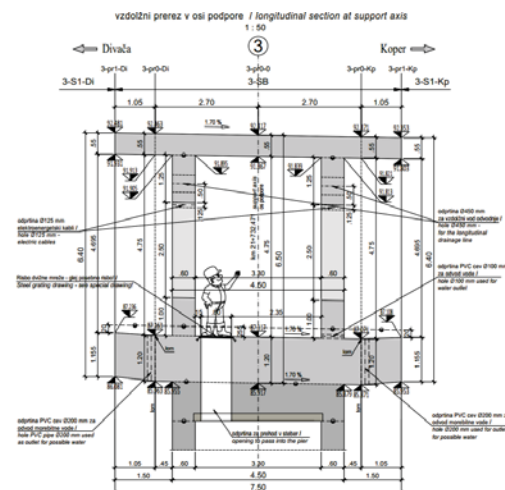




## VIADUKT VINJAN – PREKLADNA KONSTRUKCIJA



| Beton                           | Specifikacija  |
|---------------------------------|--|
| Prekladna konstrukcija - plošče | C 40/50 XC4/XF3<br>D <sub>max</sub> 22 D <sub>max</sub> 16<br>S4     |
| Prekladna konstrukcija - stene  | C 40/50 XC4/XF3<br>D <sub>max</sub> 22 D <sub>max</sub> 16<br>S4 SF2 |



## VIADUKT VINJAN



## HVALA ZA POZORNOST!



# DOBITNIKI PRIZNANJ

24. MAJ 2023

---



**DAN ZBS 2023**



## MARJAN PIPENBAHER



**DR. H. C. MARJAN PIPENBAHER** je bil prvi predsednik Združenja za beton Slovenije. Takoj po tem, ko se je pokazala potreba in nato porodila ideja o ustanovitvi združenja, v času gradnje viadukta Črni Kal, se je odzval in bil pripravljen sprejeti izziv ter popeljal združenje na uspešno pot. Marjan Pipenbahr je gradbeni inženir, podjetnik in predavatelj, častni doktor Univerze v Mariboru ter prejemnik državnega odlikovanja Srebrni red za zasluge. Je najuspešnejši slovenski projektant mostov in viaduktov ter drugih zahtevnih gradbenih konstrukcij. Hkrati pa vedno najde čas za promocijo inženirskih poklicev na področju gradbeništva med osnovnošolsko in srednješolsko populacijo. Za njegov neizbrisen pečat pri delovanju združenja za beton in ves prispevek pri projektiranju mostov, ki ima svetovne razsežnosti, ter za promocijo gradbeništva nasploh mu Združenje za beton Slovenije ob svoji 20-letnici podeljuje priznanje.

## ANTON ŠAJNA



**ANTON ŠAJNA** je bil med tisto trojico, ki je v fazi obsežne gradnje infrastrukturnih objektov v Sloveniji prepoznala potrebo po povezovanju stroke na področju betona in dala pobudo za ustanovitev združenja za beton. Kot prvi sekretar združenja je poskrbel za njegovo ustanovitev in zagon ter nato veliko let skrbel za uspešno delovanje. To so mu omogočale bogate izkušnje, ki jih je pridobival skozi celo delovno dobo kot predan gradbenik, tako na domačih kot tujih gradbiščih. Opravljal je tudi odgovorne funkcije, kot recimo vodenje republiške uprave za ceste, in sodeloval pri prestrukturiranju cestnega gospodarstva. Opravljal je tudi funkcijo državnega sekretarja na ministrstvu za promet. Vse te bogate izkušnje je po upokojitvi uporabil pri delu na Združenju za beton. Za njegov neizbrisen pečat pri delovanju in požrtvovalnost ter predanost mu Združenje za beton Slovenije ob svoji 20-letnici podeljuje priznanje.

## METOD DI BATISTA



**METOD DI BATISTA** je bil kot takratni direktor DRI med tisto trojico, ki je v fazi obsežne gradnje infrastrukturnih objektov v Sloveniji prepoznala potrebo po povezovanju stroke na področju betona in dala pobudo za ustanovitev združenja za beton. G. Di Batista je gotovo ena izmed ključnih oseb pri nastajanju slovenskih avtocest, morda ga najbolje opiše citat iz uvoda njegove knjige Slovenski avtocestni križ – Med vrhovi in brezni: »Avtoceste dajejo močan pečat čudoviti slovenski pokrajini. To so gradnje z največjimi posegi v naravno in bivalno okolje, zato jih je bilo treba posebno občuteno načrtovati. Poleg upoštevanja tehničnih, ekonomskih in prometno varnostnih kriterijev je bilo treba zelo skrbno načrtovati tudi vklapljanje teh objektov v občutljivo slovensko pokrajino. Avtoceste bodo ostale eden najbolj trajnih spomenikov neke generacije v prostoru.« Za neizbrisen pečat pri ustanovitvi in delovanju mu Združenje za beton Slovenije ob svoji 20-letnici podeljuje priznanje.



## JAKOB ŠUŠTERŠIČ



**DR. JAKOB ŠUŠTERŠIČ** je aktivno vključen v delovanje Združenja za beton Slovenije že od samega začetka. V letu 2014 je prevzel vodenje združenja kot njegov predsednik. To je bilo obdobje, ko se je zaradi krize v gradbeništvu tudi združenje spopadalo z novimi izzivi, načrti in prilagoditvami. Jakob Šušteršič je, skupaj z vsemi sodelavci, zagotovil kontinuiteto delovanja združenja na področju vseživljenjskega izobraževanja strokovnjakov s področja tehnologije betona ali projektiranja armiranobetonskih konstrukcij ter novelacijo in prevode ključnih standardov na področju betona. Združenje je popeljal iz krize na pot nadaljnega uspešnega delovanja. Za njegov neizbrisen pečat pri delovanju mu Združenje za beton Slovenije ob svoji 20-letnici podeljuje priznanje.

## TOMAŽ VUK



**DR. TOMAŽ VUK**, predsednik uprave cementarne Salonit Anhovo, je edini od nagrajencev, ki v združenju ni že od samega začetka. Ključno vlogo pa je odigral v kriznem obdobju združenja, ko je pomagal skupaj s predhodniki pripraviti načrt prenove združenja in ga popeljal iz krize ponovno na pot uspešnega delovanja. Ključnega pomena je bil tudi začetek financiranja združenja s pomočjo donacij cementarn, kar je omogočilo profesionalno delo združenja. V tem obdobju pa se je glede na aktualna dogajanja v gradbeništvu začelo tudi prepoznavati izreden pomen betona kot materiala za trajnostno gradnjo, gradnjo objektov, ki bodo trajni in s čim manjšim ogljičnim odtisom v celotni življenjski dobi. Tako je združenje na pobudo Tomaža Vuka začelo posvete Beton in trajnostna gradnja, do sedaj jih je bilo pet, na različne teme. Za njegov neizbrisen pečat pri delovanju združenja in z upanjem na nadaljnje sodelovanje mu Združenje za beton Slovenije ob svoji 20-letnici podeljuje priznanje.

## LOJZKA REŠČIČ



Ob zaključku slavnostnega dogodka so se zahvalili tudi **LOJZKI REŠČIČ**. Lojzka je namreč gonilna sila Združenja za beton Slovenije. Sekretarka združenja je postala pred devetimi leti, leta 2014. S svojo pozitivno energijo, strokovnostjo ter odličnimi organizacijskimi sposobnostmi je imela ključno vlogo pri ponovnem zagonu ZBS. Člane Sveta strokovnjakov je vedno znova aktivirala za delo na različnih projektih, ki so celostno naslavljali uporabo vrednost betona. Ključno vlogo je odigrala tudi pri evropskem projektu FIREEXPERT, kjer je bil ZBS eden od partnerjev, zadolžen za diseminacijo rezultatov projekta. Brez Lojzke se Združenje za beton ne bi moglo pohvaliti s takim številom referenc, kot jih s ponosom prikazujemo vsako leto. Hvala, Lojzka.

# UTRINKI Z DOGODKA

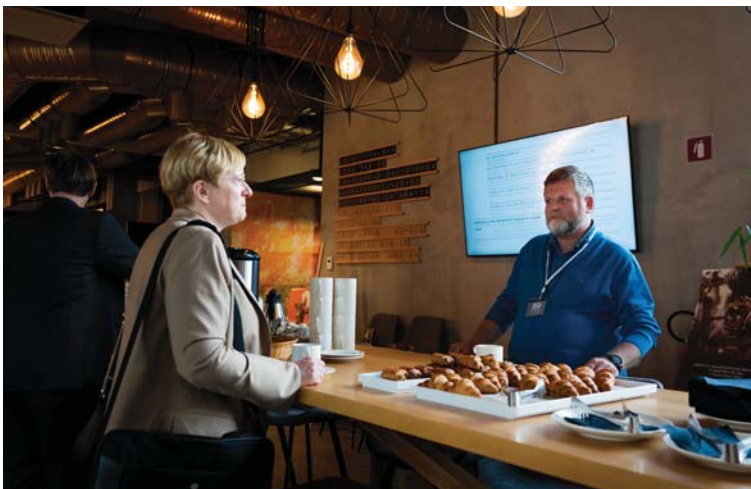
24. MAJ 2023

---



**DAN ZBS 2023**













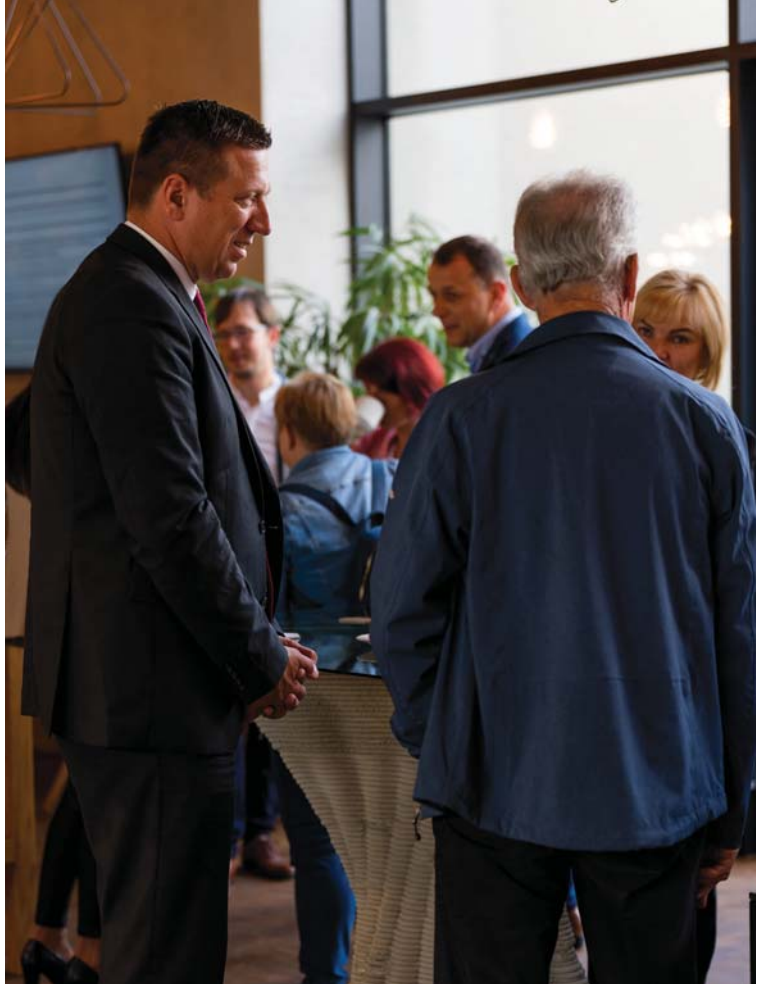










































# UTRINKI S SLAVNOSTNE PRIREDITVE

24. MAJ 2023

---



**DAN ZBS 2023**



























# UTRINKI S STROKOVNE EKSKURZIJE

25. MAJ 2023

---



**DAN ZBS 2023**



# VIADUKT VINJAN









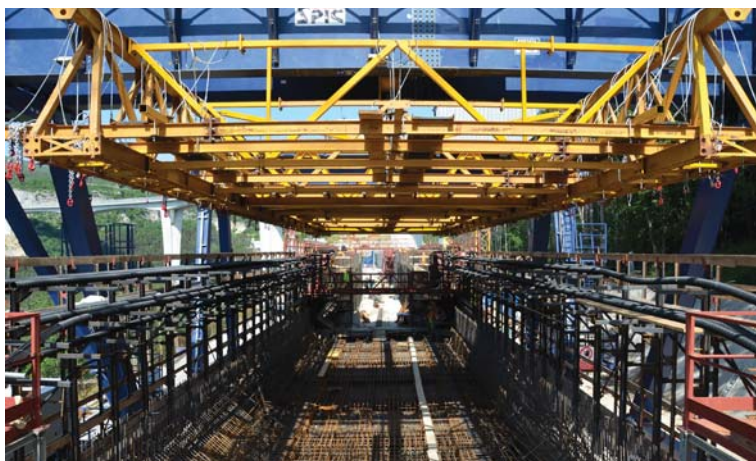
# VIADUKT GABROVICA













# SPONZORJI PRIREDITVE

24. IN 25. MAJ 2023

---

## ZLATI



## SREBRNI

POMGRAD



ZAG



Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo



## BRONASTI



BORDAX

KOLEKTOR

Inštitut  
BAM



MASTER®  
BUILDERS  
SOLUTIONS

PERI®



DOGODEK  
PODPIRATA

2TDK

ZEVNIK LAB





**DAN ZBS 2023**