

IZVEDBA VODONEPREPUSTNE AB-KONSTRUKCIJE KLETI STANOVANJSKE STOLPNICE PECA

CONSTRUCTION OF WATERPROOF RC STRUCTURE IN THE BASEMENT OF THE RESIDENTAL SKYSCRAPER PECA

Jure Tomažič, dipl. inž. grad.

jure.tomazic@cgp.si

Danilo Malnar, univ. dipl. inž. grad.

danilo.malnar@cgp.si

Ervin Struna, univ. dipl. inž. grad.

erwin.struna@cgp.si

CGP, družba za gradbeništvo, inženiring,
proizvodnjo in vzdrževanje cest, d. d.
Ljubljanska cesta 36, 8000 Novo mesto

Strokovni članek

UDK 624.012.45:699.82

Povzetek | V članku obravnavamo izvedbo zaščite kleti objekta pred talno vodo in vlago brez uporabe hidroizolacijske membrane. Na objektu stolpnica Peca je bil zunanji ovoj kletnega dela objekta zgrajen po načelu bele kadi. Pojem bela kadi ne pomeni samo vgradnje betona s posebno recepturo za doseganje vodoneprepustnosti, ampak skupek ukrepov, ki jih je treba upoštevati že pri zasnovi konstrukcije objekta, pri podrobnem projektiranju, med pripravo na izvedbo del in pri izvedbi del na objektu.

Ključne besede: vodoneprepustna betonska konstrukcija, bela kadi, izvedbeni detajli, tesnilni trakovi, armatura za omejitvev razpok

Summary | The article deals with the implementation of waterproof basement shell construction without waterproofing membrane. At the Peca skyscraper, the outer shell of the basement was built using the principle of white tub. The term white tub does not only mean the installation of concrete with a special recipe for waterproofing, but a set of measures to be taken in the design of the structure itself, in detailed design, during the preparation for the execution of works and in the execution of works on the site.

Key words: waterproof concrete construction, white tub, execution details, sealing tapes, crack reducing rebar

1 • UVOD

Zaščita objektov pred vodo in vlago je ena od bistvenih zahtev pri gradnji objektov. Skladno s *Pravilnikom o zaščiti stavb pred vlago* je treba zaščititi stavbe pred talno vodo in vlago, atmosferskimi padavinami in vodo iz napeljav stavbe. Ovoj stavbe mora biti projektiran, izveden in vzdrževan tako, da stavbo ščiti pred prodorom vlage v notranjost stavbe

ali navlaževanjem materialov ali gradbenih konstrukcij, ki bi jih vlaga lahko poškodovala, povzročila razvoj plesni in gliv ali poslabšala njihove lastnosti do te mere, da bi bila ogrožena zanesljivost stavbe (SIST, 2005).

V nadaljevanju bomo podrobneje obravnavali zaščito zunanjih sten in tal v stiku s terenom. Po 11. členu pravilnika je treba hidroizolacijo

pred talno vlago zunanjih sten in tal v stiku s terenom izvesti po standardih SIST DIN 18195-1 do 10.

V predpisih sta črna ali bela kadi navedeni kot splošni izvedbi zaščite podzemnih delov objektov proti vlagi. Ustrezni sta za najbolj zahtevne pogoje (vse vrste tal, globine in višine vodnih stolpcev). Glavna razlika je, da moramo pri črni kadi na zunanji strani konstrukcije vgraditi zvezno vodoneprepustno membrano (polimerne, elastomerne, FPO-membrane ...), pri beli kadi pa te membrane ni, zato mora biti skrbno

zasnovana, načrtovana in izvedena betonska konstrukcija podzemnega ovoja objekta.

V standardu SIST DIN 18195 so v podpoglavjih 4 in 6 glede na hidrogeološke lastnosti tal in globino konstrukcije pod nivojem terena

navedene različne zahteve za zaščito objektov pred talno vodo ((SIST, 2012a), (SIST, 2012b)). Črna in bela kad sta navedeni kot splošna načina zaščite za najbolj zahtevne pogoje.

Obstajata tudi pojma oranžna in rjava kad. Pri oranžni kadi gre za beton, armiran z makro jeklenimi vlakni, pri rjavi kadi pa za zaščito z bentonitno membrano na osnovi glinenih mineralov, ojačenih s tekstilnimi vlakni.

2 • KRATEK OPIS OBRAVNAVANEGA OBJEKTA

Zaščito pred talno vodo in vlago po načelu bele kadi smo izvedli na kleti večstanovanjskega objekta Stolpnica Peca na Litostrojski cesti v Ljubljani (Lanel, 2020). Objekt je zasnovan kot dva stanovanjska stolpa z lokali v pritličju, ki sta med seboj povezana s komunikacijskim jedrom. Stolpa imata po 14 nadzemnih etaž

floris kleti meri ca. 3160 m². Dno temeljev je na globini 6,6 m pod koto terena na območju zunaj floris stolpnice, pod florisom stolpnice pa je dno temeljne plošče na globini 7,5 m.

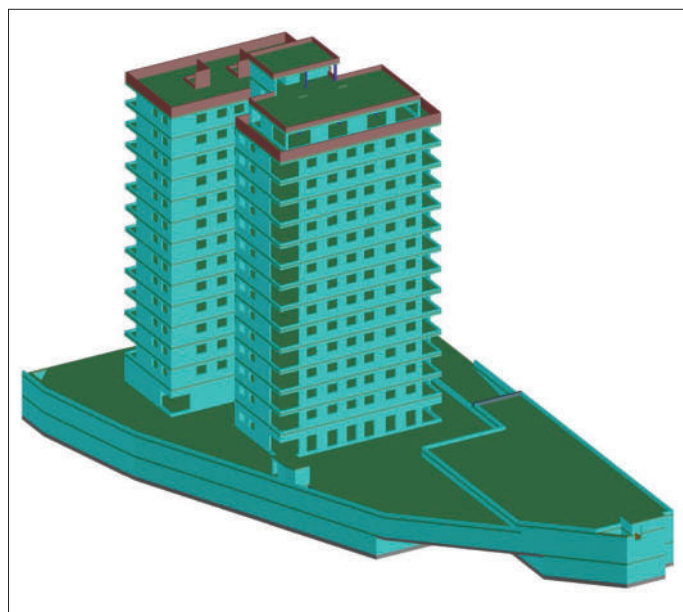
Nosilna konstrukcija objekta je monolitna armiranobetonska. Medetažne konstrukcije so gladke dvosmerno nosilne AB-plošče. Navpično

stolpnico, pod kletjo zunaj območja stolpnice pa pasovni temelji. Ker se je investitor za belo kad odločil naknadno, je bilo tudi pasovne temelje treba preprojektirati v temeljno ploščo.

Izkop gradbene jame je bil opravljen z vertikalnimi varovanimi brežinami. Izvedeno je bilo varovanje gradbene jame z vertikalnimi slopi jet-grouting, sidranimi z začasnimi geotehničnimi sidri pod kotom 20–25° in z jetsidri pod kotom 45°. Stene gradbene jame so bile



Slika 1 • Arhitekturni prikaz objekta.



Slika 2 • 3D-model AB-konstrukcije objekta.

(P+13N), na zahodnem stolpu je še terasa etaža (slika 1). Bruto florisna površina ene etaže znaša 678 m², višina konstrukcije objekta nad koto terena pa je 49,5 m. Pod stolpoma sta 2 kletni etaži, namenjeni garaži in shrambam etažnih lastnikov (slika 2). Bruto

konstrukcijo, ki podpira medetažne plošče in prevzema vodoravne obtežbe, tvorijo AB-stene po obodu in v komunikacijskem jedru objekta ter AB-stebri na sredini stolpov. Kletna konstrukcija je izvedena podobno. Za temeljenje objekta je bila sprva predvidena temeljna plošča le pod

izravnane z armiranim betonskim obrizgom (torkretom).

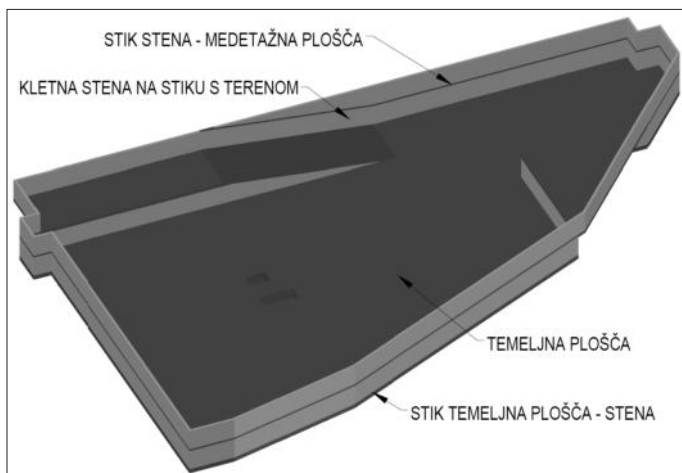
Temeljna tla so dobro prepustna iz nekoherentnih zemljin (rahlo zaglinjeni prod). Talna voda se nahaja na globini ca. 10 m pod dnom temeljne plošče objekta.

3 • IZVEDBA VODONEPREPUSNE BETONSKE KONSTRUKCIJE PO NAČELU BELE KADI

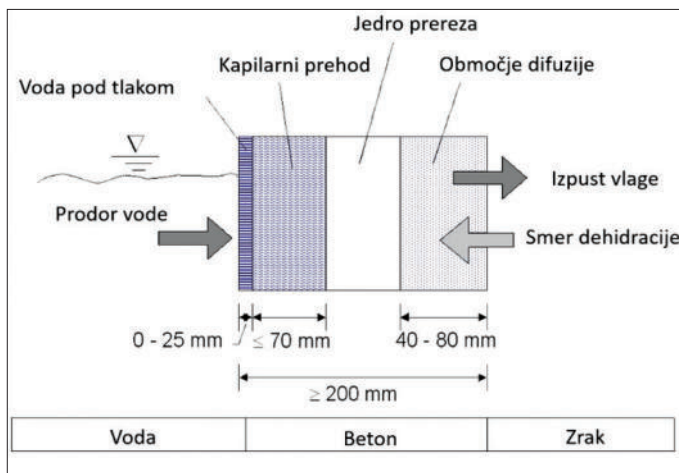
V našem primeru se bomo osredotočili na gradnjo vodoneprepusne betonske konstrukcije na stiku s terenom, ki jo sestavljajo temeljna plošča in z njo spojene obodne kletne stene.

Kadar je betonska konstrukcija del bele kadi, ima hkrati funkcijo zagotavljanja stabilnosti in mehanske odpornosti objekta ter funkcijo zaščite objekta pred vlago. Pri načrtovanju in izvedbi vodoneprepusne konstrukcije po načelu bele kadi je treba zagotoviti zlasti:

- pravilno zasnovano konstrukcijo na stiku s terenom in planiranje delovnih taktov za izvedbo,
- izbiro pravilne recepture betonu,
- omejitev širine razpok v betonu; izračun in vgradnjo ustrezne armature (obtežni primeri vplivov med gradnjo po SIST EN 1991-1-6 in v času uporabe objekta (Beg, 2009)),
- pravilno načrtovanje in izvedbo detajlov (predvsem delovnih stikov, spojev in prebojev),



Slika 3 • Prikaz vodoneprepustnega AB-kletnega ovoja.


 Slika 4 • Prikaz delovanja vodoneprepustnega betona (prikazan beton C30/37, PV-II, $v/c \le 0,55$) (Lochmeyer, 2009).

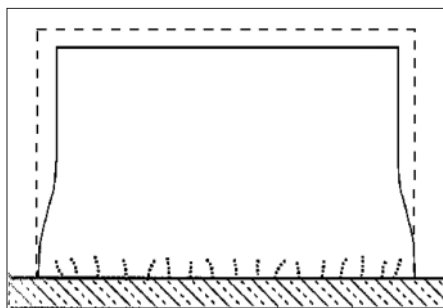
- pravilno vgradnjo in nego svežega betona, kontrolo kakovosti izvedbe.

3.1 Pravilna zasnova AB-konstrukcije

AB-konstrukcija mora imeti čim bolj enostavno geometrijo. Debelina talnih plošč mora biti vsaj 25 cm, za stene je priporočljivo, da so

Zagotovljena mora biti čim večja drsnost med ploščo in podlago, da so natezne vsiljene obremenitve čim manjše. Višinski skoki pod ploščo niso ustrezni, prehodi med debelinami morajo biti v naklonu vsaj 1 : 1 (45°). Delovni takti temeljne plošče morajo biti čim bolj enostavnih oblik in ne prevelikih dimenzij. Večji ko

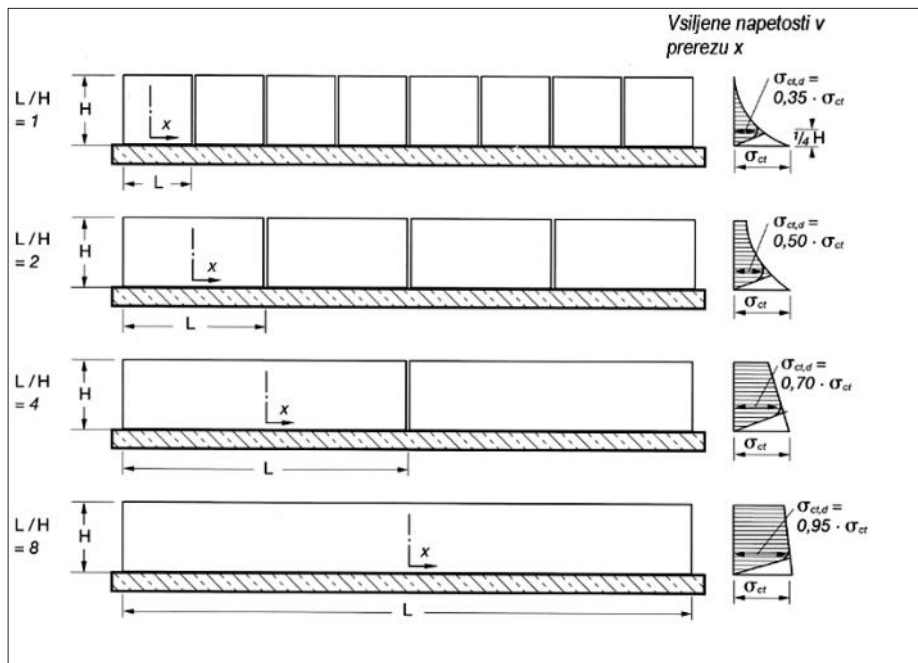
nastanejo večje natezne napetosti v vodoravni smeri, ki povzročajo nastajanje navpičnih razpok (slika 5). Te napetosti se večajo sorazmerno z dolžino vpetja stene. Večje ko je razmerje L/H , večje natezne napetosti nastanejo v steni in bolj enakomerno so skoncentrirane po celotni višini stene (slika 6). Opisano stanje



Slika 5 • Prikaz deformiranja stene med hidratacijo zaradi vpetja v podlago (velja za vsako etažo) (Lochmeyer, 2009).

debele vsaj 30 cm. Beton je vedno nekoliko porozen, zato ne deluje kot vodotesna membrana, temveč nudi določen upor pri prodiranju vode skozi konstrukcijo. Pri betonu z oznako C30/37, PV-II je tako na primer zunanji sloj betona v debelini do 25 mm v stiku s talno vodo/vlago namočen (slika 4). V naslednjih 70 mm debeline betona je območje kapilarnega prehoda vode. Na notranji (zračni strani) betona v debelini 40–80 mm je območje difuzije, kjer poteka izsuševanje oziroma dehidracija. Najboljše je, da so notranje površine dobro zračene. Dovoljeni so le paroprepustni premazi tal in sten.

Za talno konstrukcijo je najbolj primerna gladka temeljna ploščica, ki se lahko čim bolj neovirano krči v fazi najvišje hidratacije.


 Slika 6 • Razporeditev nateznih napetosti glede na razmerje L/H (velja za vsako etažo) (Lochmeyer, 2009).

sta dolžina in širina takta, večje bodo v plošči vsiljene obremenitve zaradi trenja s podlago.

V stenah med hidratacijo betona prav tako nastajajo vsiljene obremenitve zaradi ovirane ga krčenja. Stene so spodaj vpete v temeljne ali medetažne ploščice, v katerih je velik del krčenja že potekel. Vpetost v podlago ovira nastanek deformacij pri krčenju sten, zato tu

napetosti se spreminja z napredovanjem del (ovirano krčenje v etažah, ko se priključijo ploščice, spremembe, ko se priključijo prečne stene).

Razmerje L/H lahko zmanjšamo, če ustvarimo navidezne dilatacije z iniciatorji razpok. To so namerne oslabilne stene, kjer steni določimo mesto razpoke. S tem pri dolgih stenah zmanj-

šamo razmerje L/H . Na mestih vgrajenih iniciatorjev razpok dovolimo, da stena razpoka, mesto razpoke pa je zafesnjeno z iniciatorjem, ki ima hkrati tudi funkcijo tesnilnega traku. Smiselna je vgradnja iniciatorjev razpok v razmiku $H \leq L \leq 2 \cdot H$.

3.2 Pravilna izbira recepture vgrajenih betonov

Betoni za izvedbo neprepustne konstrukcije morajo biti trdnostnega razreda vsaj C25/30 s stopnjo odpornosti proti prodoru vode vsaj PV-II. Priporoča se uporaba cementov tipa N in S, ki dosegajo običajne oziroma nizke zgodnje trdnosti in pri tem ne sproščajo visoke hidratacijske toplote. Cementi višjega trdnostnega razreda in hitrovezoči se cementi tipa R sproščajo višje hidratacijske toplote, zato za vodoneprepustne betonske konstrukcije niso primerni. Za izvedbo betonov visokih trdnosti ali debelejših konstrukcij je treba uporabiti LH (low hidrattation) cement. Priporočljiv je čim manjši vodocementni faktor $v/c < 0,60$.

Na obravnavanem objektu smo v temeljno ploščo in kletne stene vgradili beton z oznako C30/37 (XC4/XD2/XF1/XA1, PV-II, CI 0,20, D_{max} 32, S4). Uporabljena sta bila običajni cement z oznako CEM II/B-M (LL-V) 42,5 N in dodatek za pripravo lažje vgradljive betonske mešanice.

3.3 Omejitev širine razpok

Da lahko betonska konstrukcija deluje kot vodoneprepustna, je treba omejiti širino razpok v betonu (preglednica 1). Razpoke v betonu se zaprejo z nabrekanjem betona in samozatesnitvijo, če je širina razpok $w_k \leq 0,20$ mm. Največja dovoljena širina razpoke betona se sicer določi glede

Pri tem je: h_b debeline AB-stene ali plošče, h_wvišina vodnega stolpca, pritiskajočega na konstrukcijo.

Pri temeljnih ploščah se višina vodnega stolpca h_w meri od spodnje ploskve plošče, pri stenah pa na višini $H/4$ od spodnjega roba stene, pri čemer je H svetla etažna višina stene, zabetonirane v enem taktu.

Za zahtevnostni razred konstrukcije A_3 je pri določenih razmerjih $i = h_w/h_b$ širina razpoke v betonu dovoljena tudi do $w_k \leq 0,25$ mm. Konstrukcije v razredu A_4 ne štejemo več za vodoneprepustne, širina razpoke je omejena glede na zahteve MSU (po SIST EN 1992-1-1).

V primeru objekta stolpnica Peca je bilo treba zagotoviti razred zahtevnosti A_2 . Temeljna tla so dobro prepustna iz nekoherentnih zemljin. Pritiskajoča talna voda se nahaja na globini ca. 10 m pod dnom temeljne plošče objekta. Za omejitev širine razpoke torej razmerje $i = h_w/h_b$ ni merodajno, zato smo se odločili za največjo širino razpoke, ki se še zapre z nabrekanjem betona in samozatesnitvijo ter izbrali $w_k \leq 0,20$ mm za temeljno ploščo in za obodne stene.

3.3.1 Račun potrebne armature za omejitev širine razpok zaradi vsiljenih obremenitev v času gradnje – temeljna plošča

Največji delovni takt plošče debeline 60 cm na objektu je znašal $L \times B = 31 \times 25$ m. Podlaga plošče je bila utrjeno tamponsko nasutje, prekrito s slojem PE-folije s peno (kot npr. Gefitas PE 300). Pri računu smo upoštevali koristno obtežbo takoj po strjenem betonu

Zahtevnostni razred	Kratek opis površin	Primeri uporabe
A_s	Popolnoma suho	Skladišča za blago, občutljivo na vlago
A_1	Pretežno suho	Bivalni prostori, skladišča, kleti, hišna tehnika
A_2	Rahlo vlažno	Garaže, hišna tehnika, kotlovnice, prometni objekti
A_3	Vlažno	Garaže z dodatnimi ukrepi (drenaža, koritnice)
A_4	Mokro	Zunanja lupina dvolupinske izvedbe

Preglednica 1 • Zahtevnostni razredi uporabe objekta (Glatzl, 2009).

na zahtevnostni razred uporabe objekta (določita skupaj projektant in investitor) in razmerje med višino vodnega stolpca, ki pritiska na konstrukcijo in debelino konstrukcije (Meyer, 2007). Za razrede uporabe A_s , A_1 in A_2 lahko štejemo, da so zahteve izpolnjene, če širino razpoke w_k omejimo v skladu s preglednico 2:

$q_k = 1,5$ kN/m². Prikaz računa armature za omejitev razpok v daljši smeri delovnega takta je na slikah 7 in 8. Vsi izračuni, pomožni izračuni in vhodni podatki so povzeti po (Lochmeyer, 2009).

Račun natezne sile na sliki 7 velja v primeru ravne spodnje ploskve. Račun ne upošteva

Širina razpoke w_k (mm)	Razmerje $i = h_w/h_b$ (m/m)	
Zahtevnostni razred	A_s	A_1 in A_2
$\leq 0,20$	$i \leq 2,5$	$i \leq 10$
$\leq 0,15$	$2,5 < i \leq 5$	$10 < i \leq 15$
$\leq 0,10$	$5 < i \leq 25$	$15 < i \leq 25$

Preglednica 2 • Omejitve širine razpoke glede na razmerje i in zahtevnostni razred uporabe objekta ((Lochmeyer, 2009), (Glatzl, 2009)).

odpora zaradi sidranja armature v že izvedene delovne takte.

V temeljni plošči mora biti torej na vsaki strani vgrajena armatura A_s , $de_j = \emptyset 14/12,5$ cm (12,32 cm²/m²). Minimalna armatura v prerezu obravnavane plošče po EC2 znaša A_s , $min = 8,28$ cm². Izračunana armatura za omejitev razpok torej presega minimalno armaturo za ca. 50%.

V statičnem preračunu mora biti tudi za končno stanje objekta za navidezno stalne kombinacije vplivov (MSU) dokazano, da vgrajena armatura zadošča omejitvi razpok $w_k \leq 0,20$ mm.

3.3.2 Račun potrebne armature za omejitev širine razpok zaradi vsiljenih obremenitev v času gradnje – stene

Delovne takte, ki so sicer predvideni v dolžini 16–20 m, skrajšamo z vgradnjo iniciatorjev razpok na razdalji $L = 4,0$ m. Višina stene, ki se betonira v enem taktu, je hkrati svetla etažna višina in znaša $H = 2,76$ m. Pri stenah je pomembno, da sta si temperatura plošče, na katero je vpeta stena, in temperatura sveže betonske mešanice čim bolj podobni. V računu smo predpostavili razliko $\Delta T = 6$ K. V računu povišanja temperature med hidratacijo smo po Lochmeyerju (Lochmeyer, 2009) iz tabel odbrali hidratacijsko toploto Q_{ht} , ki jo uporabljamo tip cementa sprošča v času največje hidratacije $t(T_{max})$. Postopek za izračun količine armature za omejitev razpok in izračun širine razpok je enak kot pri temeljnih ploščah, izračun vsiljenih obremenitev v steni in razporeditev armature, potrebne za omejitev širine razpok, pa je prikazan na slikah 9 in 10. Za zgoraj določene obremenitve smo izračunali potrebno vodoravno armaturo $A_s = \pm 10,26$ cm²/m. Uporabljene so armature palice $\emptyset 10/7$ cm (A_s , $de_j = \pm 11,22$ cm²/m), preračunana širina razpoke za izbrano armaturo pa $w_k = 0,160$ mm.

A/ Material

Beton:	C30/37	Jeklo:	S500
$\gamma_c =$	1,00	$\gamma_s =$	1,00
$k_{HW} =$	0,50 ... dosežen delež trdnosti pri t(T _{max})	$f_{yk} =$	50,00 kN/cm ²
$f_{ctm} =$	0,290 kN/cm ²	$f_{tk} =$	50,00 kN/cm ²
$E_{cm} =$	3.300 kN/cm ²	$E_s =$	20.000 kN/cm ²

Natezna trdnost betona v času največje hidratacije:
 $f_{ct,eff} = k_{HW} \cdot f_{ctm}$

$f_{ct,eff} =$	0,145 kN/cm ²
----------------	--------------------------

B/ Geometrijske karakteristike - pravokotni prerez

Betonski prerez:			
b =	100,0 cm	... širina obravnavanega pasu	$A_{c,eff} =$ 1.425,0 cm ²
h =	60,0 cm	... debelina	$h_{c,eff} =$ 14,3 cm
$c_{nom} =$	5,0 cm	... krovni sloj (PAZI POZ. SLOJA)	$a_1 =$ 5,7 cm
L =	31,0 m	... dolžina delovnega takta	$k_{Tr} =$ 0,67
$\phi_s =$	14 mm	... premer armaturnih palic	

C/ Vsiljene obremenitve zaradi trenja s podlago

Tip podlage (izberi):
 nasutje iz mešanega materiala 1 plast ločilne PE folije (ploščica 20 cm < h < 80 cm)

Obtežba za izračun natezne napetosti zaradi trenja:		Koeficient trenja ploščice s podlago:
$\gamma_B =$	1,35 ... varnostni faktor vpliva trenja	$\mu_0 =$ 1,10
$\gamma_a =$	25,0 kN/m ³ ... specifična teža AB	$\mu_d =$ 1,49
$q_k =$	1,5 kN/m ² ... koristna obtežba na plošči	

Pritisk pod temeljno ploščo:
 $\sigma_0 = h \cdot \gamma_B + q_k$

$\sigma_0 =$	16,5 kN/m ²
--------------	------------------------

Natezna sila v temeljni plošči na pas širine b:
 $N_{ct} = \mu_a \cdot \sigma_0 \cdot \frac{L}{2} \cdot b$

$N_{ct} =$	379,8 kN
------------	----------

Natezna sila na en sloj armature v širini b (simetrično armiranje):
 $N_s = \frac{N_{ct}}{2}$

$N_s =$	189,9 kN
---------	----------

Natezna sila, pri kateri razpoka efektivni natezni prereza betona:
 $N_{ct,eff} = A_{c,eff} \cdot f_{ct,eff}$

$N_{ct,eff} =$	206,4 kN
----------------	----------

Slika 7 • Račun vsiljenih obremenitev zaradi trenja s podlago – temeljna plošča.

Izračun armature je opravljen za višino $h = 0,25 \cdot H$ od peticje stene v spodnjo ploščo. Izračunana vodoravna armatura se torej vgradi na vsaki strani stene na območju $0 < h \leq H/4$ spodaj. Od višine $h = H/4$ proti vrhu stene se potrebna količina vodoravne armature za omejitev razpok zmanjšuje. Manjše ko je razmerje L/H , hitreje potrebna količina pada. Smiselna je izvedba prekinitvev (z iniciatorji razpok) na razdalji $H < L < 2 \cdot H$. Pri tem je H svetla višina stene v eni etaži. Preračun je treba izvesti za vsako kletno etažo posebej. Glede na razmerje $i = h_w/h_b$ (glej preglednico 2) je lahko največja dovoljena širina razpoke v stenah v vsaki etaži drugačna.

Po načrtu gradbenih konstrukcij so bile v steni predvidene obojestranske mreže Q524 ($\phi 10/15$ cm, $A_{sh} = 5,24$ cm²/m). S slike 10 je razvidno, da predvidena armatura v območju stene $h = 0,0$ do 1,10 m ne zadošča, zato je v tem območju potrebna dodatna vodoravna armatura. Do višine stene $h = H/4 = 0,69$ m moramo v obravnavani etaži dodati po šest palic premera 10 mm obojestransko.

Na območju stene $h = 0,69 - 1,10$ m lahko dodatne horizontalne palice postopoma redčimo.

3.4 Izvedbeni detajli

Od izvedbenih detajlov je najbolj pomembno tesnjenje vseh delovnih stikov in prebojev. Za tesnjenje obstaja na trgu cela vrsta proizvodov (tesnilnih trakov, tesnilnih mas ...). Tu se bomo omejili na detajle in produkte, ki smo jih uporabili na objektu Stolpnica Peca.

3.4.1 Delovni stiki v temeljni plošči

Temeljna plošča pod stolpoma je izvedena v debelini 150 cm, na ostalem območju pa je debela 60 cm. Višinski skok zaradi spremenljive debeline smo izvedli pod kotom 45°. Na delovnem stiku med posameznima plastema smo vgradili nabrekajoči se tesnilni trak.

Delovni stik med deli plošče smo tesnili z zunanjim tesnilnim PVC-trakom. Stike delovnih taktov je treba načrtovati zunaj območij največjih strižnih in upogibnih obremenitev (ca. na $\frac{1}{4}$ razpona med stenami oziroma stebri). Pod ploščo smo položili samo PE-folijo s peno za zmanjšanje trenja s podlago. Podložnega

D/ Račun potrebne armature za omejitev širine razpoke

Največja dovoljena širina razpoke:
 $w_k =$ 0,20 mm

Računska armatura na eni strani betonskega prereza:
 $A_s = \sqrt{\frac{\phi_s \cdot A_{c,eff}}{3,6 \cdot w_k \cdot E_s}} \cdot (N_s - 0,4 \cdot N_{ct,eff})$

$A_s =$	12,19 cm ² /m
---------	--------------------------

Izbrana armatura:

s =	12,5 cm	... osni razmik palic
$\phi_s =$	14 mm	... izbrani premer palic
n =	8,00	... število palic na širino b

Dejanska armatura:

$A_{s,dej} =$	$\phi 14$ mm / 12,5 cm
$A_{s,dej} =$	12,32 cm ² /m

 OK!

Omejitev natezih napetosti v armaturi glede na izbrani ϕ_s :
 $\sigma_s = \frac{N_s}{A_{s,dej}}$

$\sigma_s =$	15,4 kN/cm ²
$\phi_s^* =$	30,6 mm

Največji dovoljen premer arm. palic:
 $\phi_{s,dov} = \phi_s^* \cdot \frac{f_{ct,eff}}{f_{ct,0}}$

$\phi_{s,dov} =$	14,8 mm
------------------	---------

 OK!

E/ Račun dejanske širine razpoke

Efektivna stopnja armiranja:
 $\rho_{eff} = \frac{A_s}{A_{c,eff}}$

$\rho_{eff} =$	0,00864
----------------	---------

Čas največje hidratacije:
 $t(T_{max}) = 24 \cdot (0,8 \cdot h + 1)$

t(T _{max}) =	35,5 ur
$\alpha_{c,t}(t) =$	0,79

Razmerje elastičnih modulov
 $\alpha_e = \frac{E_s}{\alpha_{c,t} \cdot E_{cm}}$

$\alpha_e =$	7,63
--------------	------

Razlika deformacije armature in povprečne deformacije betona med razpokami:
 $\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - 0,4 \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{eff})}{E_s} \geq 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}$

$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} =$	0,000414
$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} \geq$	0,000463

Največja razdalja med razpokami:
 $s_{r,max} = \frac{\phi_s}{3,6 \cdot \rho_{eff}} \leq \frac{\sigma_s \cdot \phi_s}{3,6 \cdot \rho_{eff}}$

$s_{r,max} =$	45,0 cm
$s_{r,max} \leq$	41,4 cm

Izračunana širina razpoke:
 $w_k = s_{r,max} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$

$w_k =$	0,192 mm
---------	----------

Slika 8 • Račun potrebne armature za omejitev širine razpok in dejanske širine razpok – temeljna plošča.

betona nismo uporabili, betoniranje se je opravilo neposredno na utrjen in izravnani tamponski nasip, prekrit s folijo.

3.4.2 Delovni stiki plošče-stene proti terenu

V delovni stik temeljna plošča-stena proti terenu smo vgradili kovinski tesnilni trak z veznim nanosom (posipom) proti zunanji, mokri strani. Kovinski trak se namesti približno na sredini debeline stene.

Na delovnem stiku, kjer nalegajo na steno medetažne plošče, smo na vrhu sten vgradili nabrekajoči se tesnilni trak, prilepljen na beton, z namensko nabrekajočo tesnilno maso. Nad medetažnimi ploščami smo, tako kot pri temeljni plošči, vgradili kovinski tesnilni trak.

3.4.3 Vertikalni delovni stik stena-stena, iniciatorji razpok

Dolžina delovnih taktov sten znaša ca. 16–20 m. Na delovnih stikih stena-stena smo vgradili enake kovinske tesnilne trakove kot pri stiku plošča-stena, le da so tu vgrajeni vertikalno. Ker so enkratno betonirani delovni takti dolgi ($L/H = 7 > 2$), se na vsake 4 m stene vgradijo vertikalni iniciatorji razpok za

B/ Geometrijske karakteristike - pravokotni prerez

Betonski prerez:

b =	100,0	cm	... širina obravnavanega pasu	$A_{c,eff} =$	1.125,0	cm ²
h =	30,0	cm	... debelina	$h_{c,eff} =$	11,3	cm
$c_{nom} =$	4,0	cm	... krovni sloj (ZUNANI SLOJ)	$a_{\perp} =$	4,5	cm
$\phi_s =$	10	mm	... premer armaturnih palic	$L/H =$	1,45	
L =	4,00	m	... dolžina delovnega takta	$k_{ct,d} =$	0,42	
H =	2,76	m	... višina stene	$k_{iv} =$	0,50	

C/ Vsiljene obremenitve zaradi hidratacije

Čas največje hidratacije:
 $t(T_{max}) = 24 \cdot (0,8 \cdot h + 1)$

$t(T_{max}) =$	29,8	ur
$\alpha_{c,t}(t) =$	0,72	

Povišanje temperature med hidratacijo:
 $\Delta T_{b,H} = \alpha_b \cdot \frac{Z \cdot Q_H}{C_{c0}}$

$\Delta T_{b,H} =$	16,4	K
--------------------	------	---

Začetne temperature:

$T_{c0} =$	18,0	°C	... temp. svežega betona
$T_p =$	12,0	°C	... temp. plošče pod steno
Cement:	42,5 N		... tip uporabljenega cementa
$C_{c0} =$	2.500	kJ/(m ³ K)	

Modul elastičnosti betona pri $t(T_{max})$:

$E_{c,t} =$	2.383	kN/cm ²
$E_{c0,t} =$	2.688	kN/cm ²
$\alpha_b =$	0,73	
$Q_{H,t} =$	176	kJ/kg

Srednja temperatura v steni:
 $T_{b,m} = k_{Tp} \cdot T_{c0} + \Delta T_{b,H}$

$T_{b,m} =$	25,4	°C
-------------	------	----

Učinkovita temperaturna razlika:
 $\Delta T_{b,W-F} = T_{b,m} - T_p$

$\Delta T_{b,W-F} =$	13,4	K
----------------------	------	---

Izračun nastalih vsiljenih napetosti na dnu stene pri $t(T_{max})$:
 $\sigma_{ct} = k \cdot \alpha_T \cdot E_{c,t} \cdot \Delta T_{b,W-F}$

$\sigma_{ct} =$	0,319	kN/cm ²
$\alpha_T =$	0,000010	K ⁻¹
$\sigma_{ct,d} =$	0,133	kN/cm ²

$\sigma_{ct,d} = k_{ct,d} \cdot \sigma_{ct}$

Natezna sila v steni:
 $N_{ct} = \sigma_{ct,d} \cdot A_c$

$N_{ct} =$	400,0	kN
------------	-------	----

Natezna sila na en sloj armature v širini b (simetrično armiranje):
 $N_s = \frac{N_{ct}}{2}$

$N_s =$	200,0	kN
---------	-------	----

Natezna sila, pri kateri razpoka efektivni natezni prereza betona:
 $N_{ct,eff} = A_{ct,eff} \cdot f_{ct,eff}$

$N_{ct,eff} =$	162,9	kN
----------------	-------	----

Slika 9 • Račun vsiljene obremenitve zaradi hidratacije – stene.

zmanjšanje računске dolžine taktov ($L/H = 1,45$). Na delovnih stikih in na mestih iniciatorjev razpok se betonski prerez dodatno oslabi z vgradnjo vertikalnih trikotnih oz. trapeznih letvic v opaž.

3.4.4 Preboji inštalacij

Treba je zatesniti vse preboje inštalacij preko AB-kletnega ovoja. Pri naknadno vgrajenih ceveh preko sten ali temeljnih plošč se lahko uporabi npr. gumijasta tesnilna prirobnica.

3.4.5 Križanja

Na mestih križanj več delovnih stikov je treba posamezne tesnilne trakove spajati med seboj. Pri križanju delovnega stika dveh taktov temeljne plošče in stika plošča-stena morata biti zunanji tesnilni PVC-trak in notranji jekleni tesnilni trak pravilno spojena med seboj. Zaradi goste armature na območju stika so ta križanja še posebej zahtevna za izvedbo.

3.4.6 Tesnjenje lukenj od vezav opaža

Večinoma je bil na objektu za izdelavo obodnih sten uporabljen enostranski opaž, kjer ni lukenj zaradi vezave opaža. Pri dvostran-

skem opažu je treba vgraditi razporne elemente stenskega opaža iz mikroarmiranega betona, ki se po razopaženju obojestransko tesnijo z vlaknocementnimi čepi, lepljenimi z epoksidnim lepilom. Če se uporabljajo razporni PVC-elementi, se morajo pred začetnitvami s čepi izbiti.

3.5 Izvedba na terenu, vgrajevanje in nega betona, kontrola kakovosti

Za uspešno gradnjo in funkcioniranje vodoneprepustnih konstrukcij je treba pri pripravi na gradnjo in pri gradnji dosledno upoštevati vsa v prejšnjih poglavjih podana dejstva.

Pred betoniranjem vodoneprepustne konstrukcije je pomembno, da je opaž dobro pripravljen:

- pripravljeni in očiščeni so vsi delovni stiki, ki bodo izvedeni vodotesno,
- pravilno vgrajeni in na mestih križanj spojeni tesnilni trakovi,
- ustrezno mora biti nameščena vsa potrebna armatura.

Za betoniranje je pomembno, da se ne izvaja v mrazu ali preveliki vročini. Podlaga (predvsem pri betoniranju sten) ne sme

biti bistveno hladnejša od vgrajene sveže mešanice betona. Beton ne sme padati na mesto vgradnje z višine višje od 1,50 m. Za vgrajevanje v stene je nujna uporaba kontraktorja. Od izdelave betonske mešanice v betonarni do vgradnje na gradbišču mora preteči čim manj časa.

Po končanem betoniranju je treba beton intenzivno negovati vsaj v času prvih 3–5 dni:

- površina betona mora biti stalno vlažena in zaščitena proti izhlapevanju,
- v hladnejših obdobjih je treba beton zaščititi pred mrazom in vetrom, v toplih dneh pa pred vročino (pokrivanje s PE-folijo in gradbenim filcem).

Pomembno je planiranje kakovosti med pripravo na delo in izvajanje strokovne interne kontrole kakovosti med gradnjo. Ključ do kakovostne in uspešne izdelave vodoneprepustnih betonskih konstrukcij je širjenje izkušenj in strokovno ozaveščanje vseh, ki sodelujejo pri gradnji. Vsi sodelujoči morajo razumeti, da je za funkcionalnost celotne konstrukcije pomembna skrbna izvedba vsakega detajla in faze dela.

F/ Razporeditev potrebne horizontalne armature za omejitve širine razpok vzdolž višine stene H

Potrebna armatura na višini 0,25·H od tal:

$A_s =$	10,26	cm ² /m
$L/H =$	1,45	

Dimenzije stene:

L =	4,00	m
H =	2,76	m

Potrebna armatura glede na višinoVišina od tal:

x/H	h [m]	$E_{ct,d}/E_{ct}(L/H)$	A_s [cm ² /m]
0,00	0,00	1,00	10,26
0,20	0,55	0,42	10,26
0,25	0,69	0,32	10,26
0,30	0,83	0,23	7,36
0,40	1,10	0,16	5,16
0,60	1,66	0,05	1,74
0,80	2,21	0,00	0,00
1,00	2,76	0,00	0,00

Razpored potrebne horizontalne armature (na eni strani stene):

Slika 10 • Razporeditev armature po višini stene.

4 • ZAKLJUČEK

Gradnja vodoneprepustne konstrukcije po načelu bele kadi kljub razmeroma preprosti konstrukciji zahteva obsežno načrtovanje in skrbno obdelavo. Že v zgodnji fazi projekta mora investitor potrditi izbran način zaščite objekta pred talno vlago in definirati razred zahtevnosti za vodoneprepustnost konstrukcije. Kot večina sistemov ima tudi konstrukcija po načelu bele kadi svoje prednosti in slabosti. Prednosti vodoneprepustne konstrukcije po načelu bele kadi:

- manj napak v konstrukciji zaradi manj faz dela in večjega nadzora pri izvedbi,
- betonska konstrukcija prevzame hkrati nosilno in tesnilno funkcijo, zato je bolj izkoriščena,
- zaradi zahtevane večje kvalitete vgradnje betonskih mešanic in omejitve širine razpok je »stranski učinek« bele kadi tudi kvalitetnejša izvedba vidnih betonov,
- prihranek pri stroških gradnje in krajši čas gradnje,
- enostavna ugotovitev lokacije in izvedba sanacije morebitnih mest zamakanj, saj

se le-ta pojavijo točno na mestu napake. Sanacija morebitnih napak je enostavna (injektiranje razpok, krpanje segregacijskih gnezd),

- ni nevarnosti poškodb hidroizolacije med izvedbo kasnejših del,
- manjši stroški vzdrževanja (vodotesnosti) objekta.

Slabosti vodoneprepustne konstrukcije po načelu bele kadi:

- zahtevnejše projektiranje in zahteva po večji kvaliteti izvedbe betonske konstrukcije,
- zahtevano popolno tesnjenje stikov in prebojev s posebnimi konstrukcijskimi elementi,
- dimenzije gradbenih elementov, opažev in armature morajo biti podrejene zahtevam betonskih del,
- dražje betonske mešanice (PV-II, pogosto zahtevani betoni z zmanjšano hidratacijo – LH-cementi ali posebni dodatki za zmanjšanje krčenja in sproščanja hidratacijske toplote),
- vezava opažev mora biti vodotesna,

- zahtevna izvedba naknadnega dolbenja oz. prebijanja konstrukcije, predvsem z vibracijskimi orodji, poveča se tveganje za vdor vode in vlage,
- upoštevati je treba dejstvo, da v neprepustnem betonu stalno poteka proces kapilarnega transporta vlage in se znotraj prostorov povečuje relativna vlažnost zraka, kar je treba upoštevati pri namembnosti notranjih prostorov,
- pomanjkanje izkušenj in celovitega poznavanja načela bele kadi med gradbeno stroko v Sloveniji.

Gledano z ekonomskega vidika, so vodoneprepustne konstrukcije ugodne. Res je, da moramo vgraditi v konstrukcijo več armature, tesnila na vseh stikih in iniciatorje razpok, vendar nam v primerjavi s črno kadjo odpadejo drage HI-membrane ter zahtevna priprava površin za vgradnjo slednjih. Poleg manjših stroškov na strani vgrajenih materialov se pri izvedbi bele kadi delno zmanjšajo tudi stroški režije gradbišča, saj zaradi odpadle faze izvedbe HI-dela napredujejo hitreje. Lažje je dosegati vse krajše roke za izgradnjo objekta, ki jih zahtevajo investitorji.

5 • LITERATURA

- Beg, D., Pogačnik, A., Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih, Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije, 2009.
- Glatz, J., Richtlinie Wasserundurchlässige Betonbauwerke – Weiße Wannen, Dunaj, Österreichische Vereinigung für Beton-und Bautechnik, 2009.
- Lanel Invest d.o.o., <http://www.pecaprojekt.si/slv/opis>, 2020b.
- Lohmeyer, G., Ebeling, K., Weiße Wannen – einfach und sicher, Düsseldorf, Verlag Bau+Technik GmbH, 2009.
- Meyer, D., Meyer, R., Rissbreitenbeschränkungen nach DIN 1045, Diagramme zur direkten Bemessung, Düsseldorf, Verlag Bau+Technik GmbH, 2007.
- SIST DIN 18195-4:2012, Tesnjenje objektov – 4. del: Tesnjenje pred talno vlago (kapilarna vlaga) in ponikajočo vodo, ki ne zastaja, na talne plošče in stene, dimenzioniranje in izvedba, 2012a.
- SIST DIN 18195-6:2012, Tesnjenje objektov – 6. del: Tesnjenje pred pritiskajočo zunanjo vodo in pronicajočo vodo, ki zastaja, dimenzioniranje in izvedba, 2012.
- SIST EN 1992-1-1: 2005, Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij– 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe, 2005.