

NUKLEARNA ELEKTRARNA KRŠKO, GRADNJA OBJEKTA BB2

NUCLEAR POWER PLANT KRŠKO, CONSTRUCTION OF BB2 BUILDING

Luka Bizjak, univ. dipl. inž. grad.

Luka.Bizjak@kolektor.com

Kolektor CPG, d. o. o.,

Industrijska cesta 2, 5000 Nova Gorica

Strokovni članek

UDK 621.311.2:629.7.036.8(497.4)

Povzetek | V prispevku je predstavljena gradnja posebej utrjene varnostne zgradbe 2 (Bunkered Building 2 – BB2) vključno z gradbeno jamo. Predstavljeni so tehnologije gradnje ter posebni postopki pri gradnji masivnega objekta.

Ključne besede: Nuklearna elektrarna Krško, gradnja masivnega objekta, bunkerska zgradba, diafragma, jedrska varnost

Summary | The article presents the erection of specially strengthened safety building 2 (Bunkered Building 2 – BB2) including the construction pit. Construction technologies and special procedures used for the construction of massive building are presented.

Key words: Nuclear power plant Krško, massive building construction, bunkered building, diaphragm wall, nuclear safety

1 • UVOD

Zagotavljanje jedrske varnosti je prednostna naloga Nuklearne elektrarne Krško (NEK). Na podlagi lastnih obratovalnih izkušenj, izkušenj iz industrije ter upravnih zahtev so v NEK oblikovali »Program nadgradnje varnosti« za dodatno posodobitev elektrarne in pripravo na njeno dolgoročno obratovanje. Program opredeljuje nabor projektov za nadgradnjo varnostnih sistemov, električnega varnostnega napajanja, nadzora radioaktivnih izpustov, poplavne

varnosti in hrambe izrabljenega goriva. Del programa je tudi posebej utrjena zgradba (Bunkered Building 2 – BB2), v kateri bodo nameščeni dodatni rezervoarji hladilne vode in dodatni varnostni sistemi za vbrizgavanje vode v reaktorski hladilni sistem oziroma za drževalni hram in v oba uparjalnika za primer nedelovanja obstoječih sistemov (NEK, 2012). Obstoječi objekti, pomembni za jedrsko varnost v NEK, so projektirani v skladu z ameri-

ško regulativo in pripadajočimi standardi. V skladu z zahtevami veljavne zakonodaje za graditev v Republiki Sloveniji se pri projektiranju novih objektov v NEK upoštevajo tudi standardi Evrokod. Na podlagi primerjave rezultatov analiz objekta BB2 po ameriški regulativi in slovenski zakonodaji so se pri projektiranju BB2 upoštevale strožje zahteve. Pri projektiranju so se v primerjavi s konvencionalno gradnjo in obstoječimi jedrskimi objekti v NEK upoštevale povečane projektne zahteve za naslednje zunanje vplive: močan potres, tornado, poplave, ekstremne podnebne razmere in padec letala.

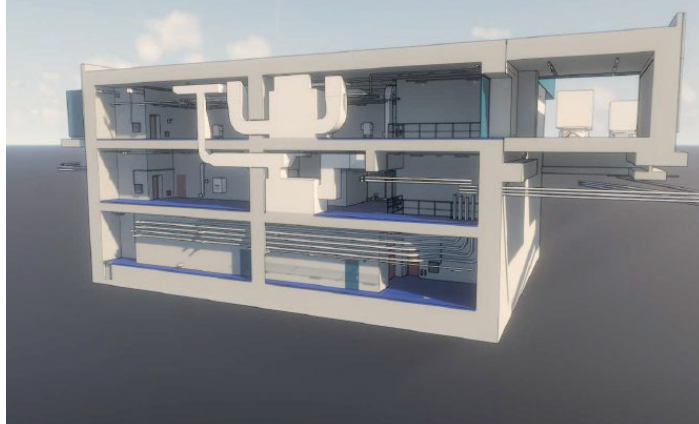
2 • OPIS OBJEKTA

Objekt BB2 je pravokotne tlorisne oblike zunanjih dimenzij 38,18 m × 32,24 m. Južni del objekta ima tri etaže, v katerih so prostori za tehnološko opremo. Severni del, predviden za vgradnjo rezervoarjev, je razdeljen na dva prostora in je izveden v eni etaži preko celotne višine objekta. Višina ravne strehe je na koti +6,15 m nad nivojem tretje etaže (pritličja). Dostope v objekt, ki

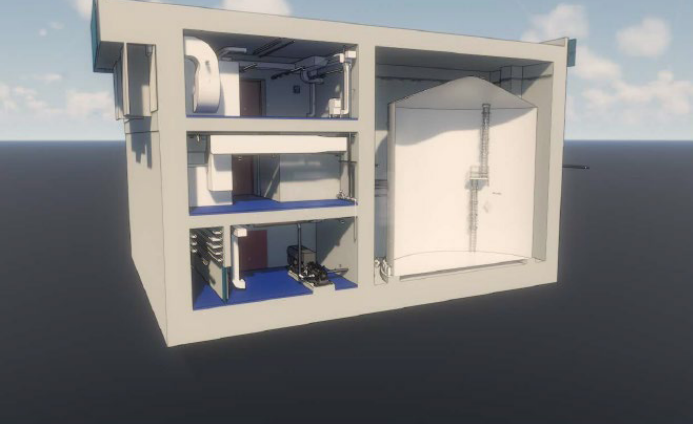
se nahajajo na vzhodni in zahodni fasadi zgradbe BB2, ščitita armiranobetonska labirinta. Zaradi zagotovitve ustrezne zaščite dostopov pred vplivi tornada in padcem velikega komercialnega letala so stene in streha labirintov iz armiranega betona debeline 1,30 m. Objekt BB2 je prikazan na sliki 1, tloris pritličja pa na sliki 2, kjer sta vidna tudi dostopna labirinta.

Konstruktivski sistem zgradbe tvorijo armiranobetonske stene, vpete v talno ploščo. Glavne nosilne stene objekta potekajo v oseh A, B in C v prečni smeri objekta (sever-jug) ter v oseh 1, 2 in 3 v vzdolžni smeri objekta (vzhod-zahod). Obodne stene objekta so debeline 1,50 m, preostali dve notranji steni pa debeline 1,30 m. Zunanje stene v prostorih rezervoarjev ABW in ACY, ki neprekinjeno potekajo po višini celotnega objekta, so dodatno mestoma ojačane z rebri dimenzij 1,30 m × 1,30 m. Ostale notranje stene v medetažah, katerih funk-

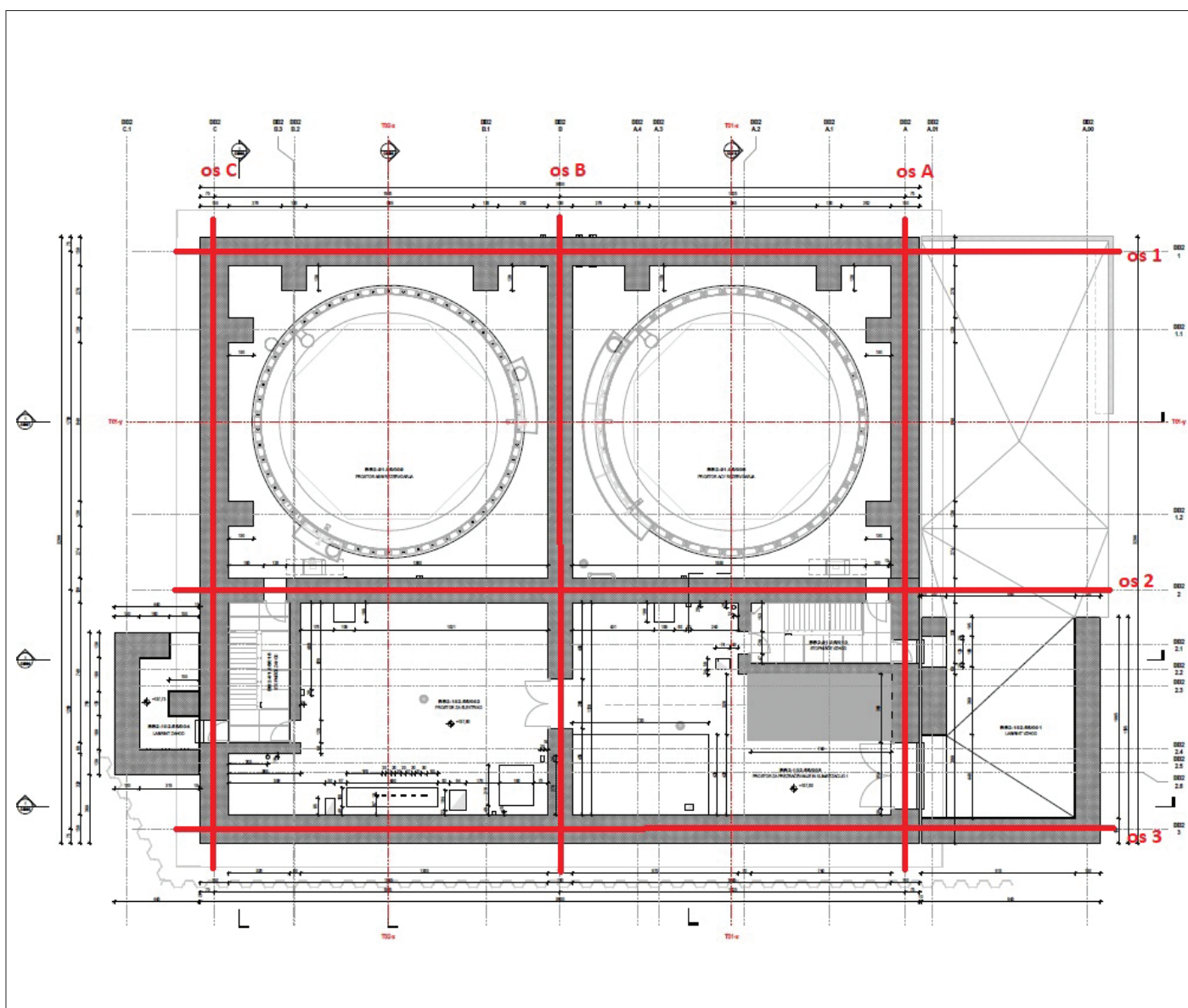
NOVA BB2 ZGRADBA V VZDOLŽNEM PREREZU



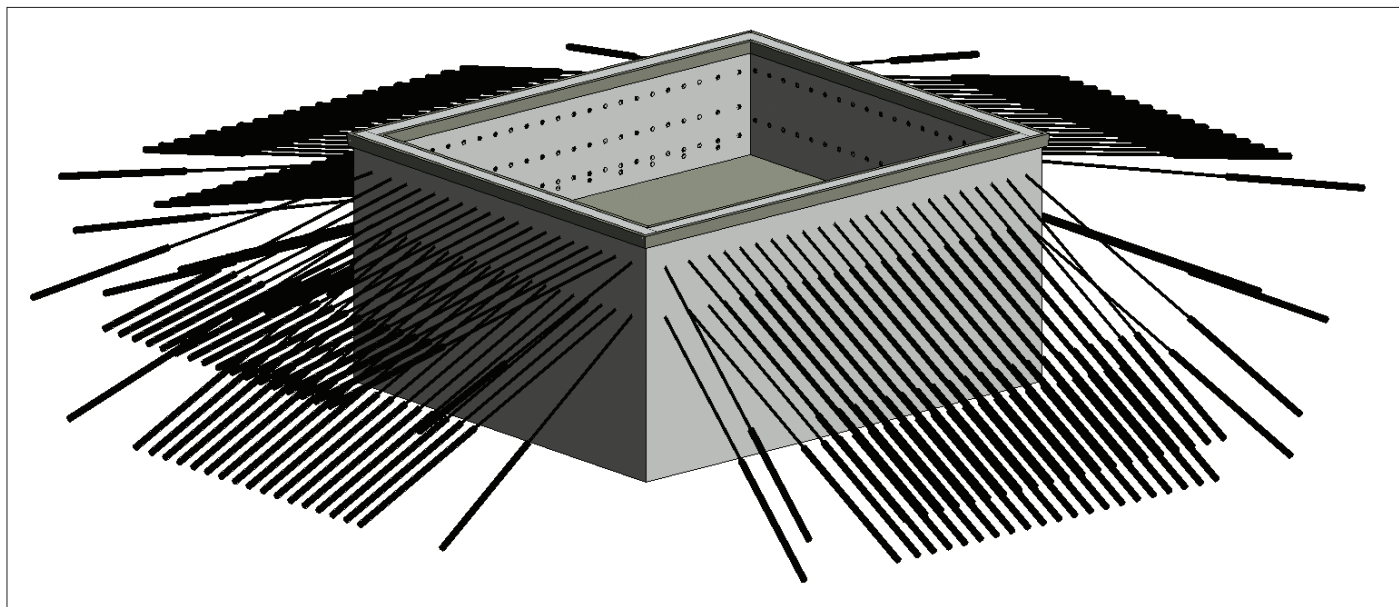
NOVA BB2 ZGRADBA V PREČNEM PREREZU



Slika 1 • Prečni in vzdolžni prerez objekta BB2 (IBE, 2018b).



Slika 2 • Tloris pritličja objekta BB2 na koti +0,0 m (IBE, 2018b).



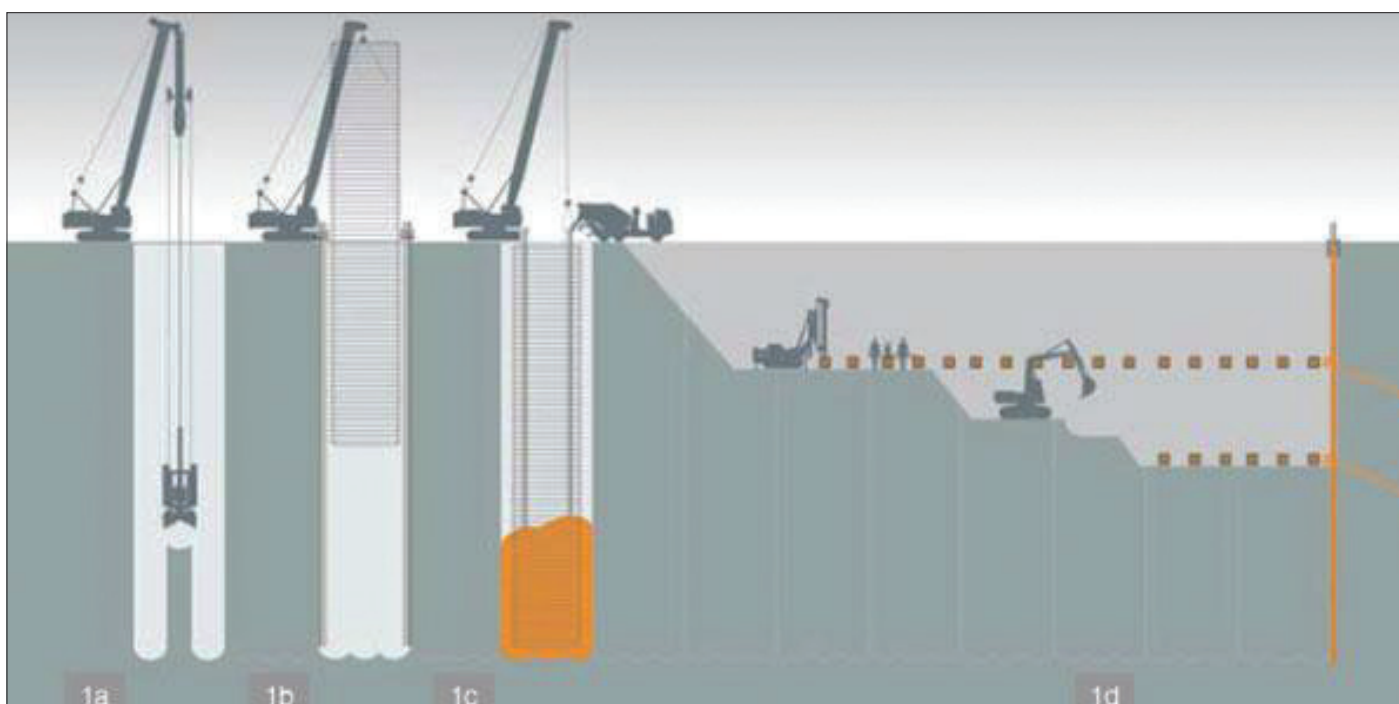
Slika 3 • Shematski 3D-prikaz gradbene jame (IBE, 2018a).

cija je požarna in funkcionalna pregrada med prostori, so debeline 40 oz. 60 cm. Medetažno konstrukcijo predstavljajo AB-plošče debeline 75 cm. Strešna AB-plošča je debeline 1,30 m. Zgradba je temeljena na skupni armiranobetonski plošči debeline 2,0 m na koti -13,65 m.

Gradnja objekta BB2 poteka v predhodno izvedeni gradbeni jami z vertikalnimi stranicami globine 9,3 m, izvedenimi kot diafragma v obliki neprepustne nosilne stene globine 20 m, ki je bila projektirana na potresno obremenitev zaradi zaščite okoliških objektov. Debelina diafragme znaša 1,2 m na Z, J in V strani ter

kar 1,4 m na severni strani gradbene jame. Stabilnost sten gradbene jame zagotavlja skupaj 202 poltrajnih prednapetih geotehničnih sider dolžine 28,0–31,0 m v dveh nivojih na Z, J in V strani ter v treh nivojih na S strani jame. Shematski 3D-prikaz gradbene jame je prikazan na sliki 3.

3 • IZVEDBA GRADBENE JAME



Slika 4 • Shematski prikaz faz izkopa gradbene jame (Kolektor CPG, 2018).

V prvi fazi izvedbe se je izdelalo vzdolž oboda gradbene jame 22 kampad diafragme dolžin 5,8-6,6 m. Izdelava diafragme je poseben postopek geotehničnih del, s katerim se izdelava stena pod nivojem terena. Dokončanju diafragme sledita postopen izkop in izdelava sider na posameznem nivoju, kot je prikazano na sliki 4. Pred nadaljevanjem izkopa z enega nivoja na naslednjega je bilo treba uspešno zaključiti izdelavo sider operativnega nivoja. Namen geotehničnih sider je bil poleg zmanjšanja momentov v steni diafragme s prenosom nateznih sil iz podporne konstrukcije v zaledno hribino tudi izpolnjevanje kriterija pomikov diafragme, okoliškega terena in objektov zaradi posledic potresne obtežbe v času med izkopom gradbene jame.

Pred izkopnimi deli je bil vzpostavljen geodetski monitoring okoliških objektov. Za spremlja-

vo in analizo dejanske nosilnosti diafragme je bilo vgrajenih 6 inklinometrov.

Gradbena dela pri izvedbi gradbene jame so trajala od avgusta 2018 do aprila 2019.

3.1 Diafragma

Gradnja se je začela po pridobitvi vseh potrebnih dovoljenj ter opravljenih predhodnih testiranjih materialov ter testnih sider. V okviru pripravljalnih del so se pripravili delovni platoji, vodilni kanali ter postavili gradbišni provizoriji. Najpomembnejša naloga je bila vzpostavitev delovne postaje za pripravo bentonitne izplake, ki so jo sestavljali silos za osnovni material, mešalnica, silosi za pripravljeno bentonitno mešanico, čistilna naprava, črpalke in razvodi.

Diafragma se je izdelovala z dvema hidravličnima dvigalom na gosenicah dvižne kapaci-

tete 90 ton in 50 ton. Izkop posamezne kampade diafragme je potekal s pomočjo grabeža na vitlu s sprotnim odvozom izkopanega materiala ter polnitvijo izkopa z bentonitno izplako (slika 5). Nivo bentonitne izplake v izkopu ni smel pasti nižje od enega m pod delovnim platojem, prav tako je moral biti nivo izplake vedno vsaj 1,5 m nad nivojem podtalnice. Med izkopom je bilo treba spremljati parametre bentonitne izplake (gostoto, viskoznost, filtracijo, vsebnost peščenih delcev, PH). Le pravilno pripravljena mešanica je lahko zagotavljala razpiranje brežin izkopa in preprečevala vsipanje materiala s sten.

Po končanem izkopu je bilo treba bentonitno izplako prečistiti finih kamnitih in zemeljskih frakcij iz izkopa. Izplaka se je črpala z dna jame v čistilno napravo ter prečiščeno vračala v izkop. Dokler izplaka ni dosegla zahtevanih parametrov, se betoniranje kampade ni smelo začeti. Pred vgradnjo betona se je v izkopano kampado vstavilo 2 ali 3 prefabricirane armaturne koše, ki so se izdelovali na zunanjem platoju. Vsak koš je vseboval tudi uvodnice za sidra. Koši so bili dolgi 19,5 m, teža posameznega je znašala 4,5–8,0 tone. Postopek izkopa in vgradnje koša je viden na sliki 5. V izkop se je vstavil še stranski opaž za potrebe vgradnje tesnilnega profila.

Betoniralo se je s posebej projektirano betonsko mešanico. Projektne zahteve za beton so bile C30/37, $D_{max} = 16$ mm. Poleg tega so bile tehnološke zahteve za vgradnjo betona: konsistenca S4-S5 (posed 180–230 mm), začetek vezanja 5 ur po dobavi na gradbišče, dosežena trdnost po 24 urah 6-10 MPa.

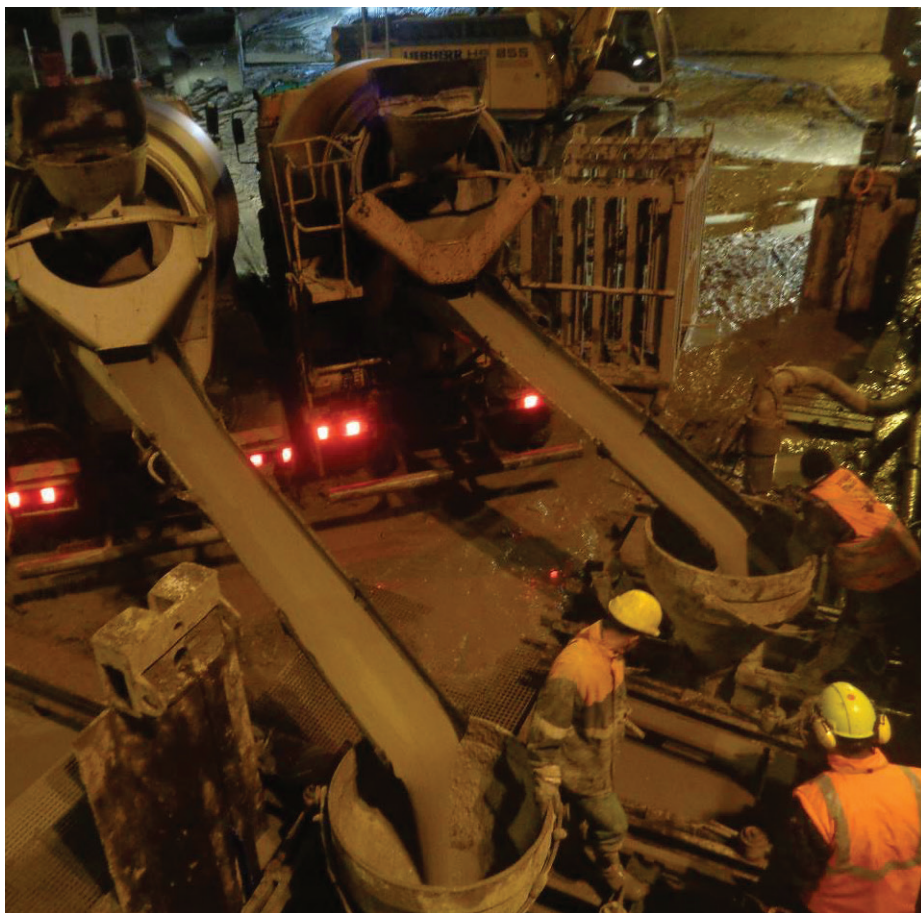
Vgradnja betona je potekala s pomočjo kontraktorjev za betoniranje z neposrednim vlivanjem iz avtomešalnika (slika 6). Sočasno je potekal izkop naslednje kampade s prečrpavanjem bentonitne izplake iz predhodne v novo. Vgradnja betona je morala potekati kontinuirano, brez zastojev. V posamezno kampado je bilo vgrajenih 160–208 m³ betona. V pripravljenosti je bila tudi rezervna betonarna.

3.2 Izkop in sidra

Izkop je potekal z ustrezno gradbeno mehanizacijo. Zahtevnost organizacije dela je naraščala z globino izkopane jame. V zgodnjih fazah se je konstruirala ustrezna rampa za neposreden izvoz materiala. Pri večjih globinah bi bil naklon rampe prevelik, zato je bilo treba material horizontalno predstavljati proti robu jame, kjer je potekal



Slika 5 • Izkop za diafragma in vgradnja armaturnega koša.



Slika 6 • Vgradnja betona v diafragmo.

vertikalni dvig. V zadnji fazi je bilo treba izkopani material dvigati iz jame, za kar se je uporabil žerjav z nagibno košaro kapacitete 6 m³. Projektna dokumentacija je predvidela izvedbo 202 prednapetih vrhnih geotehničnih sider na 4 različnih nivojih, zato je bilo treba pripraviti 4 delovne platoje za izvedbo sider. Izkop gradbene jame je prikazan na sliki 7.

Za uspešno izdelavo sidra je bilo treba slediti posebnemu protokolu. V betonu diafragme so bile vgrajene jeklene uvodnice, tako da je bilo treba za montažo sidra prevrtati le tanjši odsek skozi beton diafragme, nato pa je vrtnje potekalo z ustreznimi geotehničnimi stroji za vrtnje vrtin ob istočasni cevitvi vrtnice. Globina vrtnja je znašala do 31,0 m. V pripravljeno vrtno se je vstavilo prefabricirano sidro, koren sidra v dolžini 12 m se je zalil z injekcijsko maso. Naslednji dan se je koren sidra doinjektiral z vbrizgavanjem cementne mase pod visokim pritiskom. S tem sta se zagotovila spoj sidra z okoliško zemljino in posledično nosilnost sidra. Postopek doinjektiranja se je v naslednjih dneh ponovil po potrebi.

Pred začetkom napenjanja sidra je morala injekcijska masa doseči ustrezno trdnost, vsako sidro pa testno nosilnost 1320 kN. Testiranje je potekalo po predpisanem protokolu, ki je predvideval naraščanje in padanje vnesene sile v določenih časovnih intervalih s sprotim kontroliranjem dejanske sile in pomikov. Po uspešno opravljenem testu se je posamezno sidro lahko zaklinilo pri projektni nosilnosti 480 ali 700 kN. Izdelava posameznega sidra je trajala približno 10 dni.

Poseben izziv pri izkopu gradbene jame je bil zagotavljanje primerne delovne razmere, saj je bilo dno gradbene jame okoli 7 m pod nivojem podtalnice. Kljub vodoodporni konstrukciji diafragme je vrtnje izvrtine za vsako sidro povzročilo dodaten vdor vode. Pri sočasni izdelavi 2-3 sider je bil dotok vode v gradbeno jamo tudi več 10 l/s. Stalno črpanje vode je bilo potrebno do dokončanja izdelave vseh sider.

Dokončanje gradbene jame je predstavljala zamenjava zemljine dna gradbene jame z 80 cm debelo blazino nearmiranega betona razreda C16/20. Ustrezno utrjena tla in zaščita tal pred zunanjimi vplivi pred začetkom gradnje je namreč izjemnega pomena za temeljenje objekta.



Slika 7 • Izkop in vgradnja sider.

4 • IZVEDBA OBJEKTA BB2

Zaradi posebnih projektnih zahtev, ki jih narekuje jedrska varnost, je BB2 zasnovan kot masiven armiranobetonski objekt z izredno gosto armaturo. V konstrukcijo bo, ko bo gradnja končana, vgrajenih skupaj ca. 10.500 m³ betona trdnostnega razreda C30/37 in 2300 ton armature B500 C. Masivni prerezi betona zahtevajo

Za potrebe numeričnega modeliranja vgrajenega betona pri različnih temperaturnih scenarijih se je predhodno opravil poladiabatni poskus vseh betonskih mešanic, ki so bile predvidene za vgradnjo v masivne prereze konstrukcije. Kritični betonski prerez sta bila talna plošča debeline 2,0 m ter obodna stena debeline 1,5 m z ojačilnimi rebri 1,3 x 1,3 m.

je dno objekta pod nivojem podtalnice. Zaradi velikega pritiska talne vode je šlo pri tem objektu pravzaprav za kesonsko gradnjo. Poleg hidroizolacijskega ovoja in vodotesnega betona so se na vseh stikih vgrajevali tesnilni trakovi. Vsak preboj se je obravnaval individualno.

4.1 Talna plošča

Kot podlaga za polaganje hidroizolacijske membrane se je izdelal ustrezno zaglajen sloj podložnega betona v debelini 20 cm.



Slika 8 • Vgradnja betona v talno ploščo.

posebno obravnavo s stališča sproščanja hidratacijske toplote, saj prevelik temperaturni gradient povzroča razpoke, previsoka temperatura betona pa škodljivo vpliva na razvoj njegove trdnosti. Pri izvedbi je bilo treba zagotoviti, da najvišja temperatura betonskega prereza ni presegla 60 °C, največji temperaturni gradient pa ni bil večji od 25 °C/50 cm.

Pred izvedbo so bili izdelani načrti opažev in odrov. Največji izziv pa je bil polaganje armature, saj je ta izredno gosta in prepletena. Določeni prerezi so vsebovali celo 8 con armaturnega jekla, večina vgrajenih palic je bila premera 32 mm.

Posebna pozornost je bila posvečena tudi izvedbenim detajlom proti prodoru vode, saj

Nanj se je vgradil sloj hidroizolacijske membrane HDPE, ki se je zaradi nanesenega lepila popolno zlepila z betonom. S tem so se preprečili dostop vode za hidroizolacijsko membrano in nekontrolirana zamakanja v objekt ob morebitnem puščanju. Armatura se je položila na hidroizolacijo brez zaščitnega sloja. Uporabili so se linijski distančniki, da bi se preprečile poškodbe



Slika 9 • Gradnja sten etaže P.

hidroizolacije zaradi prevelike obremenitve armature.

Betoniranje plošče je potekalo v 4 fazah, v katerih se je vgradilo po 517–706 m³ betona. Zaradi prepletenosti vseh con armature je bilo treba položiti več kot 90 % vse armature, preden se je lahko začela vgradnja betona. Vgradili so se še sidrni vijaki za rezervoarje, sistem talnega odvodnjavanja ter sidra za opaže. Vgrajevanje betona je potekalo kontinuirano brez zastojev, ki bi lahko povzročili delovne stike v betonu. Na sliki 8 je prikazano vgrajevanje betona v talno ploščo.

4.2 Stene

Južni del objekta BB2 ima 3 etaže višine 5,75 m. Tehnološko je bila najzahtevnejša izdelava obodne stene, saj je bil v etaži K2 uporabljen enostranski opaž, v etaži K1 kombiniran enostransko-dvostranski ter v

etaži P dvostranski opaž. Shema opažev je prikazana na sliki 10. V prostorih s cisternami je bil zaradi odprtega prostora uporabljen tudi obešen oder za opaž v etaži K1 in P. Ker so se dela opravljala tudi 16,5 m nad tlemi, je bila posebna pozornost posvečena varnemu delu. Slika 9 prikazuje gradnjo sten etaže P.

Izvedbo je dodatno oteževala vgradnja sidrnih plošč za opremo ter opaža lukenj za preboje, saj gre za tehnološki objekt, v katerem bo vgrajeno veliko strojne in elektroopreme.

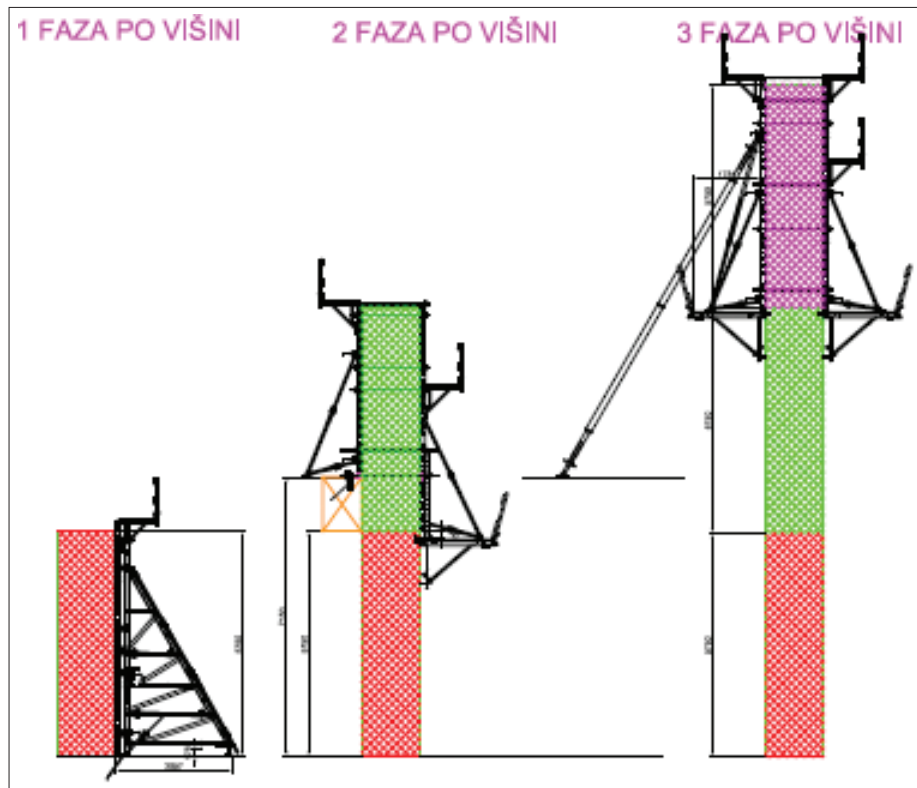
4.3 Strešna plošča

Zaradi zelo zahtevne izdelave dveh rezervoarjev iz nerjavnega jekla kapacitete 1500 m³ se bo pristopilo k izdelavi strešne plošče šele po njihovem dokončanju. Ker bo pristop potem zelo omejen, se bodo namesto klasičnega lesenega podprtega opaža za armiranobetonsko strešno konstrukcijo

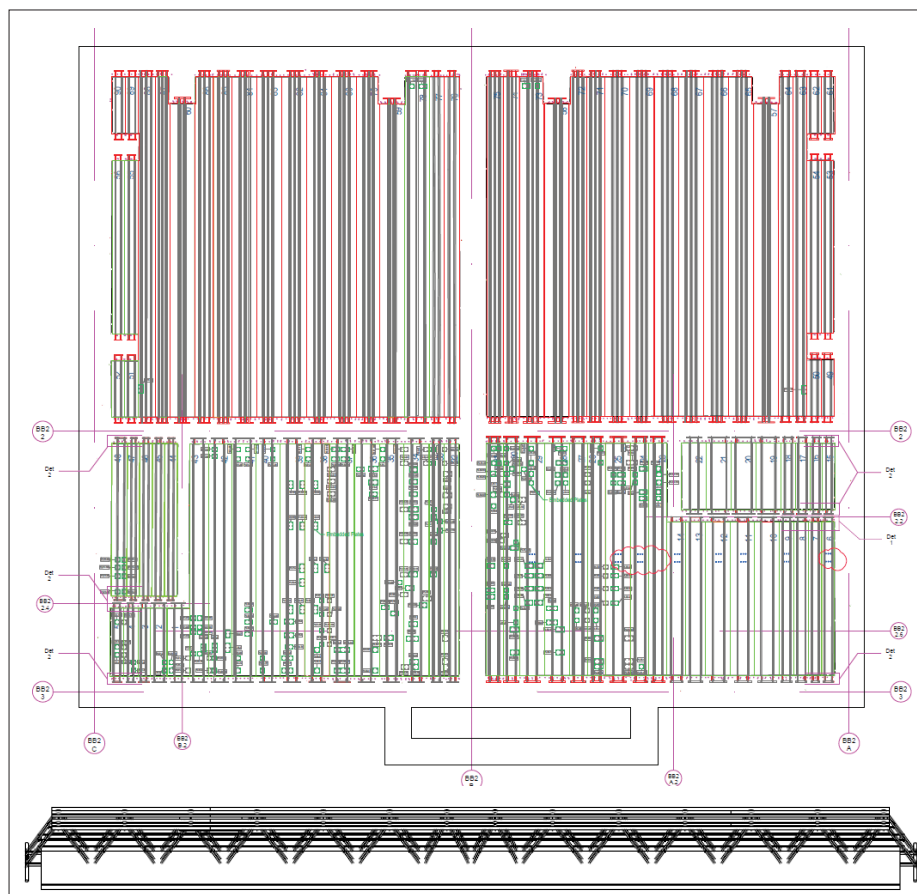
izdelali prefabricirani nosilci. V osnovi bodo to palični nosilci, zvarjeni iz okroglih profilov. Betonska plošča debeline 15 cm na spodnji strani nosilca prevzema zgolj funkcijo opaža za betoniranje stropne konstrukcije. Skupaj bo izdelanih 90 nosilcev razpona 17,14–3,36 m in širine 1,2–0,6 m. Na sliki 11 sta shema postavitve nosilcev in prikaz posameznega.

V fazi priprave delavniških načrtov se je izdelal geodetski posnetek izvedenega stanja na objektu v gradnji, vključno z vsako priključno armaturno palico, v izognitev kasnejšim kolizijam. Nosilci so v času pisanja tega članka v izdelavi.

Po montaži nosilcev bosta sledila vgradnja armature ter betoniranje plošče. Pripravljen bo poseben postopek betoniranja, ki bo upošteval elastične povese nosilcev med betoniranjem.



Slika 10 • Shema opaža obodnih sten po fazah (Kolektor CPG, 2019).



Slika 11 • Shema postavitve prefabriciranih nosilcev in predstavitev posameznega nosilca.

5 • ZAKLJUČEK

Gradnja objekta BB2 je v mnogo pogledih edinstvena. Izdelava diafragme je sama po sebi tehnološko in organizacijsko najzahtevnejša vrsta geotehničnih del. Izkop in vgradnja sider pod nivojem podtalnice

sta bila tvegana in nevarna. Komplicirana armatura, zahtevne betonaže, delo na višini pa posebni vsakodnevni izzivi pri gradnji. Zaradi tehnoloških zahtev so se dela opravljala v vseh vremenskih razmerah in delih

dneva. Organizacija dela je zahtevnejša, ker gradnja poteka znotraj varovanega območja NEK. Zahteve po doseganju kvalitete in varstva pri delu pa so na najvišjem nivoju. Gre za objekt, ki zaradi svoje velikosti in zahtevnosti predstavlja privilegij za vsakega udeleženca, ki je imel priložnost sodelovati pri gradnji.

6 • LITERATURA

IBE, d.d., Projektna dokumentacija NEKBB2-B056/277 (PGD, PZI), Varnostna nadgradnja NEK – Projekt BB2/gradbena jama, 2018a.
IBE, d.d., Projektna dokumentacija NEKBB2-B056/277-1 (PGD, PZI), Varnostna nadgradnja NEK – Projekt BB2/zgradba BB2, 2018b.
Kolektor CPG, d.o.o., Instalacijski paket Diaphragm wall & excavation 36 – 2018-08-22 – DN 18123 – IP2 – rev.2, Kolektor CPG, 2018.
Kolektor CPG, d.o.o., Instalacijski paket Concrete wall and slabs 36 – 2019-05-20 – DN 19022 – IP4 – rev.1, Kolektor CPG, 2019.
NEK, Program nadgradnje varnosti NEK – PNV (The Krško NPP Safety Upgrade Program - SUP), DCMRP-083, NEK, 2012.