



ANALIZA POŠKODB NA OSREDNJI KUPOLI CERKVE SV. ŠTEFANA V POSTOJNI

doc. dr. Bojan. Čas, Anton Štampfl, Jože. Kos
Gradbeni inštitut ZRMK d.o.o.

Povzetek

V članku predstavimo računalniško podprto projektiranje sanacij cerkvenih objektov. Detajlno nas zanima predvsem primernost komercialnih računalniških programov pri oceni vzrokov za nastanek poškodb na tovrstnih objektih. Na primeru projekta sanacije osrednje kupole cerkve sv. Štefana v Postojni smo pokazali, da lahko z uporabo primerne inženirske presoje ter komercialnih računalniških programov relativno dobro ocenimo vzroke za nastanek poškodb, seveda ob ustreznih predhodnih preiskavah materiala in konstrukcij.

Ključne besede: objekti kulturne dediščine, lupinaste konstrukcije, metoda končnih elementov, rekonstrukcije

A study of damages to the main dome in St. Stephen's church in Postojna

Summary

Investigations and a structural analysis of the main dome in St. Stephen's church in Postojna, Slovenia is presented. The main church dome is a structural masterpiece since a slender shell structure is resting on eight stone arches that are supported by four massive stone columns. The dome is rich decorated but unfortunately through the history several crack patterns have developed over the lower painted surface of the structure. The structural analysis was performed with computer software, where the dome was modelled by fine mesh of elastic shell elements. The presented article clearly shows that also use of commercial computer software for structural analysis in combination with sound engineering judgement suffices to discover the load condition and cause of the dome's crack pattern initiation and propagation. Furthermore our analysis findings helped us to determine basic repair works to prevent further damage.

Key words: cultural heritage buildings, shell structures, FE analysis, repair and strengthening

1. UVOD

Številni sakralni objekti predstavljajo pomemben delež naše arhitekturne ter kulturno zgodovinske dediščine. Kot ostali zgodovinski ter spomeniško zaščiteni objekti so tudi sakralni objekti zaradi dotrajanosti in pogosto neustrezne gradnje izpostavljeni delovanju potresne obtežbe, diferenčnemu posedanju temeljnih tal, zamakanju tekočih voda oziroma kapilarnemu dvigu vlage, neredko pa tudi poškodbam zaradi

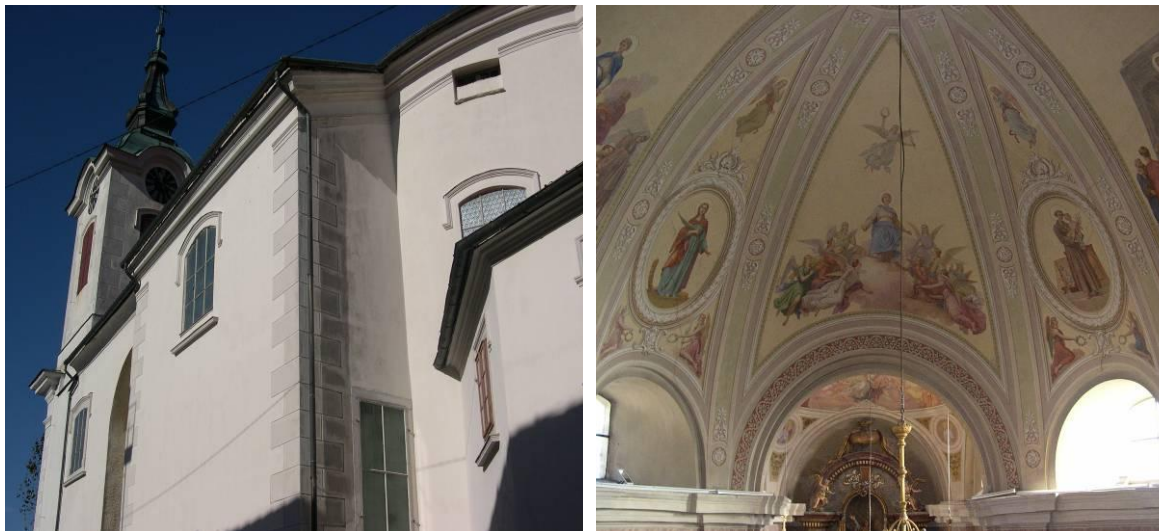
vpliva lastne teže konstrukcij. Posledica tega so poškodbe konstrukcijskih elementov, ki so pogosto bogato poslikani ter okrašeni. Da bi pravilno in učinkovito izvedli sanacijska (ojačitvena) dela, so potrebne podrobne analize vzrokov poškodb objektov [2,5,6]. Tako moramo v sklopu celovitega načrtovanja sanacije sakralnih objektov, pa ne le teh, preprečiti predvsem nadaljnje širjenje poškodb. S tem namenom izdelamo v projektu sanacije objektov obsežne preliminarne preiskave konstrukcij, vzpostavimo sistem monitoringa, dandanes pa je praktično nujno opraviti tudi računsko analizo nosilnih konstrukcij. Pri tem pa ne moremo zanemariti, da je sodobna računalniško podprta analiza nosilnih konstrukcij bistveno cenejša ter časovno učinkovitejša, kot so detajlne preiskave konstrukcij ter vzpostavljanje in delovanje sistema monitoringa. Predvsem zaradi navedenih dejstev pridobiva računalniško podprta analiza konstrukcij v sklopu celovitih sanacijskih postopkov vedno večjo veljavo. Kot šolski primer uspešnega projekta sanacije navajamo računsko analizo nosilne konstrukcije oboka glavne ladje cerkve sv. Nikolaja v Ljubljani [2].

V članku predstavimo računalniško podprto projektiranje sanacij cerkvenih objektov. Zanima nas predvsem primernost komercialnih računalniških programov pri oceni vzrokov za nastanek poškodb na osrednji kupoli cerkve sv. Štefana v Postojni, ki je bila zgrajena v letu 1777.

Glede na zastavljen cilj ima članek poleg uvoda še pet kratkih poglavij. V drugem opišemo glavne značilnosti kupole cerkve sv. Štefana. Preliminarne raziskave, ki so potrebne za uspešno računsko analizo, predstavimo v tretjem poglavju. Računski model predstavimo v četrtem poglavju, rezultate analize pa v petem. Na koncu podajamo zaključke.

2. OPIS KONSTRUKCIJE OSREDNJE CERKVE NE KUPOLE

Osrednja cerkvena kupola cerkve sv. Štefana v Postojni predstavlja svojevrstno konstrukcijsko mojstrovino časa v katerem je bila zgrajena, saj premošča pravokotna razpona 11.0 m ter 14.0 m. Pri tem se vrh oziroma teme kupole dviga 6.30 m nad nivo masivnih podpornih slopov. Tanka lupinasta konstrukcija je podprta s sistemom osmih kamnitih obokov, ki se v stičiščih opirajo na štiri masivne podporne slope. Zaradi gladko obdelane spodnje površine kupole in grobo obdelane zgornje se debelina kupole po višini spreminja. Povprečna debelina kupole je okoli 70 cm. Glede na obliko kupole predstavlja njen matematični model prostorsko ploskev, ki jo dobimo z rotacijo parabole po elipsastem obodu. Takšno prostorsko ploskev imenujemo stlačeni paraboloid.



Slika 1: Fasada cerkve sv. Štefana ter bogato okrašena osrednja cerkvena kupola

Osrednja cerkvena kupola je bogato okrašena, žal pa so se v preteklosti na njeni spodnji površini pojavile številne razpoke. V laični javnosti je bilo prisotno tudi mnenje, da so obširne poškodbe posledica močne eksplozije, ki je med 2. svetovno vojno odjeknila v neposredni bližini objekta. Najširše ter najdaljše razpoke smo opazili v delu kupole nad vsemi štirimi masivnimi podpornimi slopi. Nekaj precej širokih razpok pa smo opazili v meridialni in ekvatorialni smeri nad vsemi kamnitimi oboki. V zadnjih desetletjih so poškodbe kupole opazno napredovale, saj so na nekaterih mestih že širše kot 10 mm. Zaradi tega se je nosilnost osrednje cerkvene kupole bistveno zmanjšala in verjetno že močno ogroža varnost ljudi.



Slika 2: Široke razpoke v delu kupole nad masivnimi podpornimi slopi

3. PRELIMINARNE PREISKAVE KONSTRUKCIJE

Preliminarne preiskave cerkve sv. Štefana smo izvedli z namenom: (i) pridobiti podatke o uporabljenih gradbenih materialih ter (ii) oceniti vzroke za nastanek razpok. Pridobljene ugotovitve bomo v nadaljevanju uporabili pri izdelavi projekta celostne sanacije cerkve. Terenske in laboratorijske preiskave so obsegale preiskave o obliki temeljenja objekta, o nosilnosti sten in slopov ter o poškodovanosti osrednje cerkvene kupole. V sklopu terenskih preiskav smo v omenjenih konstrukcijskih elementih izvedli večje število globinskih sond.

Pri preiskavi načina temeljenja objekta smo ugotovili, da so temeljni zidovi kamniti zidani z uporabo apnene malte slabše kvalitete. Kljub dejstvu, da je sestava temeljnih tal precej heterogena, je večina temeljev objekta zgrajena v flišnatem terenu, ki z globino prehaja v lapor in peščenjak. Opazili smo, da so temeljna tla lokalno izprana, kar je verjetno posledica poškodovanega sistema—meteorne kanalizacije.

Vizualni pregled vzorcev iz zidnih sond je pokazal, da je nosilno zidovje kamnito, kjer so v spodnjih delih zidu praviloma vgrajeni večji kamniti bloki, z višino pa se velikost le teh manjša. Za zidanje je uporabljena apnena malta. Z odvzemom in laboratorijsko gravimetrično analizo vzorcev materiala smo ugotovili, da je stopnja vlažnosti vgrajenih materialov notranjih in zunanjih zidov nizka.

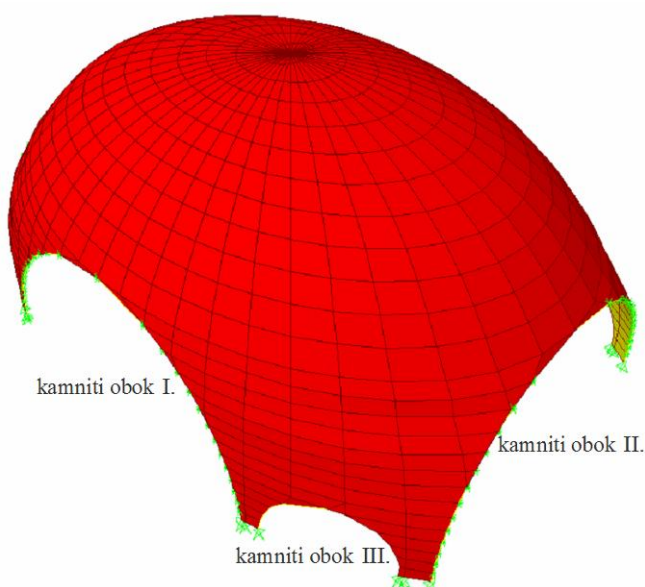
Preiskava osrednje cerkvene kupole je pokazala, da je grajena iz delno oblikovanih kosov lehnjaka in sicer tako, da so spojnice med posameznimi kamnitimi kosi polno

zapolnjene. Vezivo je tudi tu apnena malta. Lastna teža cerkvene kupole je zaradi uporabe lehnjaka, ki ima v primerjavi z ostalim kamnitim materialom relativno majhno specifično težo, na spretnen način ter pomembno zmanjšana. Debelino osrednje cerkvene kupole smo izmerili ob odprtini v njenem temenu ter s prevrtanjem v območju nad podpornim kamnitim slopom. Ker zgornja površina kupole ni obdelana smo privzeli, da je povprečna debelina osrednje cerkvene kupole okoli 70 cm. Pri pregledu lesenega ostrešja smo ugotovili, da se del ostrešja preko lesenega podpornega stebra opira na teme osrednje cerkvene kupole, kar je dokaj nenavadno.

4. RAČUNSKI MODEL IN ANALIZA

3.1 Splošno

Računsko analizo osrednje cerkvene kupole smo izvedli z računalniškim programom za analizo konstrukcij SAP 2000 NL [1], ki temelji na uporabi metode končnih elementov. V analizi smo uporabili materialno in geometrijsko linearen računski model. Osrednjo cerkveno kupolo smo modelirali z 928 ploskovnimi končnimi elementi, osem podpornih kamnitih obokov pa z 156 linijskimi elementi. Elementi so bili med seboj togo povezani v 973 vozliščih. Slika 3 prikazuje 3D računski model osrednje cerkvene kupole z linijskim modelom podpornih kamnitih obokov.



Slika 3: Računski model osrednje cerkvene kupole - mreža ploskovnih in linijskih končnih elementov

3.2 Materiali model in obtežba kupole

V izračunih smo privzeli specifično težo kamnitega materiala kupole $\square = 13 \text{ kN/m}^3$ ter specifično težo kamnitih obokov $\square = 19 \text{ kN/m}^3$. Glede na ugotovitve pri pregledu

cerkvenega ostrešja ter smernice standarda EuroCode 1 [3] o velikosti lastne teže materialov ter o obtežbi snega, so velikosti točkovnih sil, ki delujejo na temenu osrednje kupole, $P_g = 24$ kN (stalna obtežba in lastna teža ostrešja) in $P_s = 28$ kN (obtežba snega). Pri analizi vpliva diferenčnega posedanja temeljnih tal na deformacijsko in napetostno stanje osrednje cerkvene kupole smo, po posvetu z geomehanikom, enemu izmed štirih podpornih kamnitih slopov predpisali 5 mm navpični premik.

Skladno s strokovno literaturo, opravljenimi terenskimi preiskavami ter z upoštevanjem ugotovitev preteklih preiskav podobnih konstrukcij v laboratorijih ZRMK-ja, smo za računsko analizo osrednje cerkvene kupole upoštevali naslednje mehanske:

- $f_t = 100$ kN/m² (natezna trdnost),
- $f_c = 1\,500$ kN/m² (tlačna trdnost),
- $E = 1\,000\,000$ kN/m² (elastični modul),
- $G = 100\,000$ kN/m² (strižni modul).

Navedeni natezna ter tlačna trdnost materiala kupole predstavljata, skladno z EuroCode 1 [3], t.i. karakteristični vrednosti oziroma trdnosti. Računske vrednosti natezne ter tlačne trdnosti smo izračunali z redukcijo karakterističnih vrednosti z materialnim varnostnim faktorjem. Tega smo ocenili po priporočilih standarda EuroCode 6 [4] in znaša $\gamma_M = 2.0$.

3.2 Obtežni primeri

Kot smo že poudarili je bil namen opravljenih računskih analiz ugotoviti predvsem vzroke za nastanek poškodb. S tem namenom smo analizirali napetostno in deformacijsko stanje kupole z naslednjimi obtežbami: (i) lastna teža, (ii) točkovne sile na temenu osrednje cerkvene kupole, (iii) diferenčno posedanje temeljnih tal ter (iv) različne kombinacije vseh omenjenih obtežb. Deformacijsko in napetostno stanje osrednje cerkvene kupole smo analizirali skladno z EuroCode 1 [3]. Tako smo upoštevali naslednje obtežne kombinacije:

- obtežni primer 'A' – lastna teža konstrukcije,
- obtežni primer 'B' – lastna teža konstrukcije, točkovna obtežba ostrešja (stalna obtežba ter obtežba snega) ,
- obtežni primer 'C' - lastna teža konstrukcije, točkovna obtežba ostrešja (stalna obtežba ter obtežba snega) in diferenčni posedek temeljnih tal.

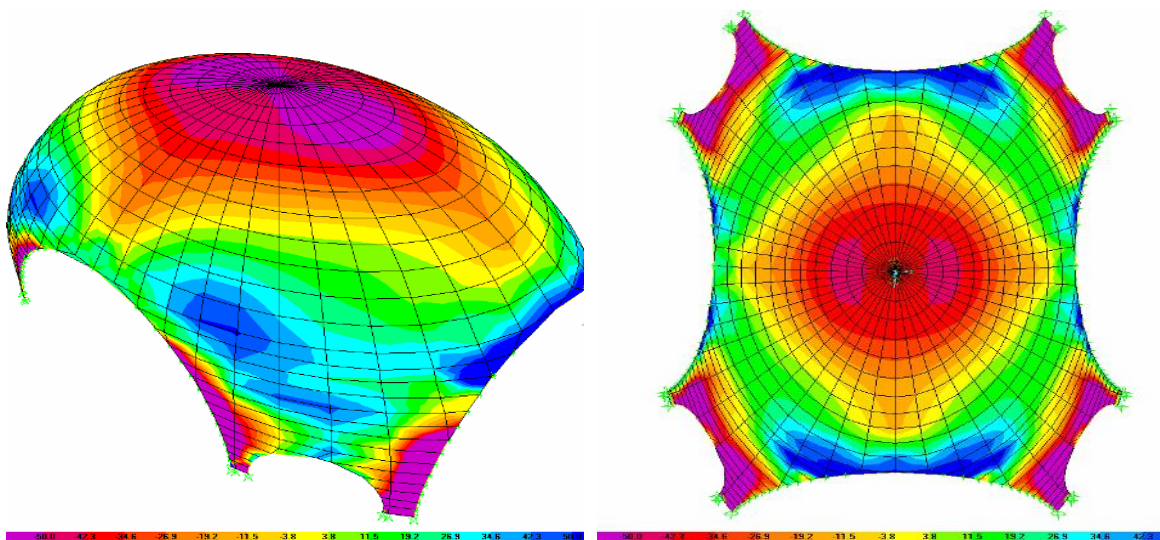
5. ANALIZA REZULTATOV

Z računsko analizo konstrukcije v programskem okolju SAP 2000 NL [1] na enostaven način določimo območja prekoračenih tlačnih oziroma nateznih trdnosti

materiala. Na osnovi tega lahko v nadaljevanju ocenimo vzroke za nastanek razpok ter načrtujemo tehnološke postope za sancijo nosilne konstrukcije.

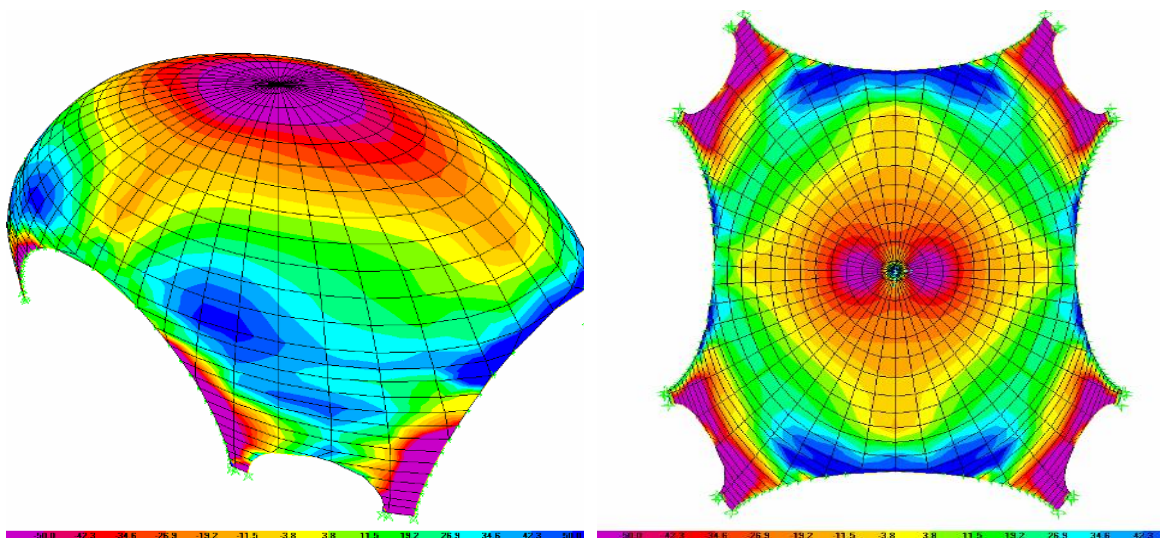
Glede na ocejeno natezno trdnost materiala (delno oblikovani kosi lehnjaka v apneni malti) kupole f_t ter skladno s privzetim faktorjem varnosti materiala \square_M ocenimo, da se razpoke pojavijo na delih kupole, kjer natezna napetost preseže 50 kN/m^2 . Ker smo v analizi uporabili elastični materialni model, se lahko tolikšne obremenitve pojavijo le v nerazpokanih prerezih. Ker kupola takšnih obremenitev ni sposobna prenesti, se v kupoli pojavijo razpoke, v konstrukciji pa se vzpostavi novo ravnovesno stanje. Zavedati se je potrebno, da takšen pristop podaja le grobo oceno območja nastanka razpok v konstrukciji, in da bi za natančnejšo oceno območja nastanka ter širjenja razpok morali uporabiti geometrijsko in materialno nelinearno analizo konstrukcije ter izsledke mehanike loma.

Na slikah 4, 5 ter 6 prikazujemo potek maksimalnih normalnih napetosti po konstrukciji osrednje cerkvene kupole za obtežne primere 'A', 'B' ter 'C'. Z namenom prikazati območja računske prekoračitve nateznih napetosti na zgornji ter spodnji površini kupole prikazujemo 3D pogled ter pogled na kupolo z njene spodnje strani.



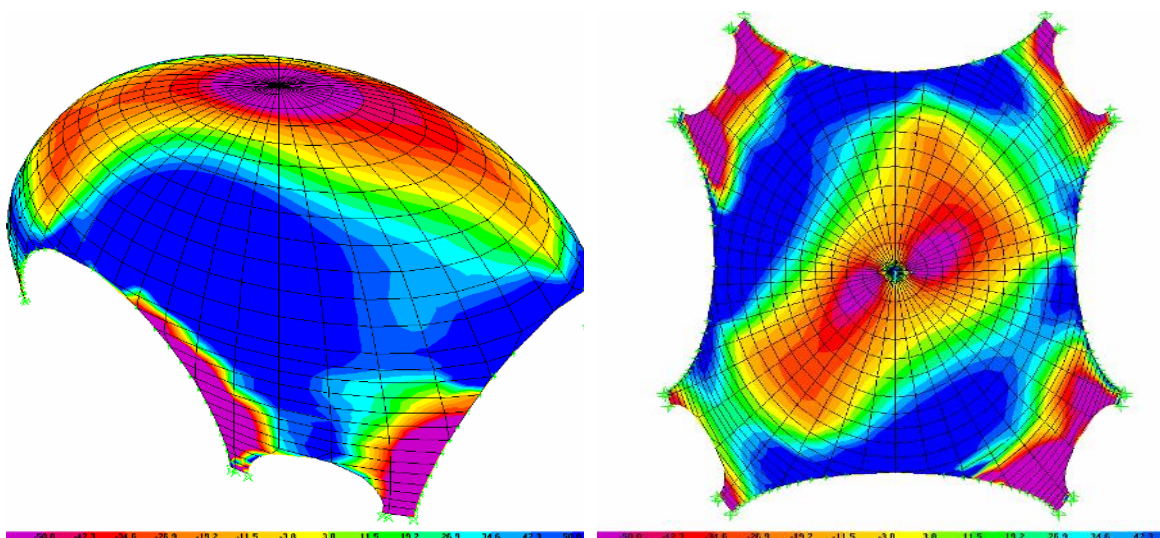
Slika 4: Obtežni primer 'A' – potek maksimalnih normalnih napetosti \square_{max} (levo – 3D pogled, desno – pogled na spodnjo stran kupole)

Na sliki 4 prikazujemo potek maksimalnih normalnih napetosti za primer obtežbe kupole le z njeno lastno težo. Natezna trdnost materiala je računsko prekoračena na vseh območjih, ki so obarvana temno modre barve. Tako sklepamo, da so razpoke, ki smo jih med pregledom cerkvene kupole opazili nad podpornimi kamnitimi oboki, nastale kmalu po izgradnji osrednje kupole kot posledica vpliva lastne teže konstrukcije.



Slika 5: Obtežni primer 'B' – potek maksimalnih normalnih napetosti σ_{max} (levo – 3D pogled, desno – pogled na spodnjo stran kupole)

Kot prikazuje slika 5 se deformacijsko in napetostno stanje v konstrukciji osrednje cerkvene kupole zaradi dodatne točkovne obtežbe ostrešja, ki deluje na temenu kupole, ne spremeni bistveno. S primerjavo slik 4 ter 5 ugotovimo, da so območja s prekoračeno natezno trdnostjo materiala praktično identična. Manjša odstopanja opazimo le pri razporeditvi tlačnih napetosti v neposredni bližini temena kupole. Tlačne napetosti so pričakovano povečane le lokalno zaradi vpliva točkovne obtežbe.



Slika 6: Obtežni primer 'C' – potek maksimalnih normalnih napetosti σ_{max} (levo – 3D pogled, desno – pogled na spodnjo stran kupole)

Precejšnje povečanje območij s prekoračeno natezno trdnostjo materiala kupole je opaziti na sliki 6, kjer predstavljamo potek maksimalnih normalnih napetosti za obtežni primer 'C', torej, ko ob lastni teži kupole ter točkovni obtežbi ostrešja upoštevamo še diferenčno posedanje temeljnih tal. Računska natezna trdnost materiala je ob vseh treh karakterističnih kamnitih obokih prekoračena tako na spodnji kot tudi na zgornji površini kupole. Glede na potek maksimalnih natezних napetosti prikazanih na slikah 4 ter 5 lahko pojasnimo nastanek razpok nad podpornimi kamnitimi oboki. S pomočjo slike 6 pa je možno razložiti tudi pojav širokih ter dolgih razpok v konstrukciji osrednje cerkvene kupole, ki potekajo od podpornih kamnitih slopov proti temenu kupole (glej sliko 2).

Dodajmo tudi, da skladno z rezultati prikazanimi na slikah 4, 5 ter 6 nismo zasledili prekoračitve računske tlačne trdnosti materiala v osrednji cerkveni kupoli.

6. ZAKLJUČEK

V članku smo predstavili računalniško podprto projektiranje sanacij cerkvenih objektov. S komercialnim računalniškim programom smo ocenili vzroke za nastanek poškodb na osrednji kupoli cerkve sv. Štefana v Postojni. Ugotovili smo, da lahko z uporabo komercialnih računalniških programov ter s primerno inženirsko presojo relativno dobro ocenimo vzroke za nastanek poškodb, seveda ob ustreznih predhodnih preiskavah materiala in konstrukcij.

Analiza rezultatov je pokazala, da so določene razpoke v osrednji cerkveni kupoli najverjetneje nastale že kmalu po izgradnji zaradi vpliva lastne teže konstrukcije. Povečevanje obsega razpok ter nastanek novih širokih razpok nad vsemi štirimi podpornimi slopi pa sta najverjetneje posledica diferenčnega posedanja temeljnih tal.

V nadaljevanju našega dela smo izdelali projekt celovite sanacije cerkve sv. Štefana v Postojni, kjer smo poleg injektiranja razpok v osrednji kupoli predvideli tudi ojačevanje ter popravilo preostalih konstrukcijskih elementov. Kot prikazujemo na sliki 7, smo posebno pozornost namenili sanaciji temeljenja objekta, v sklopu katere smo izvedli injektiranje in dobetoniranje temeljnih zidov ter prenovo sistema meteorne kanalizacije.



Slika 7: Sanacija temeljenja objekta (injektiranje ter dobetoniranje temeljev, prenova sistema metorne kanalizacije)

7. LITERATURA

- [1] Computers & Structures Inc., SAP 2000 NL: Structural Analysis Programs - Theoretical and users manual, Version No. 8.7.9. Berkeley, California, 2003
- [2] Elaborat o opravljenem pregledu nosilne konstrukcije oboka glavne ladje cerkve sv. Nikolaja v Ljubljani s statično in protipotresno analizo konstrukcije s smernicami za izvedbo najnujnejših ojačitvenih posegov, Gradbeni inštitut ZRMK d.o.o., 2004
- [3] Eurocode 1: Basis of design and actions on structures – Part 1: Basis of design, 1998
- [4] Eurocode 6: Projektiranje zidanih konstrukcij – 1-1.del: Splošna pravila za stavbe – Pravila za armirano in nearmirano zidovje, 2004
- [5] Lancellotta, R., Pistone, G., A study of damages to the Parish church in Farigliano. In C.A. Brebbia & R.J.B. Frewer (eds), Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings III: 589-596. Southampton: Computational Mechanics Publications, 1993
- [6] Zurli, F., Viola, R.M., Damage and Repair of the St. Charles Basilica in Rome. IABSE Symposium Rome 1993, Structural Preservation of the Arhitectual Heritage, volume 70: 417-423. Zurich: IABSE-AIPC-IVBH, 1993