



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Tatjana Cigula

DIPLOMSKI RAD

PRORAČUN ALUMINIJSKE KUPOLE ZA MEDITACIJU

Zagreb, 2023.

Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet - Zagreb

DIPLOMSKI RAD

**PRORAČUN ALUMINIJSKE KUPOLE
ZA MEDITACIJU**

Tatjana Cigula

Kolegij: Metalne konstrukcije 3

Mentor: prof.dr.sc. Davor Skejić

Zagreb, 2023.



Zahvale

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Davoru Skejiću na pomoći, pristojnosti, strpljenju i razumijevanju kao i odličnom vodstvu tijekom izrade rada, koji mi je uvelike olakšao te učinio pisanje rada ugodnim iskustvom.

Također zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima na bezuvjetnoj ljubavi i podršci.



TEMA DIPLOMSKOG RADA

Ime i prezime studenta: **Tatjana Cigula**

JMBAG: **0082058699**

Diplomski rad iz predmeta: **Metalne konstrukcije 3**

Naslov teme
diplomskog rada:

HR	Proračun aluminijske kupole za meditaciju
ENG	Design of aluminium dome for meditation

Opis teme diplomskog rada:

Potrebno je izraditi projekt aluminijske kupole za meditaciju u Fužinama. Promjer kružne baze je 18 m, a visina luka kupole iznosi 9 m. Uz vlastitu težinu konstrukcije i stakleni pokrov, promjenjiva djelovanja potrebno je uzeti u skladu s lokacijom i namjenom građevine. Za glavne konstrukcijske elemente predvidjeti ekstrudirane cijevne profile u kvaliteti aluminijske legure EN AW 6082. Potrebno je analizirati zavarenu i vijčanu izvedbu.

Diplomski rad mora sadržavati dispozicijsko rješenje, te analizu i dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata i priključaka prema HRN EN. Osim navedenog potrebno je izraditi izvedbene nacрте s glavnim detaljima priključaka nosive aluminijske konstrukcije. Temelji nisu predmet ovog diplomskog rada.

Datum: **14.04.2023.**

Komentor:

-

(Ime i prezime komentora)

Mentor:

prof. dr. sc. Davor Skejić

(Ime i prezime mentora)

(Potpis mentora)



Sažetak

U okviru diplomskog rada izrađen je projekt aluminijske kupole s promjerom baze od 18 metara i visinom od 9 metara. Kupola je smještena u Fužinama, a služi za meditaciju te je stoga natkrivena staklom. Rad sadrži dispozicijsko rješenje, te analizu i dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata i priključaka prema HRN EN 1999-1-1. Uzimajući u obzir geografsku lokaciju i namjenu građevine, uz vlastitu težinu konstrukcije, uzeta je u obzir težina staklenog pokrova te djelovanja snijega, vjetra i potresa. Konstrukcijski elementi su izrađeni od aluminijske legure AW 6082 T6.

Računalni program "*SCIA Engineer 22.1*" korišten je za trodimenzionalno modeliranje i analizu konstrukcije kupole. Kupola se sastoji se od 20 cijevnih rebara koji se protežu od temelja do tlačnog cijevnog prstena uz dodatak cijevnih dijagonala kako bi se osigurala potrebna otpornost i stabilnost konstrukcije. Provedena je nelinearna analiza konstrukcije, a konstrukcijski elementi su dimenzionirani na mjerodavnu kombinaciju opterećenja. Uz računalno dimenzioniranje prema Eurokodu 9 izvedeno je i ručno dimenzioniranje elemenata s najvećim iskoristivostima. Nadalje, provedeni su proračuni karakterističnih priključaka u vijčanoj i zavarenoj izvedbi pomoću specijaliziranog računalnog programa IDEA StatiCa.

Ukupni utrošak aluminija iznosi 14 kg/m² što čini ovu projektiranu kupolu pravom laganom i ekonomski isplativom konstrukcijom. Kombinacija aluminija i stakla daje 'prozračnu' konstrukciju koja svojim vizualnim identitetom uistinu odgovara ciljanoj namjeni građevine i predstavlja iskonski meditativni prostor koji se stopio s ljepotama Gorskog Kotara.

Ključne riječi: aluminijska kupola, lagana konstrukcija, projektiranje, HRN EN 1999-1-1



Abstract

As part of the master's thesis, a project for an aluminium dome with a base diameter of 18 meters and a height of 9 meters was created. The dome is located in Fužine and is used for meditation purposes, which is why it is covered with glass. The work includes construction drawings as well as an analysis and design of the structural members and joints in accordance with HRN EN 1999-1-1. Taking into account the geographical location and purpose of the building, along with the weight of the structure itself, the weight of the glass cover, and the effects of snow, wind and earthquake were taken into account. The structural elements are made of AW 6082 T6 aluminium alloy.

The computer software "SCIA Engineer 22.1" was used for the three-dimensional modelling and analysis of the dome structure. The dome consists of 20 tubular ribs extending from the foundation to the compression tube ring, as well as tubular diagonals to ensure the required resistance and stability of the structure. A non-linear analysis of the structure was carried out and the structural members were designed for the relevant load combinations. In addition to the computer-aided design according to Eurocode 9, a manual design of the members with the highest utilisation was also carried out. Furthermore, calculations of characteristic bolted and welded joints were carried out using a specialized computer software IDEA StatiCa.

The total aluminium consumption is 14 kg/m², which justifies calling the designed dome a truly light and economical structure. The combination of aluminium and glass creates an 'airy' structure whose visual identity truly corresponds to the purpose of the building and represents a meditative space that blends in with the beauty of Gorski Kotar.

Key words: aluminium dome, light structure, design, HRN EN 1999-1-1



Sadržaj

1.	UVOD	1
1.1.	Struktura	1
1.2.	Schwedlerova kupola.....	3
1.3.	Aluminij u građevinarstvu	6
2.	TEHNIČKI OPIS	8
2.1.	Opis i dispozicija konstrukcije	8
2.2.	Proračun konstrukcije	8
2.3.	Materijali za izradu konstrukcije	9
2.4.	Popis primjenjenih propisa	9
2.5.	Program kontrole i osiguranja kvalitete.....	9
3.	ANALIZA OPTEREĆENJA.....	13
3.1.	Stalno djelovanje	13
3.2.	Djelovanje snijega	13
3.2.1.	Slučaj 1	15
3.2.2.	Slučaj 2.....	15
3.3.	Djelovanje vjetra.....	18
3.3.1.	Osnovna brzina vjetra.....	19
3.3.2.	Srednji vjetar	19
3.3.3.	Turbulencija vjetra	20
3.3.4.	Tlak vjetra na površine	21
3.4.	Potres	28
3.4.1.	Elastični spektar odziva.....	29
3.4.2.	Proračunski spektar odziva.....	31
4.	MODEL KONSTRUKCIJE.....	33
4.1.	Geometrija i rubni uvjeti.....	33
4.2.	Unos opterećenja	34



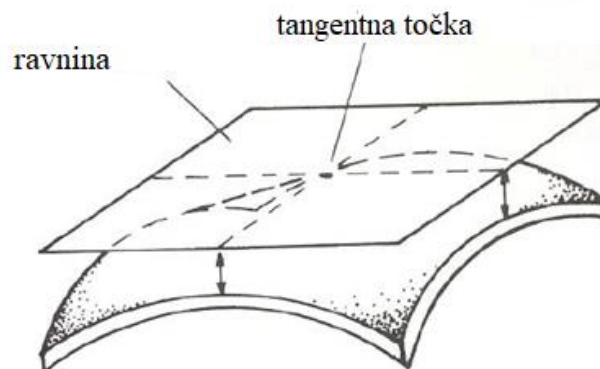
4.3.	Kombinacije opterećenja	38
4.4.	Proračun.....	45
5.	DIMENZIONIRANJE	48
5.1.	Unutarnje sile i momenti savijanja	49
5.2.	Iskorištenost elemenata računalnog dimenzioniranja za mjerodavnu kombinaciju ..	54
5.3.	Provjera graničnog stanja nosivosti elemenata.....	56
5.3.1.	Poprečni presjek Rebra.....	56
5.3.2.	Poprečni presjek Prstena	64
5.3.3	Poprečni presjek Dijagonala.....	71
5.3.4	Poprečni presjek Tlačnog prstena	78
5.4.	Provjera graničnog stanja uporabivosti	85
6.	PRIKLJUČCI	88
6.1.	Priključak prstena i dijagonale na element rebra	89
6.1.1.	Spoj dijagonale na rebra	89
6.1.2.	Spoj prstena na rebra	91
6.2.	Priključak u stopi luka s dijagonalom	103
6.3.	Priključak rebra na tlačni prsten.....	116
7.	ISKAZ MATERIJALA	128
8.	ZAKLJUČAK	129
9.	PRILOZI.....	131
	LITERATURA.....	132
	POPIS SLIKA	134
	POPIS TABLICA.....	138

1. UVOD

1.1. Struktura

Sa sve većim zahtjevima za konstrukcijama koje su lakše, ali istovremeno čvršće i ekonomičnije, raste potreba za istraživanjem novih smjerova u dizajnu i primjeni materijala. Tomu uvelike doprinosi napredak u tehnologiji koji omogućuje analizu kompleksnih prostornih struktura s većom preciznošću. Tradicionalni strukturalni oblici dobivaju novu perspektivu, dok se raznolikost materijala sve više koristi. Kao odgovor na slične zahtjeve, nastale su i konstrukcije u obliku kupola. Definirane su kao svodovi sferičnog oblika kojim se natkrivaju prostori kružnog, višekutnog ili kvadratičnog tlocrta.

Oblik kupole se generira rotacijom dijela kruga, elipse, parabole ili nekog drugog zakrivljenog oblika oko vertikalne središnje osi. Ovim postupkom stvara se trodimenzionalno tijelo sinklastičkog oblika, tj. površina s dvostrukom zakrivljenošću koje imaju barem dvije međusobno okomite ravnine.[1]

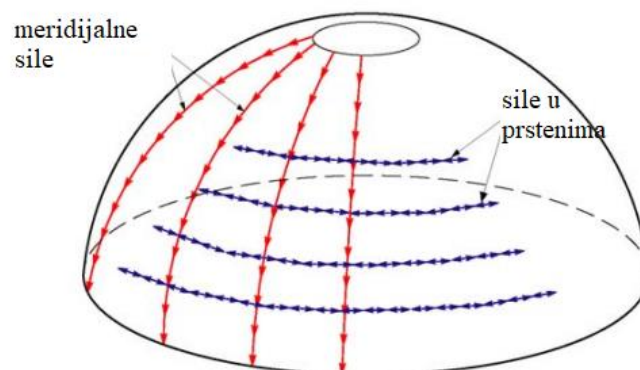


Slika 1: Ploha dvostruke zakrivljenosti, pozitivna Gaussova krivulja [2]

Kupole omogućuju savladavanje većih raspona bez potrebe za dodatnim stupovima između krajnjih oslonaca čime se dobiva maksimalna iskoristivost prostora. Također zahtijevaju puno manje materijala od konvencionalnih zgrada. Zahvaljujući svojoj strukturalnoj efikasnosti, kupole su pronašle široku primjenu u različitim kontekstima. Koriste se kao sakralne građevine, sportske dvorane i arene, izložbeni paviljoni te muzeji i galerije. Također, često se koriste i za izgradnju astronomskih opservatorija.

Kupola može imati različite geometrijske parametre s beskonačnim brojem oblika. Zbog svojeg strukturnog ponašanja, sposobne su imati malu debljinu na velikom rasponu. Različite konfiguracije kupola uključuju: jednostavne tankostjene ljuske, tankostjene ljuske ojačane rebrom, te otvorene mreže okvira povezane u trokutasti uzorak koji poprima kupolasti oblik. [2]

Sile koje djeluju unutar kupole su dominantno aksijalne sile. Geometrija kupole omogućuje da se ove sile učinkovito raspoređuju, rezultirajući stabilnom konstrukcijom. Sile u kupoli, analogno dvodimenzionalnom luku, tlačne su i šire se prema dolje, od vrha do oslonca u meridijalnom smjeru. Zbog trodimenzionalnosti sile su također nošene u drugom smjeru, u smjeru prstena (širine). Navedene sile ostvaruju se kao tlačna naprezanja duž gornjeg dijela konstrukcije istovremeno prelazeći u vlačna naprezanja na donjem dijelu konstrukcije. [1]

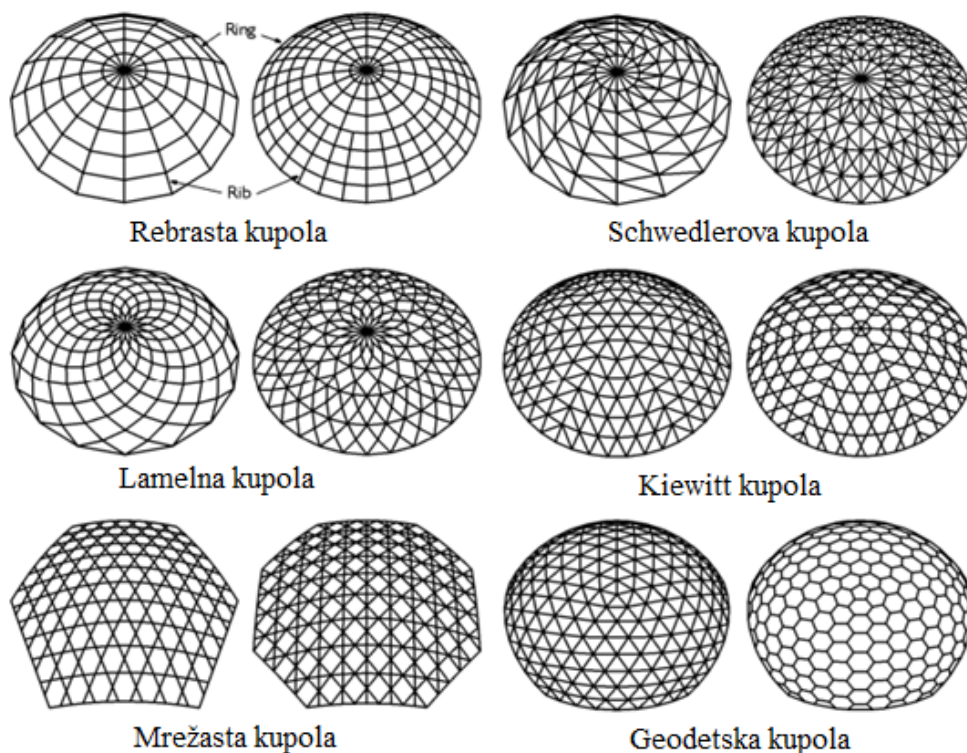


Slika 2: Dijagram unutarnjih sila u kupoli [3]

U okviru ovog diplomskog rada, provest će se projekt proračuna aluminijske kupole namijenjene meditacijskoj svrsi. Rad će obuhvatiti definiranje oblika kupole, odabir materijala, analizu opterećenja, modeliranje konstrukcije te dimenzioniranje temeljeno na dobivenim rezultatima analize. Također, bit će izrađen proračun za priključke kupole, uz pripadajuće tehničke crteže koji će prikazati strukturalne elemente i povezivanje komponenata. Na temelju proračuna i analize konstrukcije, osigurat će se stabilnost i sigurnost kupole.

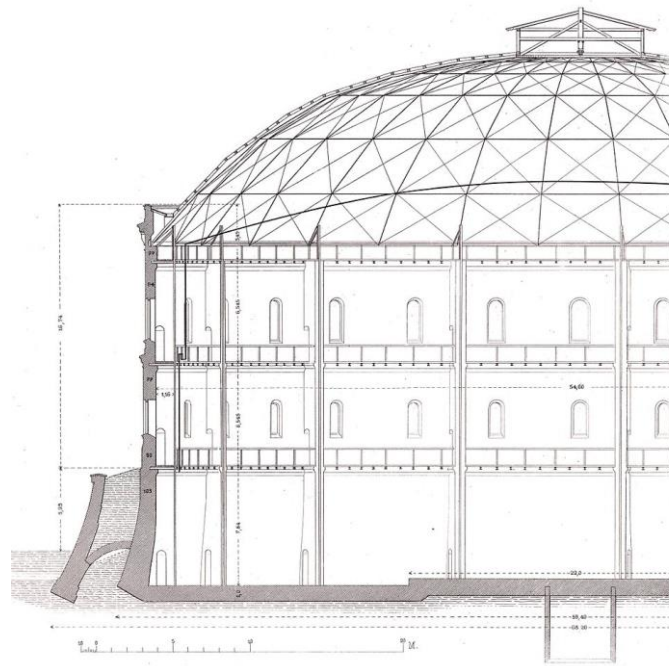
1.2. Schwedlerova kupola

Velik je broj mogućih rasporeda elemenata ukrućenih kupola, međutim, među najčešće primijenjenima u praksi, kao što je prikazano na Slici 3., su sljedeći tipovi: rebrasta, Schwedlerova kupola, kupola tipa Kiewiit, lamelna kupola, geodetska te kupola s trosmjernom mrežom (ili više).



Slika 3: Različiti tipovi ukrućenih kupola [4]

Schwedlerova kupola nosi ime po njemačkom građevinskom inženjeru J.W. Schwedleru, koji je 1863. godine konstruirao ovakav tip kupole kao zamjenu za urušeni krov spremnika za plin [5]. Ovaj novi tip kupole bio je karakteriziran jednostavnošću, manjom težinom i većom čvrstoćom.



Slika 4: Prikaz Fichte-Bunkera iz 1876.godine [6]

Konstrukcija se temelji na dvije ključne komponente: meridijanskim rebrima i horizontalnim poligonalnim prstenovima koji tvore sustav u obliku trapeza. Dodavanjem dijagonalnih elemenata, svaki trapez oblikovan presjecima rebra i horizontalnog prstena podijeljen je na dva trokutasta segmenta. Ovaj pristup značajno doprinosi čvrstoći i stabilnosti kupole kao i mogućnošću otpora asimetričnom opterećenju. [5]

Tehnika je slična konceptu greda i stupova, ali umjesto klasičnih ravnotežnih struktura, koristi se složeni sustav trokuta i četverokuta koji zajedno stvaraju stabilan oblik. Schwedlerove kupole doprinijele su inovaciji u inženjerstvu uz brojne prednosti te su omogućile gradnju impresivnih građevina s elegantnim i prozračnim unutarnjim prostorima.

Neke od prednosti Schwedlerove kupole su:

(a) efikasna uporaba materijala- rešetkasta struktura omogućuje redukciju korištenog materijala

- (b) lagana konstrukcija - postiže se uporabom čeličnih ili aluminijskih cijevi što je posebno korisno kod konstrukcija s velikim rasponom
- (c) velik otvoreni prostor bez potrebe za unutarnjim ukrućenjima
- (d) estetika - rešetkast uzorak daje vizualno privlačan izgled, dok geometrijski dizajn dodaje umjetnički element strukturnoj funkcionalnosti



Slika 5: Rundlokschuppen Rummelsburg, primjer Schwedlerove kupole [10]

1.3. Aluminij u građevinarstvu

Konstrukcija kupola omogućuje kreativno eksperimentiranje s različitim materijalima, a svaki donosi svoje prednosti i ograničenja u procesu oblikovanja. Tradicionalno građenje kupola s kamenim ili zidanim materijalom bilo je često u povijesti jer su se time proizvodile čvrste i estetski privlačne građevinske strukture. Međutim, ovi tipovi kupola imaju svoje nedostatke, poput znatne težine koja zahtijeva snažne temelje kako bi se osigurala stabilnost.

Današnja arhitektonska praksa sve više prepoznaje raznolikost materijala dostupnih za izradu kupola, s ciljem iskorištavanja njihovih potencijala i stvaranja širokog spektra dizajnerskih mogućnosti. Beton, odnosno armirani beton, zbog svoje fleksibilnosti u oblikovanju i mogućnosti lijevanja na licu mjesta ili prefabriciranja, čini betonske kupole poželjnima.

Drvo je također u širokoj upotrebi kod izgradnje kupola velikih raspona. Lamelirano drvo ima dobru čvrstoću te je pogodno za oblikovanje raznih oblika. Drvo se smatra materijalom visoke ekološke prihvatljivosti te pruža prirodnu estetiku građevinskih konstrukcija.

Napredak u inženjerstvu donosi i mogućnost konstruiranja kupola od čelika ili metala koje su se najviše raširile radi svojih dobrih svojstva, male težine, a velike čvrstoće. Najčešće korišteni oblici kupole, kao što je geodetska, pogodna za izgradnju malih, ali i velikih kupola.

Uz čelik počinju i istraživanja drugih sličnih metala – aluminij – koji se ne koristi toliko često zbog nedostatka informacija o njegovim učincima. Aluminij, kao materijal za građevinske konstrukcije, privlači pažnju zbog svojih karakterističnih svojstava, uključujući malu masu, otpornost na koroziju i sposobnost oblikovanja. U građevinarstvu već ima značajne primjene i predmet je intenzivnih istraživanja.

Najbolja primjena aluminijskog materijala je tamo gdje se mogu maksimalno iskoristiti njegove prednosti, kao na primjer kod krovnih sustava s velikim rasponima, građevine na teško dostupnim mjestima, objekte koji su izloženi korozivnim ili vlažnim uvjetima, konstrukcije s pokretnim dijelovima te specifične primjene poput jarbola i antenskih tornjeva. [7] Također ima ključnu ulogu u hidrauličkim primjenama, kao što su cjevovodi i spremnici za vodu zbog njegove otpornosti na koroziju, što omogućuje njihovu upotrebu bez dodatne zaštite, dok niska masa doprinosi energetske učinkovitosti.



Aluminij nudi značajne prednosti u smislu ekonomske isplativosti, jednostavnosti proizvodnje i dokazane učinkovitosti u zahtjevnim okolišima. Omogućuje smanjenje težine konstrukcija za čak 70% u usporedbi s čelikom, što rezultira smanjenjem ukupnih troškova izgradnje za 12%.[8] Manja težina konstrukcijskog materijala nudi lakšu izgradnju, smanjen fizički rad, lakši transport. Otporan je na koroziju čime uvelike konkurira s čelikom jer smanjuje troškove održavanja i nudi veće prednosti u agresivnom okolišu. Dobiva se postupkom ekstruzije, koja nudi najveću konstrukcijsku učinkovitost. Proizvodnja ekstrudiranog aluminijskog podrazumijeva proces zagrijavanja blokova aluminijske legure, nakon čega se materijal gura kroz kalup specifičnog oblika kako bi se dobio željeni profil. Ekstrudiranje nudi mogućnosti stvaranja različitih veličina i oblika uzoraka. Ekstrudirani aluminij pruža izdržljivost i strukturalnu čvrstoću, a u potpunosti se može reciklirati.[9]

U Zemljinoj kori ima ga 8 %, što ga čini trećim najprostranijim elementom u Zemljinoj kori (poslije kisika i silicija). U prirodi se nalazi kao oksid pomiješan s oksidima željeza, silicija, vanadija, titana itd. Iako dobrih svojstva, aluminij nije pogodan kao samostalni metal u primjeni građevinskih konstrukcija, radi čega mu se dodaju legirani elementi i nastaju legure aluminijske. To su magnezij, silicij, mangan, bakar i cink. Aluminijske legure dijele se ovisno o legiranom elementu prisutnom u najvećoj količini u leguri. Legure se odabiru ovisno o vrijednosti čvrstoće, dostupnosti oblika i nabave, sposobnosti stvaranja sloja aluminijskog oksida, otpornosti na koroziju, duktilnosti i cijene. [7]

2. TEHNIČKI OPIS

2.1. Opis i dispozicija konstrukcije

Predmet ovog diplomskog rada je konstrukcija Schwedlerove kupole promjera 18,0 m. Predmetna kupola koncipirana je s ciljem pružanja prostora za meditaciju te je namijenjena korištenju kao konstruktivnog nosivog dijela građevina koje podliježu Zakonu o prostornom uređenju i gradnji (stalni objekti). Kupola je promjera 18,0 m i visine 9,0 m. Konstrukcija se nalazi u Fužinama smještenom unutar primorsko-goranskog područja Hrvatske, na nadmorskoj visini od 722 metra. S obzirom na lokaciju i navedenu nadmorsku visinu, očitano karakteristično opterećenje snijegom je 4,0 kN/m². Osnovna brzina vjetra očitana je iz karte osnovne brzine vjetra za područje Republike Hrvatske, za općinu Fužine, te iznosi 25 m/s.

Elemente konstrukcije čine lukovi kvadratnih cijevnih profila dimenzija SHS 180 x 12 mm i tlačni centralni prsten dimenzija SHS 180 x 8 mm. Također elementi prstena, profili kružnih cijevi dimenzija CHS 114,3 x 3,6 mm te elementi dijagonala dimenzija CHS 88,9 x 3,2 mm. Svi konstruktivni elementi su istisnuti cijevni profili u kvaliteti aluminijske legure EN-AW 6082 T6. Za priključke predviđena je vijčana i zavarena izvedba, a pokrov je izveden od ravninski zakrivljenog laminiranog stakla debljine 14 milimetara.

2.2. Proračun konstrukcije

Proračun unutarnjih sila, momenata savijanja i dimenzioniranje elemenata aluminijske konstrukcije provedeno je sukladno Eurokodu. Analiza konstrukcije izvedena je pomoću programskog paketa „SCIA Engineer 22.1“. Model se sastoji od linijskih elemenata - štapova prema zadanom obliku, s dimenzijama profila prema proizvođačkim podacima kupole. Zbog dodavanja opterećenja, modeli uključuju trapezne panele koji definiraju prostorno opterećenje na kupoli. Na temelju unaprijed definirane geometrije, dimenzija elemenata, uvjeta na rubovima (oslonaca) i djelovanja (opterećenja), korištenjem programa SCIA izvršen je proračun deformacija i sila u elementima prostorne konstrukcije. Kontrola nosivosti i stabilnosti elemenata konstrukcije također je izvedena sukladno EC9. Programski je provedena i kontrola deformacija (pomaka čvorova) kako bi se dokazala uporabljivost.

2.3. Materijali za izradu konstrukcije

- elementi nosive aluminijske konstrukcije izrađeni su od legure AW 6082 T6
- vijci od nehrđajućeg čelika legure EN AW- A2 80
- beton za temelje C25/30
- armatura za temelje B 500 B

2.4. Popis primjenjenih propisa

- Eurocode 0
- Eurocode 1
- Eurocode 3
- Eurocode 8
- Eurocode 9

2.5. Program kontrole i osiguranja kvalitete

Uvjeti za izradu aluminijske konstrukcije

Izrada aluminijske konstrukcije mora se povjeriti onom izvođaču koji ima odgovarajuće reference već izvedenih sličnih objekata. U tehničkoj dokumentaciji (projektu) predviđena je vrsta i kvaliteta materijala od kojega treba izraditi konstrukciju. Odstupanja u kvaliteti materijala može odobriti jedino projektant konstrukcije.

Izvođač radova dužan je prije početka radova predočiti nadzornom inženjeru sljedeću važnu dokumentaciju:

- Uvjerenja o kvaliteti osnovnog i dodatnog materijala, sredstava za spajanje te sredstava za antikorozijsku zaštitu,
- Uvjerenje o podobnosti pogona za izvođenje zavarivačkih radova,
- Uvjerenja zavarivača koji će raditi na izradi konstrukcije za vrstu zavarivačkih radova koja će se primjenjivati, za traženu debljinu, materijal i položaj zavarivanja,
- Specifikacija postupaka zavarivanja i odobrenje o primjeni postupaka zavarivanja,
- Uvjerenja o ispravnosti strojeva za izvođenje zavarivačkih radova,
- Plan izvođenja zavarivačkih radova,



- Uvjerenje o podobnosti izvođača za izvođenje antikorozijske zaštite,
- Ovlaštenja svih odgovornih osoba u sustavu interne kontrole izvođača,
- Plan rada interne kontrole izvođača.

Prije pristupanja radovima na montaži potrebno je predočiti odobreni Projekt montaže.

Navedena dokumentacija sastavni je dio dokumentacije za tehnički pregled konstrukcije. Tijekom izrade i montaže konstrukcije izvođač radova dužan je voditi zakonom propisane dnevnik, koje je uz internu kontrolu izvođača dužan ovjeriti i nadzorni inženjer. Ako se materijal za izradu konstrukcije nabavlja i tijekom izrade konstrukcije, potrebno je nadzornom organu staviti na uvid odgovarajuća uvjerenja o kvaliteti.

Prije isporuke konstrukcije na gradilište vrši se prijem konstrukcije u radionici uz pribavljenu kompletnu dokumentaciju o kvaliteti. O prijemu konstrukcije sastavlja se zapisnik koji ovjeravaju svi sudionici izgradnje: investitor, izvođač radova u radionici, nadzorni inženjer te predstavnik izvođača radova na montaži konstrukcije.

Propisi

Potrebno je pridržavati se svih normi i propisa navedenih u projektu te poštovati pravila dobre izvedbe.

Opće napomene za izradu aluminijske konstrukcije u radionici

Prilikom rezanja materijala treba paziti na mogućnost pojave lokalnih zarez, naročito kod vlačno napregnutih elemenata. Svaki uočeni zarez potrebno je izbrusiti ili dovariti i izbrusiti.

Svi elementi trebaju biti izgrađeni u granicama dopuštenih odstupanja. Premaše li odstupanja granične vrijednosti, potrebno je zatražiti suglasnost projektanta na izvedeno stanje.

Kod zavarivačkih radova potrebno je osigurati stalnu kontrolu prije, u toku i nakon izvedenih radova. Površine za zavarivanje moraju biti kvalitetno pripremljene i bez masnoće, hrđe i druge prljavštine. Poslije izvedenih radova potrebno je obaviti dimenzionalnu i vizualnu kontrolu te kontrole predviđene projektom. Po potrebi, izvodi se i probno sklapanje o čemu se sastavlja zapisnik, kojega ovjerava nadzorni inženjer. Prilikom izvođenja zavarivačkih radova



potrebno je voditi računa da konstrukcija nakon hlađenja ne poprimi neželjeni deformirani oblik. Ne dopušta se zavarivanje na temperaturi nižoj od 0 stupnjeva C.

Za radove koji nakon potpunog sklapanja konstrukcije neće biti vidljivi, radi se zapisnik o preuzimanju u trenutku dostupnosti svih dijelova konstrukcije pregledu.

Dijelovi konstrukcije moraju se prije transporta na gradilište označiti i osigurati od oštećenja prije i u toku transporta na gradilište.

Elementi konstrukcije

Elemente konstrukcije potrebno je izraditi u svemu prema specifikacijama, crtežima i napucima iz ovog dijela projekta.

Materijali za izradu konstrukcije

Materijali za izradu konstrukcije navedeni su u statičkom proračunu te na priloženim radioničkim nacrtima. Cjelokupan korišteni materijal mora imati odgovarajuća uvjerenja o kvaliteti, a na osnovnom materijalu se mora vidljivo označiti broj šarže i lima sa uvjerenja.

Antikorozijska zaštita

Antikorozijsku zaštitu smije se nanostiti strogo prema zahtjevima projekta i propisa. Posebnu pažnju treba obratiti na vlažnost zraka i temperaturu. Nakon završene izvedbe svakog sloja potrebno je provjeriti debljinu i prionljivost premaza.

Protupožarna zaštita

Protupožarnu zaštitu smije se nanositi strogo prema zahtjevima projekta, propisa i uputa proizvođača. Posebnu pažnju treba obratiti na čistoću i suhoću površine. Nakon završene izvedbe svakog sloja potrebno je provjeriti debljinu i prionljivost nanešene zaštite.

Prijem elemenata konstrukcije

Prijem elemenata aluminijske konstrukcije u radionici obavlja se prije isporuke na gradilište na temelju radioničkih crteža i specifikacije. Prilikom prijema radova potrebno je uz gore navedenu dokumentaciju staviti na uvid i sljedeće:



- Radioničke nacрте sa specifikacijama,
- Dnevnik izrade u radionici,
- Dnevnik zavarivačkih radova u radionici,
- Dnevnik izvođenja antikorozijske zaštite,
- Izvješće interne kontrole o kvaliteti izvedenih radova.

Prijem montirane aluminijske konstrukcije na gradilištu obavlja se na temelju radioničkih crteža i projekta montaže. Prilikom prijema izvedene konstrukcije potrebno je staviti na uvid i sljedeće dokumente:

- Kompletnu dokumentaciju sa primopredaje konstrukcije u radionici,
- Projekt montaže,
- Radioničke nacрте sa specifikacijama,
- Dnevnik izvođenja radova na montaži,
- Dnevnik izvođenja antikorozijske zaštite,
- Dnevnik izvođenja protupožarne zaštite,
- Izvješće interne kontrole o kvaliteti izvedenih radova,
- Uvjerenje o kvaliteti dodatnog materijala, sredstava za spajanje te sredstava za antikorozijsku i protupožarnu zaštitu,
- Uvjerenje o podobnosti izvođača za izvođenje radova na montaži,
- Uvjerenja zavarivača koji će raditi na izradi i montaži konstrukcije za vrstu zavarivačkih radova koja će se primjenjivati, za traženu debljinu, materijal i položaj zavarivanja,
- Specifikacija postupaka zavarivanja i odobrenje o primjeni postupaka zavarivanja,
- Uvjerenja o ispravnosti strojeva za izvođenje zavarivačkih radova,
- Plan izvođenja zavarivačkih radova,
- Uvjerenje o podobnosti izvođača za izvođenje antikorozijske zaštite,
- Uvjerenje o podobnosti izvođača za izvođenje protupožarne zaštite,
- Ovlaštenja svih odgovornih osoba u sustavu interne kontrole izvođača,
- Plan rada interne kontrole izvođača.

3. ANALIZA OPTEREĆENJA

U okviru analize opterećenja razmotrit će se utjecaji na konstrukciju koja obuhvaća težinu same konstrukcije, težinu pokrova te utjecaj snijega i vjetra. Djelovanja se određuju u skladu s lokacijom i namjenom konstrukcije.

3.1. Stalno djelovanje

Vlastita težina konstrukcije svrstana je u stalno nepomično djelovanje, a u obzir je uzeta putem računalnog programa „SCIA Engineer 22.1“ opcijom „self – weight“.

Dodatno stalno djelovanje uključuje pokrov od laminiranog stakla debljine 14,0 mm. Vrijednost dodatnog stalnog opterećenja na cijelu konstrukciju iznosi:

- Laminirano staklo 0,34 kN/m²

3.2. Djelovanje snijega

Analiza konstrukcije na opterećenje snijegom provodi se prema normi [HRN EN 1991-1-3:2012/A1:2016] i nacionalnom dodatku za Hrvatsku. Opterećenje snijegom djeluje gravitacijski, a na površinu krova se prenosi kao horizontalna projekcija.

Opterećenje snijegom na krovu dobiva se prema izrazu:

$$s = s_k \cdot \mu_i \cdot C_e \cdot C_t$$

gdje je:

- s_k karakteristično opterećenje snijegom na tlu
 μ_i koeficijent oblika opterećenja snijegom na krovu
 C_e koeficijent izloženosti ($C_e = 1,0$), uzima u obzir teže uvjete puhanja vjetra
 C_t toplinski koeficijent zbog zagrijavanja zgrade ($C_t = 1,0$)

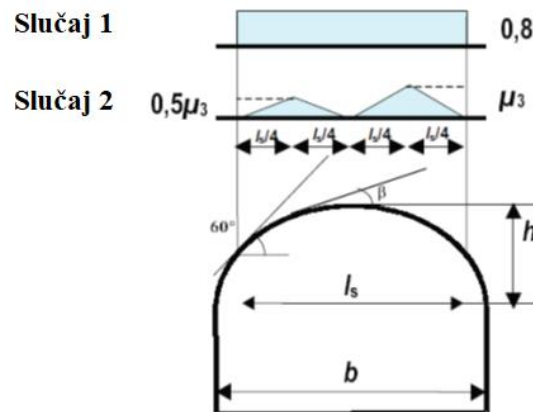
Karakteristična vrijednost proračunskog opterećenja snijegom na tlu, označena kao s_k , određuje se uzimajući u obzir kartu snježnih područja i pripadajuću nadmorske visine specifičnu za lokaciju konstrukcije.



Slika 6: Karta snježnih područja [15]

Nadmorska visina nalazi se između dvije vrijednosti navedene u tablici te je uzeta najbliža veća vrijednost zbog čega karakteristična vrijednost proračunskog opterećenja snijegom na tlu iznosi $4,0 \text{ kN/m}^2$.

Kod valjkastih krovova potrebno je razmotriti dva slučaja. Prvi slučaj obuhvaća raspored opterećenja neporemećenim snijegom, dok se drugi slučaj odnosi na raspored opterećenja snježnim nanosima. Koeficijent oblika μ_3 razlikuje se s obzirom na nagib krova.



Slika 7: Koeficijenti oblika opterećenja snijegom za valjkasti krov [15]

3.2.1. Slučaj 1

$$s_i = s_k \cdot \mu_i \cdot C_e \cdot C_t = 4,00 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 1 = 3,20 \text{ kN/m}^2$$

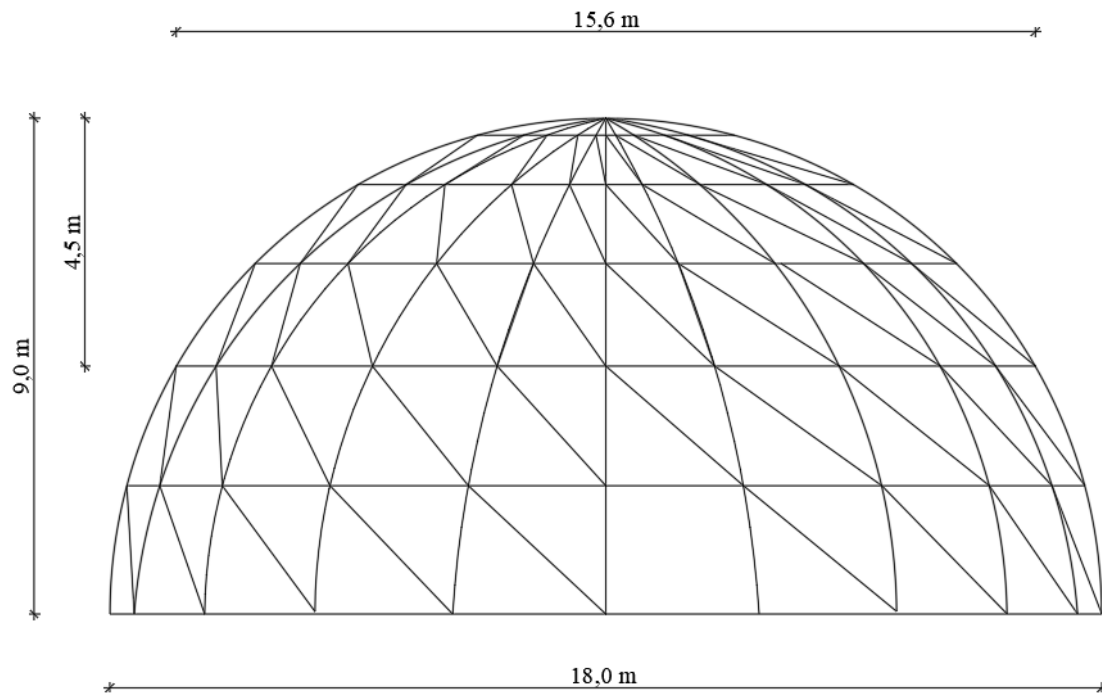
3.2.2. Slučaj 2

Za valjkaste krovove s nagibom krova manjim od 60° , preporučuje se primjena koeficijenta oblika prema priloženoj formuli. S druge strane, za krovove s nagibom većim od 60° , opterećenje snijegom se ne uzima u obzir.

$$\text{Za } \beta > 60^\circ \quad \mu_3 = 0$$

$$\text{Za } \beta \leq 60^\circ \quad \mu_3 = 0,2 + 10 h/b$$

Potrebno je odrediti gornju granicu vrijednosti μ_3 .



Slika 8: Prikaz dimenzija djelovanja snijega na kupolu

h' = visina konstrukcije gdje je kut tangente na krivulju i horizontale manji od 60°

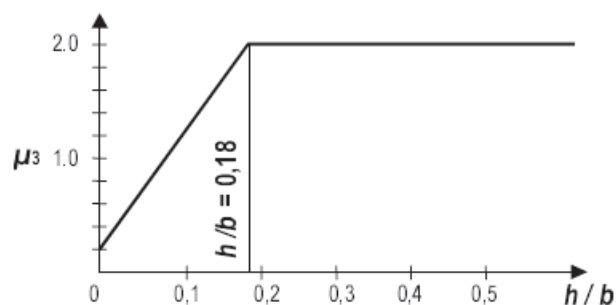
b' = duljina konstrukcije gdje je kut tangente na krivulju i horizontale manji od 60°

$h' = 4,50 \text{ m}$ $b' = 15,6 \text{ m}$

$$\mu_3 = 0,2 + 10 h/b = 0,2 + 10 \cdot 4,50/15,6 = 3,08$$

Preporučena gornja granica koeficijenta oblika je $\mu_3 = 2,0$.

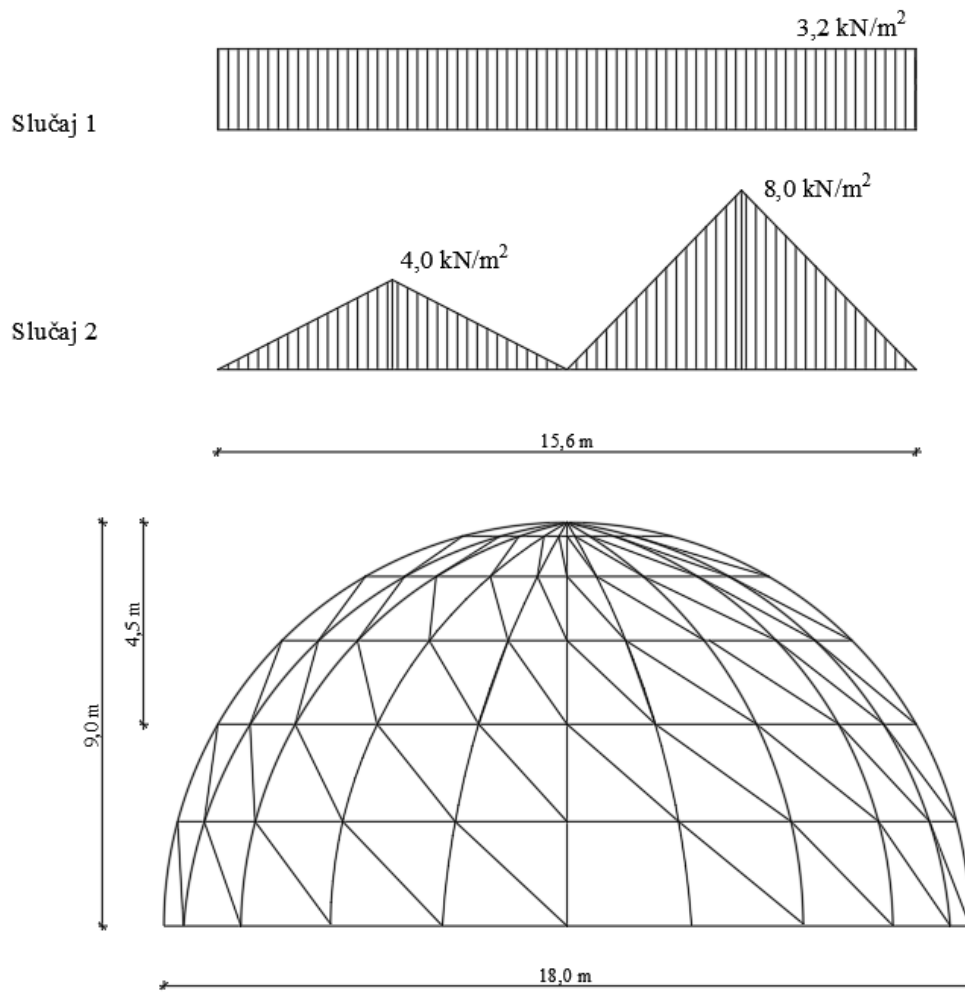
$$h/b = 4,50/15,6 = 0,29 \rightarrow \mu_3 = 2,0$$



Slika 9: Preporučene vrijednosti faktora oblika krova za promjenjiv odnos visine i raspona (za $\beta < 60^\circ$) [15]

$$s_{ii} = s_k \cdot \mu_3 \cdot C_e \cdot C_t = 4,0 \cdot 2,0 \cdot 1 \cdot 1 = 8,0 \text{ kN/m}^2$$

$$s_{ii} = s_k \cdot 0,5\mu_3 \cdot C_e \cdot C_t = 4,0 \cdot 0,5 \cdot 2,0 \cdot 1 \cdot 1 = 4,0 \text{ kN/m}^2$$

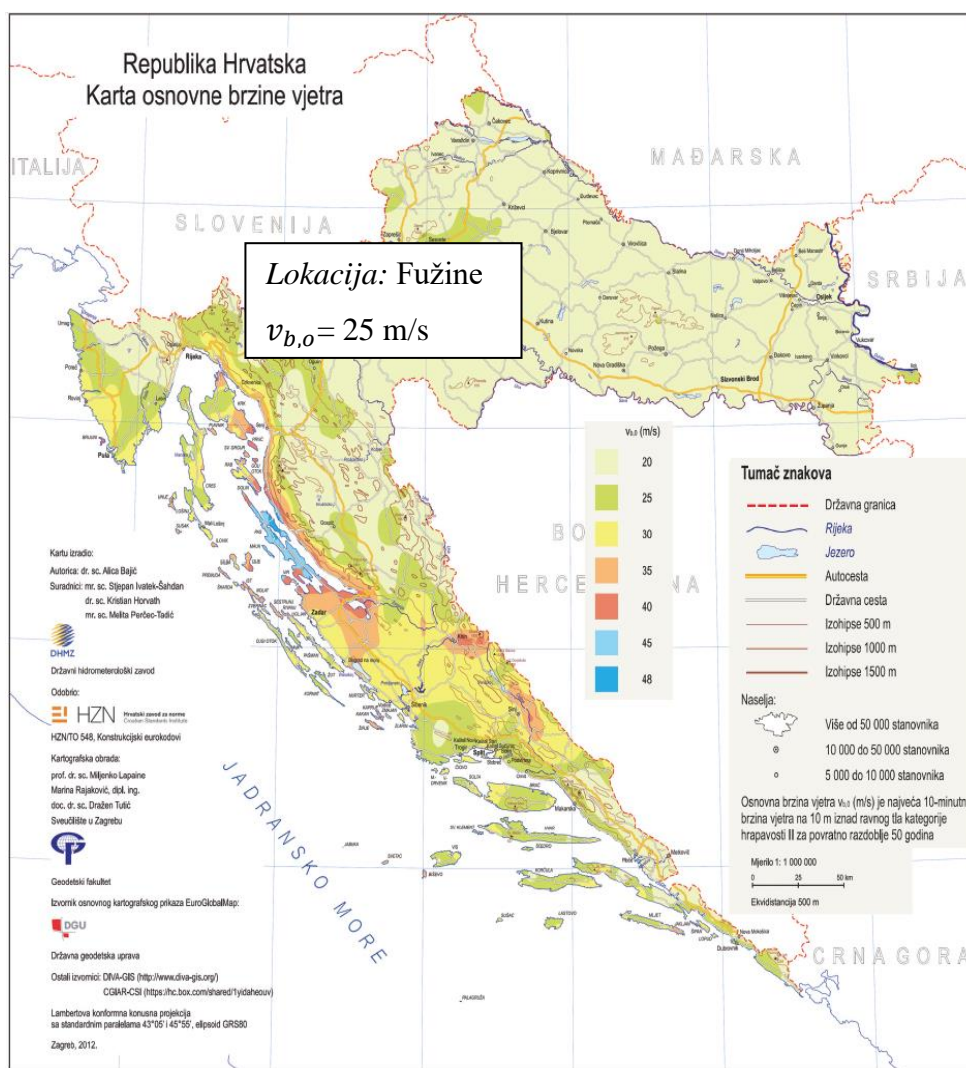


Slika 10: Prikaz opterećenja snijega na konstrukciju

3.3. Djelovanje vjetra

Proračun utjecaja vjetra na konstrukciju provodi se prema normi [HRN EN 1991-1-4] i pripadajućem nacionalnom dodatku. Vjetar se smatra slobodno promjenjivim opterećenjem, a djeluje okomito na površine konstrukcije. Pri proračunu, potrebno je uzeti u obzir slučajeve uzdužnog i poprečnog strujanja vjetra, kao i situacije kada su vrata zatvorena ili otvorena.

Temeljna vrijednost osnovne brzina vjetra $v_{b,o}$ određena je prema karti vjetrova, preuzetoj iz hrvatskog nacionalnog dodatka.



Slika 11: Karta osnovne brzine vjetra [16]

3.3.1. Osnovna brzina vjetra

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0}, \text{ gdje je:}$$

c_{dir} koeficijent smjera vjetra, $c_{dir} = 1,0$

c_{season} koeficijent godišnjeg doba, $c_{season} = 1,0$

$v_{b,0}$ temeljna vrijednost osnovne brzine vjetra

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 25 = 25,0 \text{ m/s}$$

3.3.2. Srednji vjetar

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b$$

$c_r(z)$ faktor hrapavosti

$c_o(z)$ faktor vertikalne razvedenosti → preporučena vrijednost $c_o(z) = 1,0$

Hrapavost terena:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{za } z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

$$c_r(z) = c_r(z_{min}) \quad \text{za } z < z_{min}$$

z_0 duljina hrapavosti

k_r faktor terena ovisan o duljini hrapavosti z_0 i proračunan izrazom

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07}$$

Odabrana je kategorija terena II.

Kategorija terena		z_0 [m]	z_{min} [m]
0	More ili priobalna područja izložena otvorenom moru	0,003	1
I	Jezeru ili ravna i horizontalno položena područja sa zanemarivom vegetacijom i bez prepreka	0,01	1
II	Područja s niskom vegetacijom, npr. travom, i izoliranim preprekama (drveće, zgrade) s razmakom najmanje 20 visina prepreke	0,05	2
III	Područja sa stalnim pokrovom od vegetacije ili zgrade ili područja s izoliranim preprekama s razmakom najviše 20 visina prepreke (npr. sela, predgrađa, stalna šuma)	0,3	5
IV	Područja s najmanje 15 % površine pokrivene zgradama čija prosječna visina premašuje 15 m	1,0	10

NAPOMENA: Kategorije terena prikazane su na slikama u točki A.1.

Tablica 1: Kategorije terena i parametri terena [16]

$$\text{Faktor terena} \quad k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z}{z_{0,II}}\right)^{0,07} = 0,19 \cdot \left(\frac{0,05}{0,05}\right)^{0,07} = 0,19$$

$$\text{Hrapavost terena} \quad c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,19 \cdot \ln\left(\frac{9}{0,05}\right) = 0,99$$

$$\text{Srednja brzina} \quad v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b = 0,99 \cdot 1,0 \cdot 25,0 = 24,8 \text{ m/s}$$

3.3.3. Turbulencija vjetra

Intenzitet turbulencije vjetra $I_v(z)$ određen je kao standardna devijacija turbulencije σ_v podijeljena sa srednjom brzinom vjetra. Za vrijednost visine z koja je manja od maksimalne, a veća od minimalne intenzitet turbulencije glasi:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_0(z) \ln(z/z_0)}$$

gdje je:

k_I faktor turbulencije, preporučena vrijednost $k_I = 1,0$

$$I_v(z) = \frac{k_I}{c_0(z) \ln(z/z_0)} = \frac{1}{1 \ln(9/0,05)} = 0,19$$

Konačno, tlak pri vršnoj brzini jednak je:

$$q_p(z) = [1 + 7 I_v(z)] \frac{1}{2} \rho v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b$$

Gustoća zraka ρ određena je u nacionalnom dodatku i jednake je $1,25 \text{ kg/m}^3$

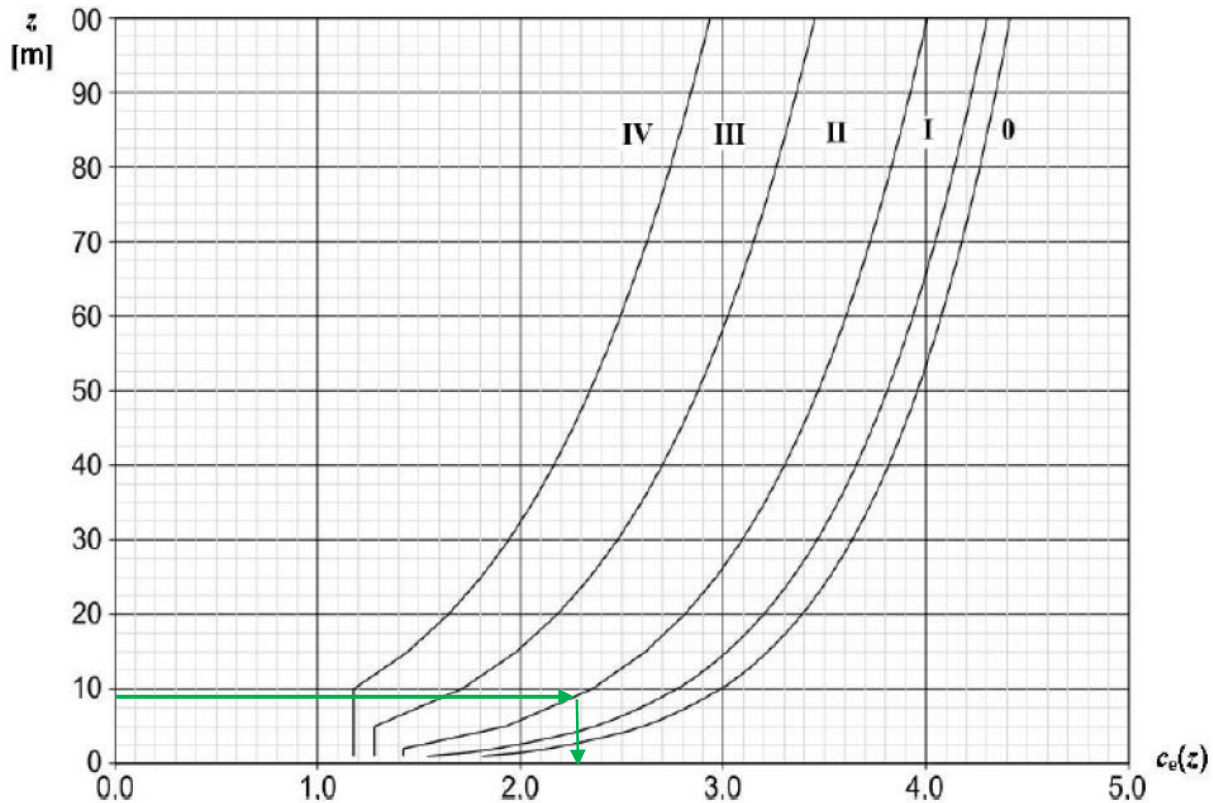
$$q_p(z) = [1 + 7 I_v(z)] \frac{1}{2} \rho v_m^2(z) = [1 + 7 \cdot 0,19] \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 24,8^2 = 0,89 \text{ kN/m}^2$$

$$q_b = \frac{1}{2} \rho v_b^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 25,0^2 = 391 \text{ N/m}^2 = 0,39 \text{ kN/m}^2$$

Faktor izloženosti dan je izrazom:

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} = \frac{0,89}{0,39} = 2,28 \approx 2,3 \text{ (za II. kategoriju terena)}$$

Faktor izloženosti za ravne terene gdje je faktor vertikalne razvedenosti jednak 1, moguće je odrediti iz funkcije visine iznad terena i funkcije kategorije terena prikazane na Slici 12.:



Slika 12: Grafički prikaz faktora izloženosti [16]

3.3.4. Tlak vjetra na površine

Djelovanja vjetra na konstrukcije moraju se odrediti uzimajući u obzir i vanjski i unutarnji tlak vjetra.

Vanjski pritisak vjetra

Tlak vjetra koji djeluje na vanjske površine ,

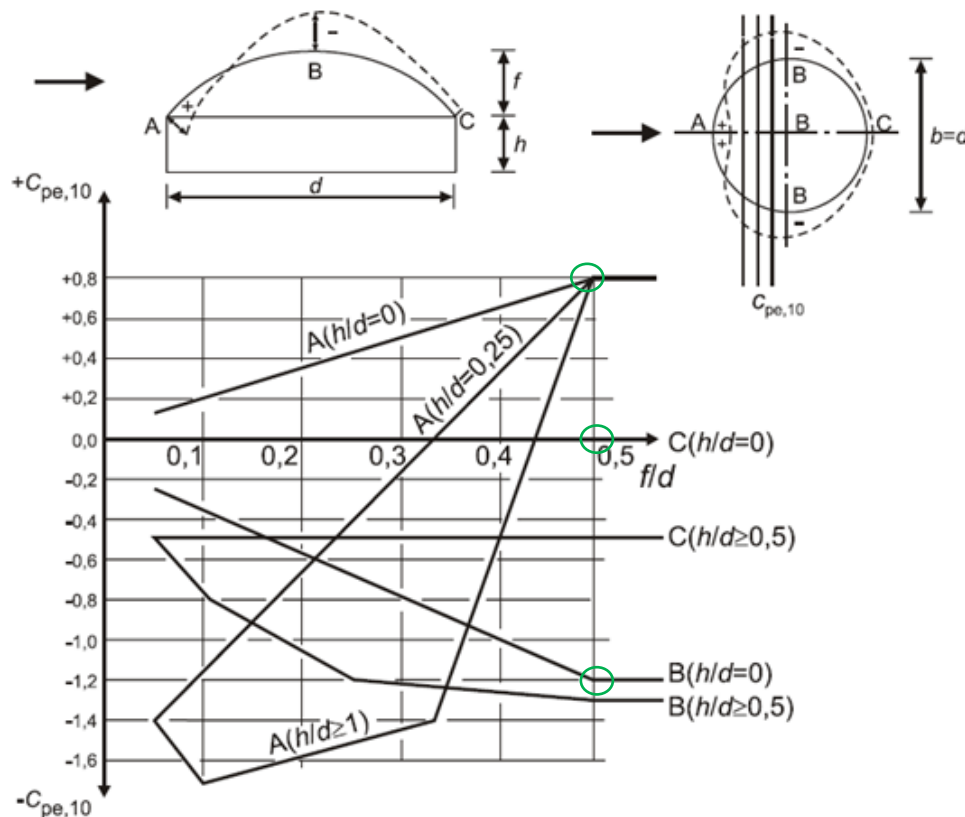
$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe}$$

$q_p(z_e)$ tlak pri vršnoj brzini

z_e referentna visina za vanjski tlak, za valjkaste elemente i kupole $z_e = h + f$

c_{pe} koeficijent tlaka za vanjski tlak

Koeficijent vanjskog tlaka za kupole s kružnom osnovicom određuju se iz dijagrama:



Slika 13: Preporučene vrijednosti koeficijent vanjskog tlaka za kupole s kružnom osnovicom [16]

$$d = 18,0 \text{ m} , f = 9,0 \text{ m} , h = 0,0 \text{ m}$$

$$\frac{f}{d} = \frac{9,0}{18,0} = 0,50$$

$$\frac{h}{d} = \frac{0}{18,0} = 0,0$$

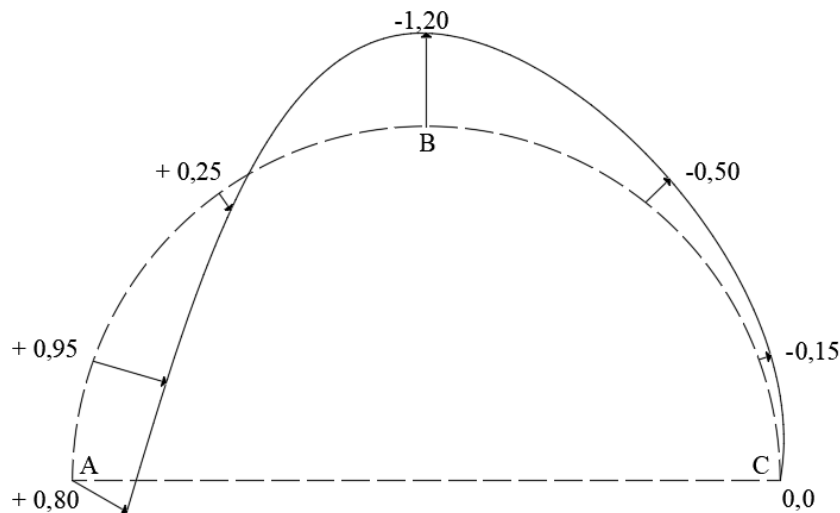
Iz dijagrama su očitane vrijednosti za koeficijent vanjskog pritiska za tri točke:

$$A \rightarrow C_{pe,10} = +0,80$$

$$B \rightarrow C_{pe,10} = -1,20$$

$$C \rightarrow C_{pe,10} = 0,0$$

Približne vrijednost koeficijent vanjskog tlaka uzete su za daljnji proračun:



Slika 14: približne vrijednost koeficijenta vanjskog tlaka na pet razina

Unutarnji pritisak vjetra

Tlak vjetra koji djeluje na unutrašnje plohe,

$$w_i = q_p(z_i) \cdot c_{pi}$$

$q_p(z_i)$ tlak pri vršnoj brzini

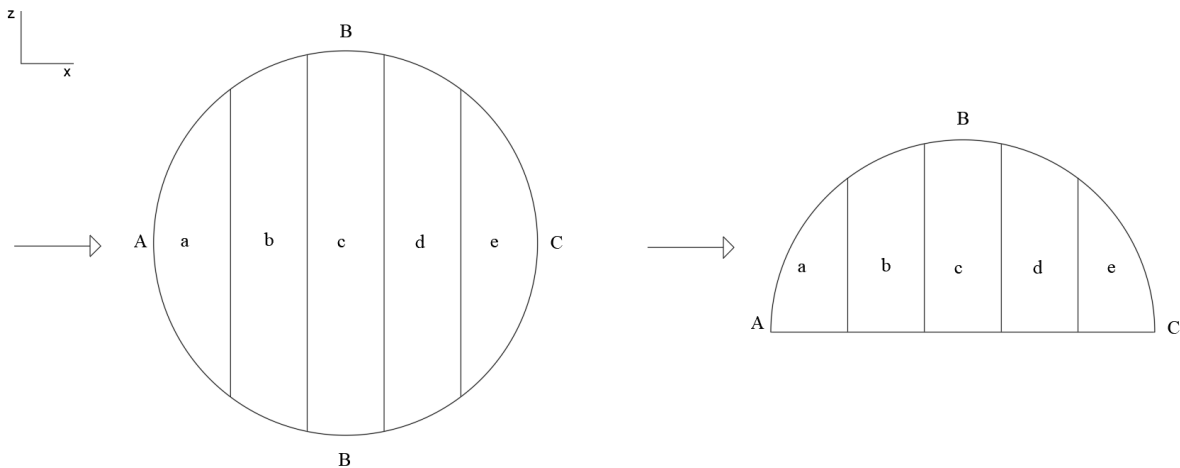
z_i referentna visina za unutrašnji tlak

c_{pi} koeficijent tlaka za unutrašnji tlak

Referentna visina za unutrašnji tlak jednaka je referentnoj visini za vanjski tlak.

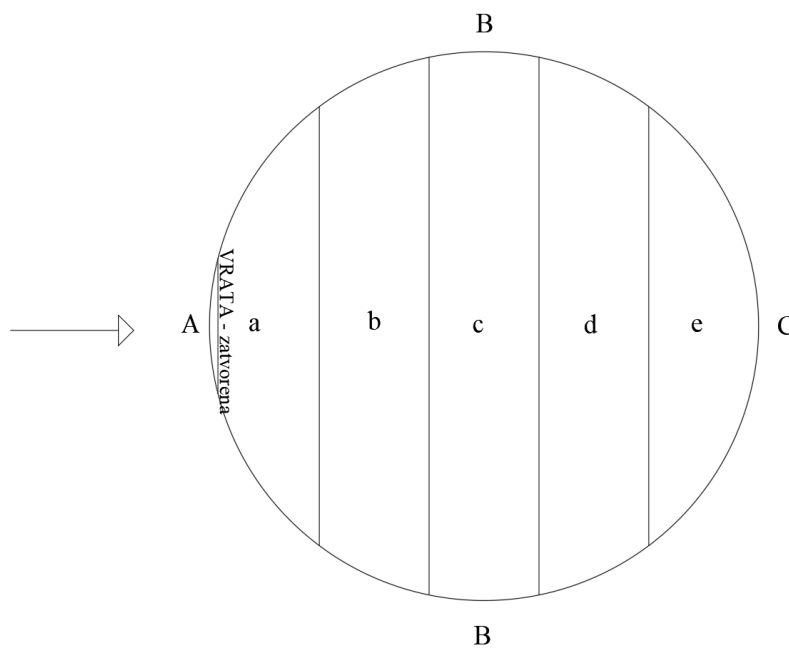
Kupola se sastoji od jednog otvora (vrata), stoga je koeficijent unutrašnjeg tlaka jednak:

$$c_{pi} = 0,90 c_{pe}$$



Slika 15: Prikaz aproksimacija ploha konstrukcije na djelovanje vjetra

1. Slučaj: Vjetar puše poprečno u smjeru X+, vrata su zatvorena



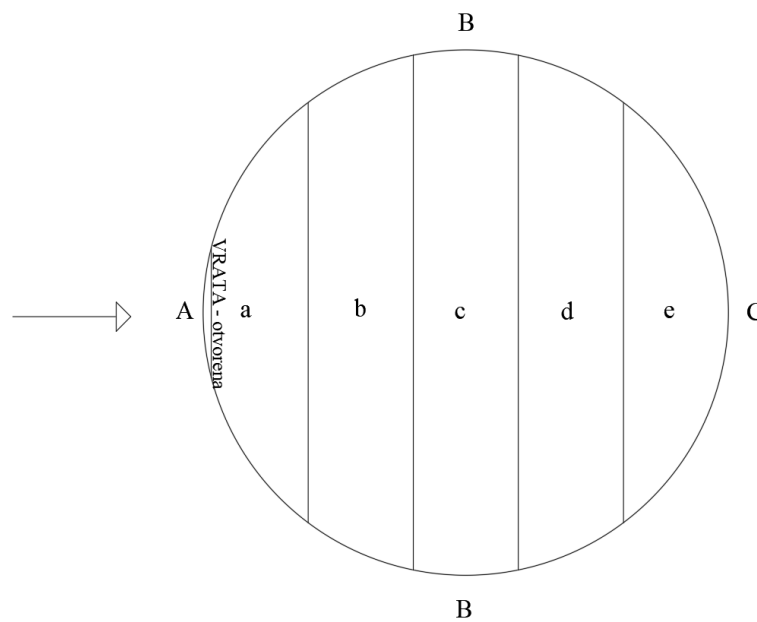
Slika 16: Slučaj 1 puhanja vjetra

Slučaj 1.	C_{pe}	q_p	w_e [kN/m ²]	C_{pi}	w_i [kN/m ²]	$w_k = w_e - w_i$ [kN/m ²]
a	0,95	0,89	0,85	0	0	0,85
b	0,25		0,22			0,22
c	-1,20		-1,07			-1,07
d	-0,50		-0,45			-0,45
e	-0,15		-0,13			-0,13

Tablica 2: Vrijednosti ukupnog tlaka na površinu za slučaj 1 puhanja vjetra

U slučaju puhanja vjetra poprečno u smjeru X- ili uzdužno u smjerovima Z+ i Z-, a vrata su zatvorena, vrijednosti ukupnog tlaka na površinu bit će ekvivalentne onima u prvom slučaju. zahvaljujući simetričnosti konstrukcije u dva smjera.

2. Slučaj: Vjetar puše u smjeru X+ , vrata su otvorena

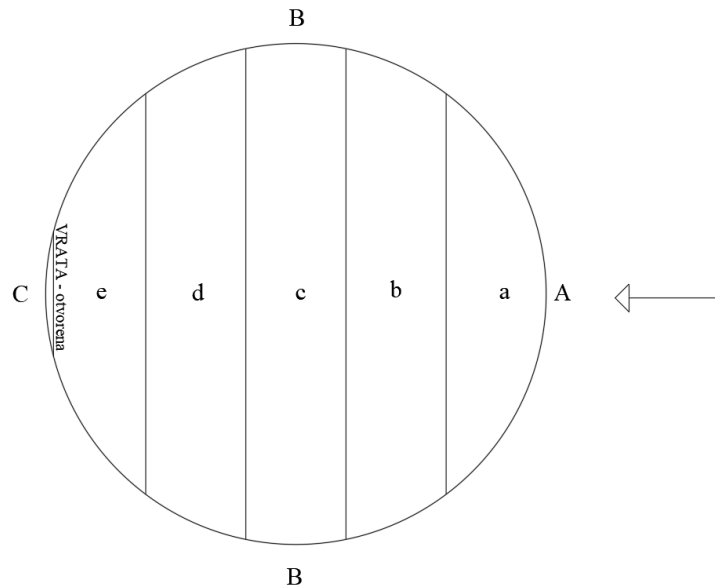


Slika 17: Slučaj 2 puhanja vjetra

Slučaj 2.	C_{pe}	q_p	w_e [kN/m ²]	C_{pi}	w_i [kN/m ²]	$w_k = w_e - w_i$ [kN/m ²]
a	0,95	0,89	0,85	0,86	0,77	0,08
b	0,25		0,22			-0,54
c	-1,20		-1,07			-1,83
d	-0,50		-0,45			-1,21
e	-0,15		-0,13			-0,90

Tablica 3: Vrijednosti ukupnog tlaka na površinu za slučaj 2 puhanja vjetra

3. Slučaj: Vjetar puše u smjeru X-, vrata su otvorena

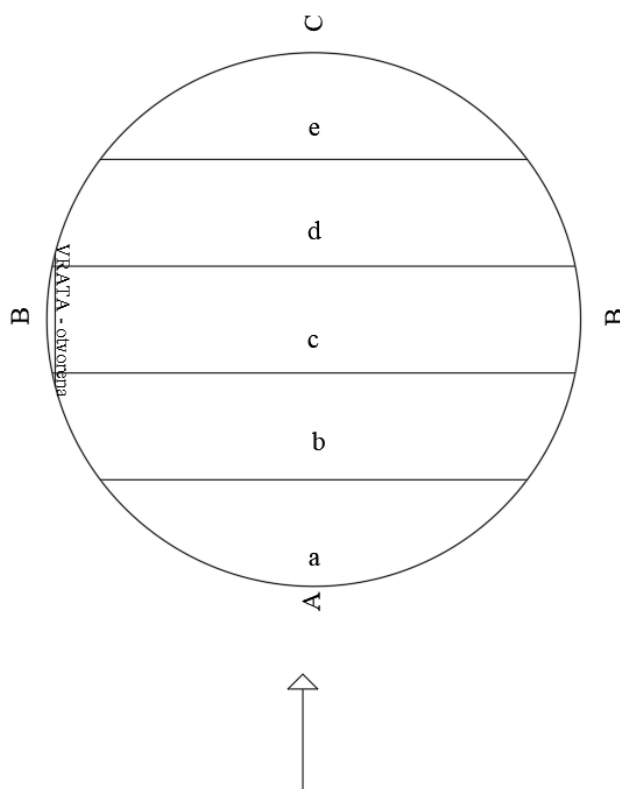


Slika 18: Slučaj 3 puhanja vjetra

Slučaj 3.	C_{pe}	q_p	w_e [kN/m ²]	C_{pi}	w_i [kN/m ²]	$w_k = w_e - w_i$ [kN/m ²]
a	0,95	0,89	0,85	-0,14	-0,12	0,97
b	0,25		0,22			0,35
c	-1,20		-1,07			-0,94
d	-0,50		-0,45			-0,32
e	-0,15		-0,13			-0,01

Tablica 4: Vrijednosti ukupnog tlaka na površinu za slučaj 3 puhanja vjetra

4. Slučaj: Vjetar puše u smjeru Z+/Z-, vrata su otvorena



Slika 19: Slučaj 4 puhanja vjetra

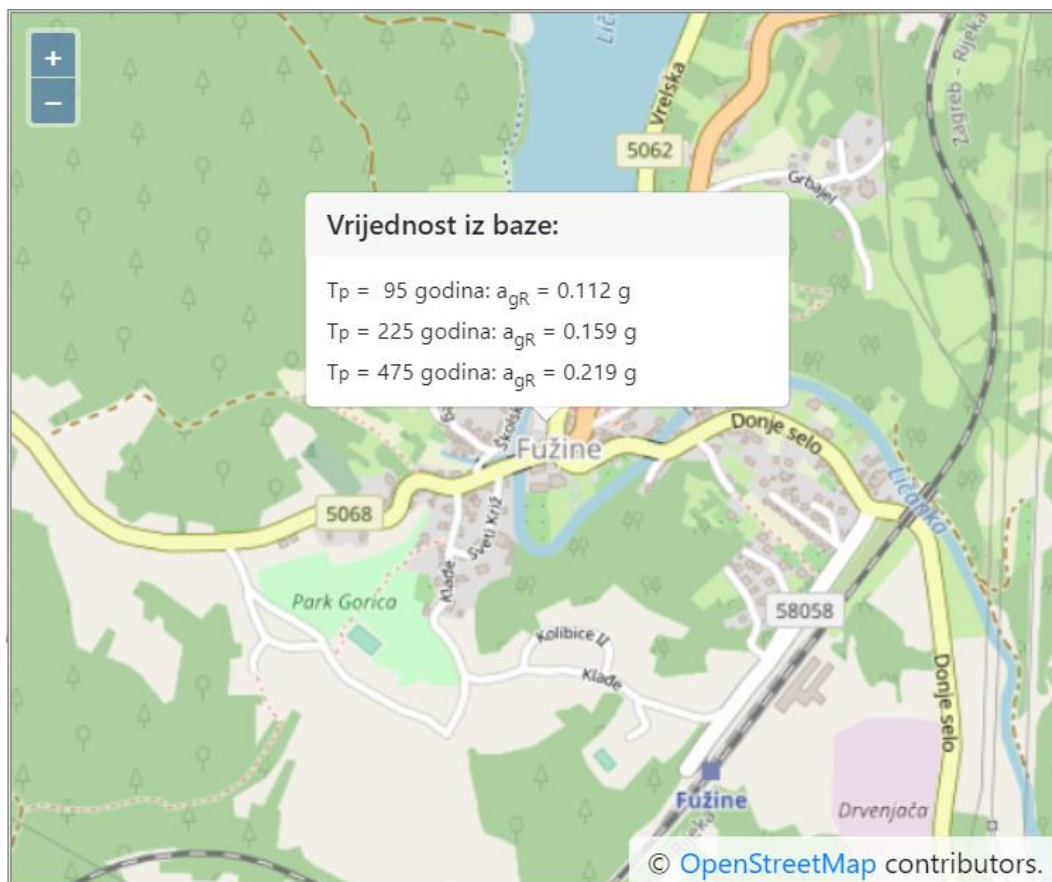
Slučaj 4.	C_{pe}	q_p	w_e [kN/m ²]	C_{pi}	w_i [kN/m ²]	$w_k = w_e - w_i$ [kN/m ²]
a	0,95	0,89	0,85	-1,08	-0,96	1,81
b	0,25		0,22			1,18
c	-1,20		-1,07			-0,11
d	-0,50		-0,45			0,52
e	-0,15		-0,13			0,83

Tablica 5: Vrijednosti ukupnog tlaka na površinu za slučaj 4 puhanja vjetra

3.4. Potres

Potresno djelovanje određuje se prema smjernicama Eurokoda [HRN EN 1998-1]. Intenzitet potresnog opterećenja ovisi o raznim čimbenicima kao što su jačina potresa, udaljenost od epicentra, geološki uvjeti tla te karakteristike građevinskih objekata. Regije s visokom seizmičkom aktivnošću, poput rubnih područja tektonskih ploča, često imaju strože propise i standarde za seizmički dizajn. Opterećenje potresom je dinamičko opterećenje koje se mijenja tijekom vremena, a pravilnim projektiranjem konstrukcije na potres osigurava se sigurnost konstrukcije, zaštita ljudskih života i minimizacija štete.

Za lokaciju Fužine potrebno je očitati vršno ubrzanje tla iz karte potresnog područja Hrvatske, pri čemu se razmatraju dva povratna razdoblja. Povratni period od 475 godina koji osigurava da ne dođe do rušenja te povratni period od 95 godina kako bi se osigurala dostatna uporabljivost konstrukcije i ograničila oštećenja.



Slika 20: Karta potresnih područja Republike Hrvatske, Fužine [17]

Sljedeći parametar bitan za formiranje spektra odziva je tip temeljnog tla koji se odabire na temelju geotehničkih podataka tla na mjestu izgradnje konstrukcije. Prema Eurokodu 8, odabrana je kategorija tla tipa C:

Tip temeljnog tla C → Duboki nanosi gustog ili srednje gustog pijeska, šljunka ili krute gline debljine od nekoliko desetaka metar do više stotina metara

3.4.1. Elastični spektar odziva

Elastični spektar odziva definiran je za horizontalnu komponentu potresnog djelovanja izrazima:

$$0 \leq T \leq T_B : S_e(T) = a_g S \left[1 + \frac{T}{T_B} (\eta \cdot 2,5 - 1) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_e(T) = a_g S (\eta \cdot 2,5)$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_e(T) = a_g S \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C}{T} \right]$$

$$T_D \leq T \leq 4s : S_e(T) = a_g S \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right]$$

gdje je:

$S_e(T)$ elastični spektar odziva,

T period vibracija linearnog sustava s jednim stupnjem slobode,

a_g proračunsko ubrzanje na temeljnom tlu tipa A,

T_B donja granica perioda s granom konstantnog spektralnog ubrzanja,

T_C gornja granica perioda s granom konstantnog spektralnog ubrzanja,

T_D vrijednost koja definira početak konstantnog raspona odziva u spektru pomaka,

S faktor tla,

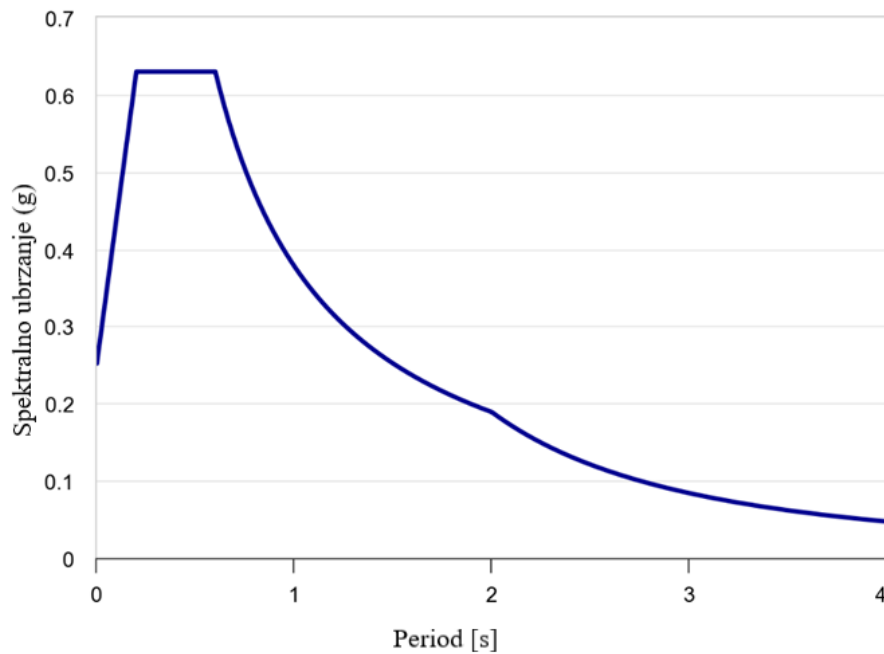
η faktor korekcije prigušenja uz poredbenu vrijednost jednaku 2 za 5%-tno viskozno prigušenje.

Prema nacionalnom dodatku norme HRN EN 1998-1 na cijelom području hrvatske prihvaćaju se elastični spektri tipa 1 i tipa 2, a za proračun se primjenjuju oba tipa spektra ili onaj koji daje veća potresna djelovanja za projektiranu građevinu.

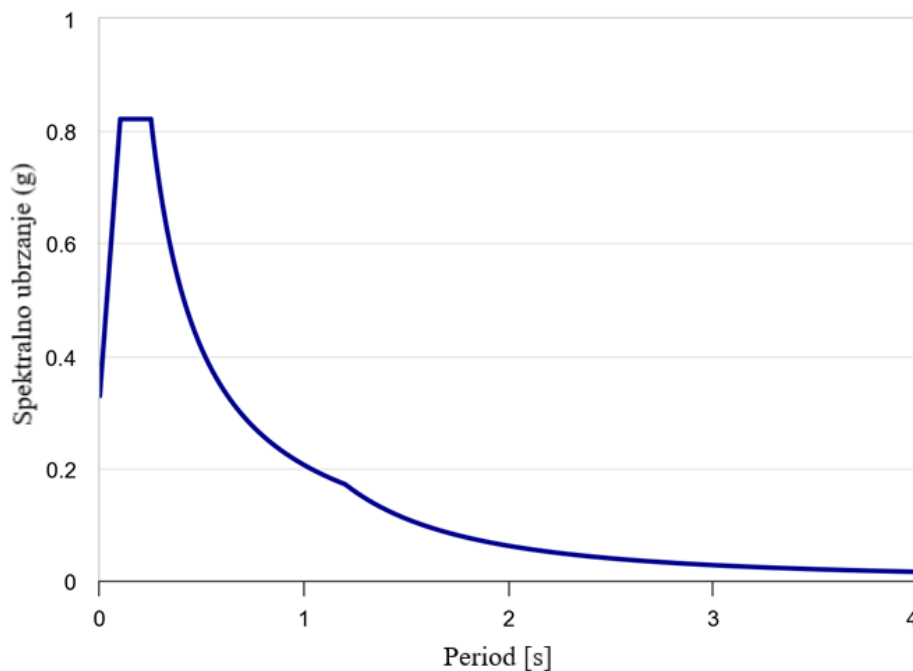
Vrsta tla	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,15	0,4	2,0
B	1,2	0,15	0,5	2,0
C	1,15	0,20	0,6	2,0
D	1,35	0,20	0,8	2,0
E	1,4	0,15	0,5	2,0

Vrsta tla	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,05	0,25	1,2
B	1,35	0,05	0,25	1,2
C	1,5	0,10	0,25	1,2
D	1,8	0,10	0,3	1,2
E	1,6	0,05	0,25	1,2

Slika 21: Vrijednosti parametara koje opisuju preporučeni elastični spektr odziva tipa 1 (a) i tipa 2(b)[17]



Slika 22: Grafički prikaz horizontalnog elastičnog spektra odziva tipa 1 za temeljno tlo tipa C i vršno ubrzanje 0,219 (5%-tno prigušenje)



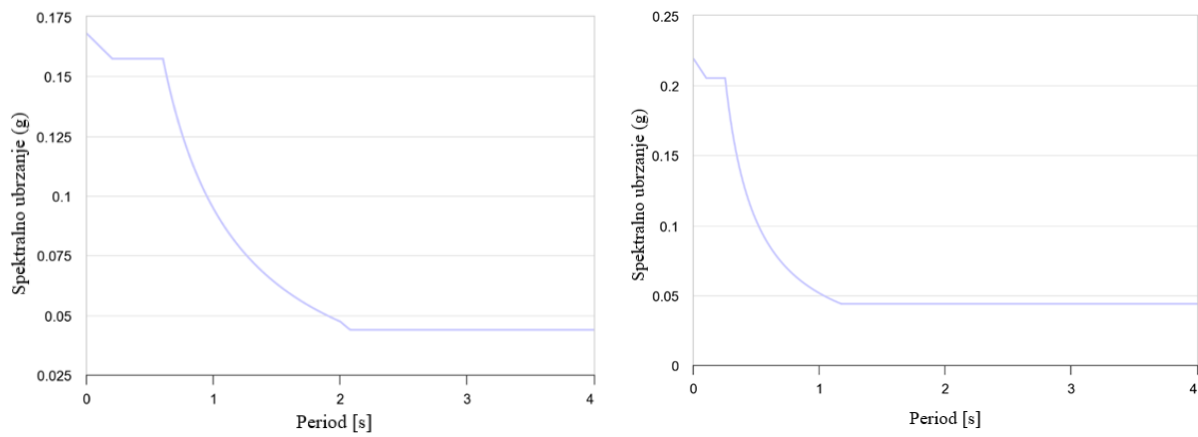
Slika 23: Grafički prikaz horizontalnog elastičnog spektra odziva tipa 2 za temeljno tlo tipa C i vršno ubrzanje 0,219 (5%-tno prigušenje)

3.4.2. Proračunski spektar odziva

Proračunski spektar odziva definira se redukcijom elastičnog spektra pomoću faktora ponašanja q koji ovisi o nosivom sustavu i materijalu konstrukcije. On uzima u obzir sposobnost konstrukcije da apsorbira energiju putem duktilnog ponašanja svojih elemenata.

Aluminij je lak metal, što znači da ima relativno nisku masu u usporedbi s drugim konstrukcijskim materijalima. Prednost manje mase konstrukcije je da će inercijske sile koje se javljaju tijekom potresa biti manje.

Prema Eurokodu 8 nije definiran faktor ponašanja za materijal aluminij i konstrukciju kupole, stoga će se kao ekvivalent uzeti faktori ponašanja definirani za čelik, okvir s centričnim dijagonalnim ukrućenjima te razredom duktilnosti DCM (srednja vrijednost duktilnosti). Odabrani faktor ponašanja iznosi $q = 4,0$.



Slika 24: Grafički prikaz horizontalnog projektog spektra odziva tipa 1 i tipa 2 i faktor ponašanja 4

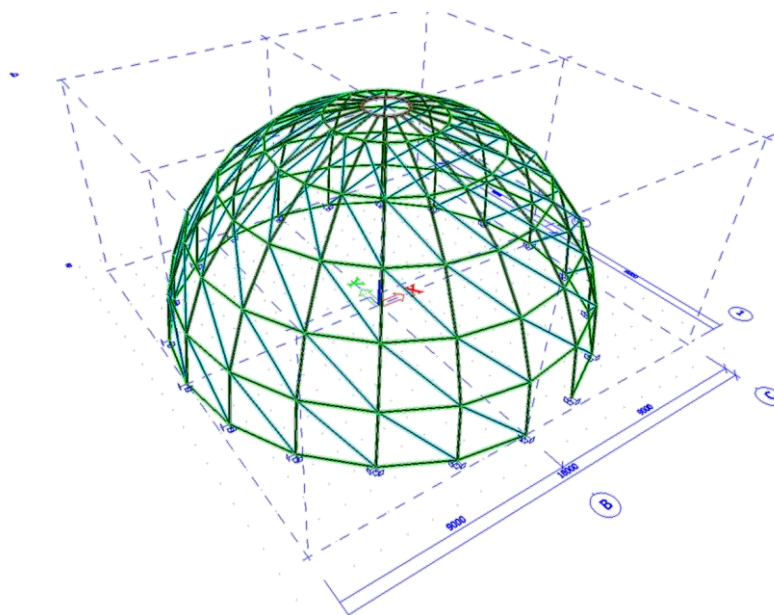
4. MODEL KONSTRUKCIJE

4.1. Geometrija i rubni uvjeti

Model konstrukcije i analiza elemenata izvedeni su pomoću računalnog alata „SCIA Engineer 22.1“. Model je konstruiran u trodimenzionalnom obliku Schwedlerove kupole, s parametrima geometrije koji obuhvaćaju promjer od 18 metara i visinu od 9 metara. Tijekom faze dimenzioniranja definirani su različiti elementi kupole, uključujući rebra, prstene i dijagonale. Na modelu kupole također je uzet u obzir prostor za vrata. Ukupno je implementirano 20 elemenata rebra, 100 elemenata prstena te 99 elemenata dijagonala, pri čemu svaka komponenta ima svoju funkciju u pogledu osiguranja stabilnosti konstrukcije.

Elementi luka imaju duljinu 13,232 metra, a međusobno se spajaju unutar tlačnog prstena. Tlačni prsten sastoji se od 20 pojedinačnih elemenata, svaki duljine 0,274 metara. Kupola je razvijena s 20 punih lukova i 5 punih prstenova uz dodatak dijagonala kako bi se osigurala potrebna čvrstoća i stabilnost konstrukcije.

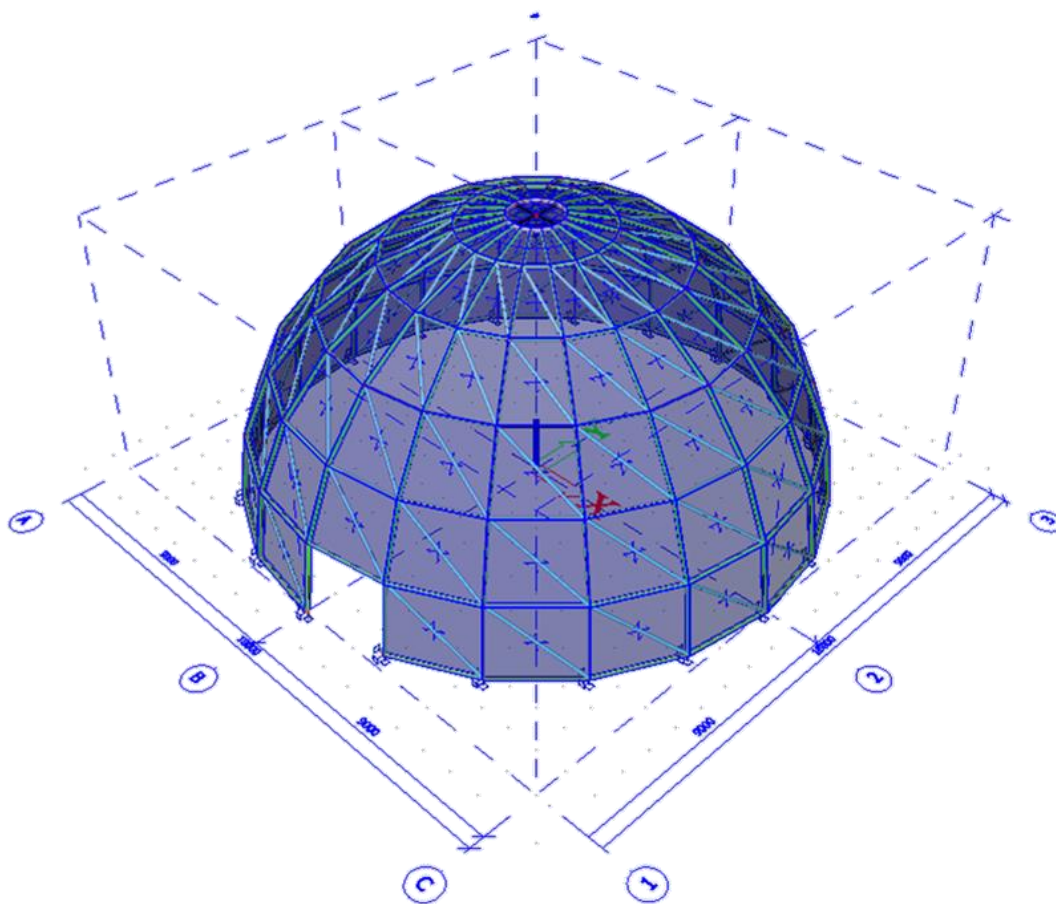
Oslonci su modelirani kao „fixed“ s onemogućenim pomicanjem u svim smjerovima. Na posljednjem elementu luka postavljen je uvjet otpuštanja momenta pomoću naredbe "hinge on beam", kako bi se modelirao oslonac luka u smjeru lokalne osi tog posljednjeg elementa. Oslonci su konceptualizirani kao zglobovi u smjeru lokalne osi luka. Na vrhu luka, kod tlačnog prstena, oslobođen je moment M_y .



Slika 25: Prikaz modela kupole

4.2. Unos opterećenja

U programu SCIA vlastita težina automatski se uzima u obzir pomoću naredbe „self weight“, dok se površinska opterećenja kao što su dodatno stalno, snijeg i vjetar moraju definirati ručno. Za unos ovih površinskih opterećenja modelirano je 123 panela. Paneli su omogućili pojednostavljeni unos opterećenja koje je zadano na njihovu površinu po kvadratnom metru, a dalje se prenosi na elemente u skladu s njihovim djelovanjem.



Slika 26: Prikaz modela kupole sa panelima za unos opterećenja

Name	Description	Action type	Load group	Direction	Master load case
	Spec	Load type			
LC1	Self weight	Permanent Self weight	LG1	-Z	
LC2	Dodatno stalno	Permanent Standard	LG1		
LC3	Snijeg 1 Snow	Variable Static	LG2		None
LC4	Snijeg 2 (Z+/Z-) Snow	Variable Static	LG2		None
LC5	Snijeg 2 (X+) Snow	Variable Static	LG2		None
LC6	Snijeg 2 (X-) Snow	Variable Static	LG2		None
LC7	Vjetar 1 (X+) Static wind	Variable Static	LG3		None
LC8	Vjetar 1 (X-) Static wind	Variable Static	LG3		None
LC9	Vjetar 1 (Z+/Z-) Static wind	Variable Static	LG3		None
LC10	Vjetar 2 (X+) Static wind	Variable Static	LG3		None
LC11	Vjetar 3 (X-) Static wind	Variable Static	LG3		None
LC12	Vjetar 4 (Z+/Z-) Static wind	Variable Static	LG3		None
LC13	Potres X tip 1 Seismicity	Variable Dynamic	LG4		None
LC14	Potres X tip 2 Seismicity	Variable Dynamic	LG5		None
LC15	Potres Y tip 1 Seismicity	Variable Dynamic	LG4		None
LC16	Potres Y tip 2 Seismicity	Variable Dynamic	LG5		None

Slika 27: Slučajevi opterećenja

Name	Load	Relation	Type
LG1	Permanent		
LG2	Variable	Exclusive	Snow
LG3	Variable	Exclusive	Wind
LG4	Seismic	Together	
LG5	Seismic	Together	

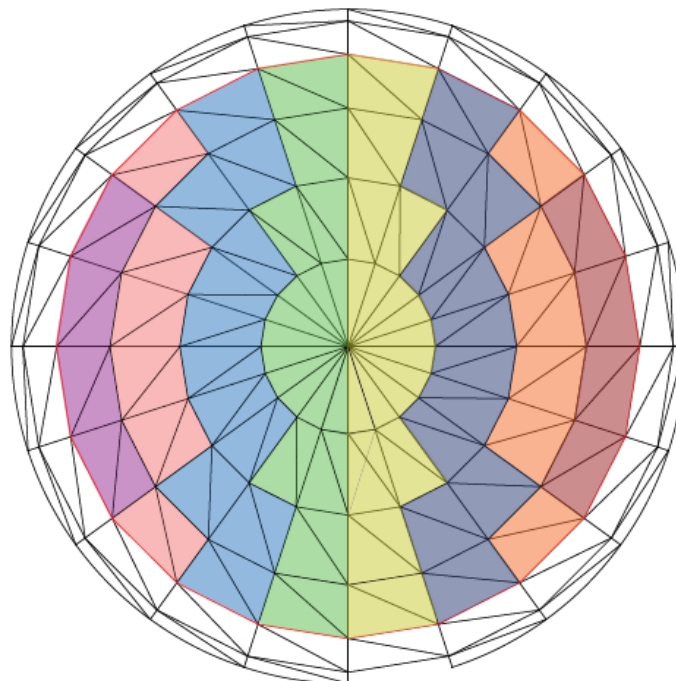
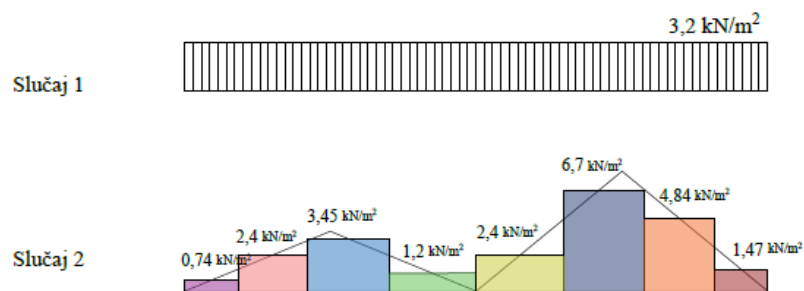
Slika 28: Grupe opterećenja

Unos opterećenja - Dodatno stalno

Dodatno stalno opterećenje iznosa $0,34 \text{ kN/m}^2$ raspoređeno je na sve panele u modelu u gravitacijskom smjeru.

Unos opterećenja - Snijeg – simetrično i asimetrično

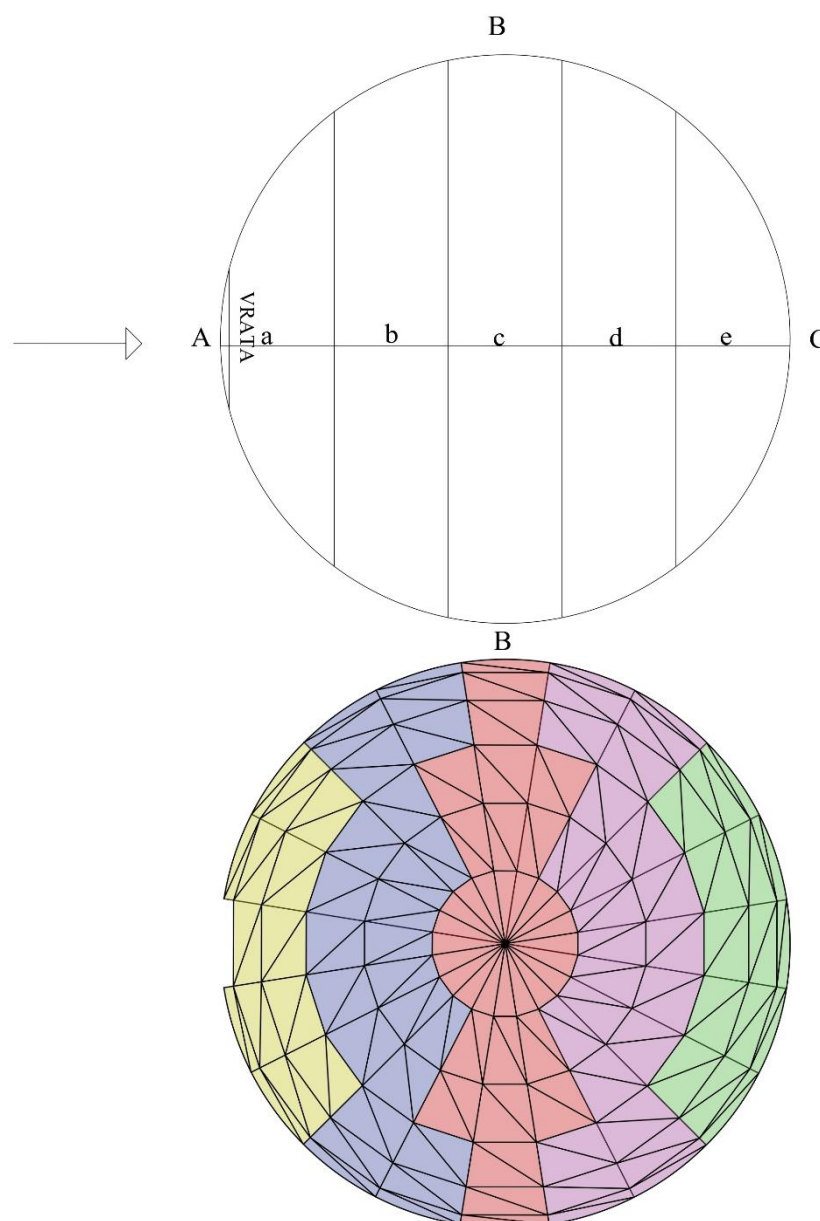
Simetrično opterećenje snijegom jednoliko je te iznosi $3,2 \text{ kN/m}^2$, a nanosi se na panele unutar duljine djelovanja opterećenja snijegom, tj, gdje su elementi kupole manji od 60 stupnjeva u odnosu na horizontalu. Za nanose snijega pri asimetričnom slučaju opterećenja snijegom linearne vrijednosti aproksimirane su u jednoliko skokovito opterećenje kao što je prikazano na Slici 29., te je nanoseno na odgovarajuće panele. U modelu su definirana 4 slučaja opterećenja snijegom s obzirom na njegovo djelovanje i smjer puhanja vjetrova.



Slika 29: Prikaz načina unosa opterećenja asimetričnog snijega

Unos opterećenja - Vjetar

Na sličan način kao i snijeg unesene su vrijednosti za opterećenje vjetrom s obzirom na podatke dobivene u analizi opterećenja. Segmenti su uzeti u obzir s obzirom na zone puhanja definirane u normi. Definirane su slučajevi opterećenja za sve varijante i smjerove puhanja vjetra. Odgovarajući podaci nanoseni su na panele prema dijagramu na Slici 30. :



Slika 30: Prikaz načina unosa opterećenja vjetrom; primjer za vjetra koji puše u smjeru X+

4.3. Kombinacije opterećenja

Kombinacije opterećenja za provjeru graničnog stanja nosivosti

U provjeri graničnog stanja nosivosti konstrukcija obuhvaća se integracija statičkih i dinamičkih opterećenja, kao što su vlastita težina, stalna opterećenja, snijeg, vjetar i potencijalni seizmički utjecaji. Opterećenja se kombiniraju uz primjenu faktora sigurnosti kako bi se osigurala pouzdanost konstrukcije. Računalni programi za analizu konstrukcija koriste se za precizno izračunavanje utjecaja različitih opterećenja, a specifični standardi i norme određuju smjernice za izračune. Kombinacije opterećenja osiguravaju da konstrukcija bude sigurna i izdržljiva tijekom svog životnog vijeka, uzimajući u obzir različite scenarije opterećenja.

Razmotrit će se kombinacije djelovanja s obzirom na vodeće i prateće promjenjivo djelovanje. Parcijalni koeficijenti sigurnosti i faktori kombinacije promjenjivih djelovanja primijenjeni su u skladu s normom HRN EN 1990.

Jednadžba za granično stanje nosivosti:

$$Q_{Ed} = \sum_i \gamma_{G,i} G_{k,i} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{j < 1} \gamma_{Q,j} \psi_{0,j} Q_{k,j}$$

$G_{k,i}$ – karakteristično opterećenje uzrokovano stalnim djelovanjem

$Q_{k,j}$ – karakteristično opterećenje uzrokovano promjenjivim djelovanjem

$\gamma_{G,i}$ – parcijalni koeficijent sigurnosti za stalna djelovanja (1,35 za nepovoljnu situaciju)

$\gamma_{Q,j}$ – parcijalni koeficijent sigurnosti za promjenjiva djelovanja (1,50 za nepovoljnu situaciju)

$\psi_{0,j}$ – faktor kombinacije za promjenjiva djelovanja (0,50 za opterećenje snijegom; 0,60 za opterećenje vjetrom)

Kombinacije opterećenja za provjeru graničnog stanja uporabivosti

Granično stanje uporabivosti pri dizajniranju konstrukcija fokusira se na osiguravanje udobnosti, sigurnosti i funkcionalnosti konstrukcije za korisnike tijekom njezinog životnog vijeka. Cilj je ograničiti deformacije, vibracije i druge neželjene pojave koje bi mogle utjecati na udobnost korisnika. Faktori sigurnosti i specifični standardi igraju ključnu ulogu u osiguranju da konstrukcija ispuni zahtjeve SLS-a i održi svoju funkcionalnost i udobnost kroz vrijeme.

Jednadžba za granično stanje uporabivosti:

$$Q_{Ed} = \sum_i G_{k,i} + Q_{k,1} + \sum_{j < 1} \psi_{0,j} Q_{k,j}$$

Glavna djelovanja kod graničnog stanja uporabivosti množena su s parcijalnim faktorom 1,00, a koeficijenti kombinacije uzeti su s vrijednostima 0,5 za snijeg te 0,6 za vjetar.

Kombinacije opterećenja za potresno djelovanje

Za potresno djelovanje dodana su četiri slučaja opterećenja za x i y smjer te za dva tipa spektra koji su prethodno definirani na temelju ubrzanja tla na lokaciji građevine i tipa tla. Grupe masa definirane su za stalno djelovanje – vlastita težina i dodatno stalno djelovanje. U kombinacijama u obzir su uzeta samo stalna opterećenja s potresnim djelovanjem, dok opterećenja koja proizlaze iz snijega i vjetra nisu uključena u ovu analizu. Navedene kombinacije glase prema jednadžbi :

Potres djeluje u globalnom x smjeru: $Q_{Ed} = 1,00 \cdot \sum_i G_{k,i} + 1,00 \cdot e_x + 0,30 \cdot e_y$

Potres djeluje u globalnom y smjeru: $Q_{Ed} = 1,00 \cdot \sum_i G_{k,i} + 0,30 \cdot e_x + 1,00 \cdot e_y$

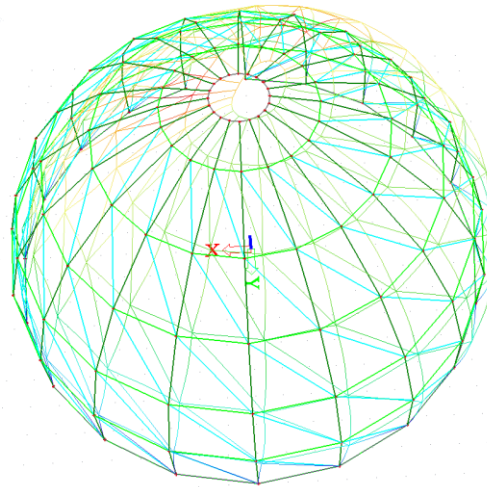
e_x – opterećenje uzrokovano potresnim djelovanjem na konstrukciju u globalnom smjeru x

e_y – opterećenje uzrokovano potresnim djelovanjem na konstrukciju u globalnom smjeru y

S obzirom na karakteristike aluminija, te vodećim vrijednostima preostalih opterećenja, potresna djelovanja neće biti mjerodavna komponenta kod dimenzioniranja.

3D displacement

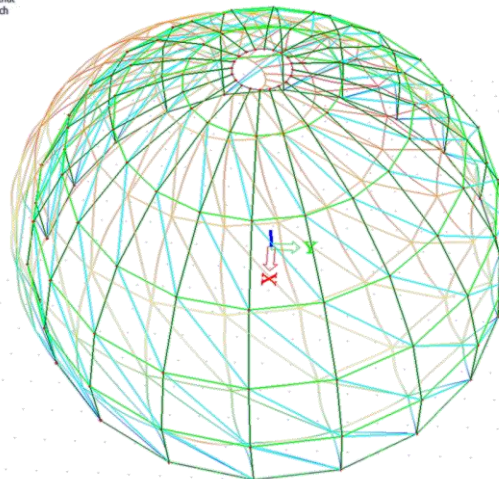
Values: U_{total}
 Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.
 Mass combination: CM1/1 - 4,54
 Selection: All
 Location: In nodes avg., System: Global



Slika 31: Prikaz prvog moda izvijanja – translacija u x smjeru, $f = 4,54$ Hz

3D displacement

Values: U_{total}
 Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.
 Mass combination: CM1/2 - 4,69
 Selection: All
 Location: In nodes avg., System: Global



Slika 32: Prikaz drugog moda izvijanja – translacija u y smjeru, $f = 4,69$ Hz

Eigen frequencies

N	f [Hz]	ω [1/s]	ω^2 [1/s ²]	T [s]
Mass combination : CM1				
1	4,54	28,53	813,79	0,22
2	4,69	29,47	868,59	0,21
3	4,74	29,76	885,54	0,21
4	4,74	29,79	887,64	0,21
5	4,96	31,17	971,35	0,20
6	5,06	31,78	1009,69	0,20
7	5,20	32,66	1066,43	0,19
8	5,20	32,67	1067,51	0,19
9	5,20	32,69	1068,50	0,19
10	5,20	32,69	1068,85	0,19

Slika 33: Prikaz Eigen frequencies

Name	Description	Type	Load cases	Coeff. [·]
GSN1		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC3 - Snijeg 1	1,500
GSN2		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC4 - Snijeg 2 (Z+/Z-)	1,500
GSN3		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC5 - Snijeg 2 (X+)	1,500
GSN4		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC6 - Snijeg 2 (X-)	1,500
GSN5		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC7 - Vjetar 1 (X+)	1,500
GSN6		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC8 - Vjetar 1 (X-)	1,500
GSN7		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC9 - Vjetar 1 (Z+/Z-)	1,500
GSN8		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC10 - Vjetar 2 (X+)	1,500
GSN9		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC11 - Vjetar 3 (X-)	1,500
GSN10		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC12 - Vjetar 4 (Z+/Z-)	1,500
GSN11		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC7 - Vjetar 1 (X+)	1,500
GSN12		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC8 - Vjetar 1 (X-)	1,500
GSN13		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC9 - Vjetar 1 (Z+/Z-)	1,500
GSN14		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC10 - Vjetar 2 (X+)	1,500
GSN15		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC11 - Vjetar 3 (X-)	1,500
GSN16		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC12 - Vjetar 4 (Z+/Z-)	1,500
GSN17		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC3 - Snijeg 1	1,500
			LC7 - Vjetar 1 (X+)	0,900
GSN18		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC3 - Snijeg 1	1,500
			LC8 - Vjetar 1 (X-)	0,900
GSN19		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC3 - Snijeg 1	1,500
			LC9 - Vjetar 1 (Z+/Z-)	0,900
GSN20		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC3 - Snijeg 1	1,500
			LC10 - Vjetar 2 (X+)	0,900
GSN21		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC3 - Snijeg 1	1,500
			LC11 - Vjetar 3 (X-)	0,900
GSN22		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC3 - Snijeg 1	1,500
			LC12 - Vjetar 4 (Z+/Z-)	0,900
GSN23		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC4 - Snijeg 2 (Z+/Z-)	1,500

Slika 34: Kombinacije djelovanja

Name	Description	Type	Load cases	Coeff. [-]
GSN36		Linear - ultimate	LC9 - Vjetar 1 (Z+/Z-)	0,900
			LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC5 - Snijeg 2 (X+)	1,500
			LC10 - Vjetar 2 (X+)	0,900
GSN24		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC5 - Snijeg 2 (X+)	1,500
			LC7 - Vjetar 1 (X+)	0,900
GSN37		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC6 - Snijeg 2 (X-)	1,500
			LC11 - Vjetar 3 (X-)	0,900
GSN25		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC6 - Snijeg 2 (X-)	1,500
			LC11 - Vjetar 3 (X-)	0,900
GSN26		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC4 - Snijeg 2 (Z+/Z-)	1,500
			LC12 - Vjetar 4 (Z+/Z-)	0,900
GSN27		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC3 - Snijeg 1	0,750
			LC7 - Vjetar 1 (X+)	1,500
GSN28		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC3 - Snijeg 1	0,750
			LC8 - Vjetar 1 (X-)	1,500
GSN29		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC3 - Snijeg 1	0,750
			LC9 - Vjetar 1 (Z+/Z-)	1,500
GSN30		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC3 - Snijeg 1	0,750
			LC10 - Vjetar 2 (X+)	1,500
GSN31		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC3 - Snijeg 1	0,750
			LC11 - Vjetar 3 (X-)	1,500
GSN32		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC3 - Snijeg 1	0,750
			LC12 - Vjetar 4 (Z+/Z-)	1,500
GSN33		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC4 - Snijeg 2 (Z+/Z-)	0,750
			LC9 - Vjetar 1 (Z+/Z-)	1,500
GSN34		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC4 - Snijeg 2 (Z+/Z-)	0,750
			LC12 - Vjetar 4 (Z+/Z-)	1,500
GSN35		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC5 - Snijeg 2 (X+)	0,750
			LC7 - Vjetar 1 (X+)	1,500
GSN38		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC5 - Snijeg 2 (X+)	0,750
			LC10 - Vjetar 2 (X+)	1,500
GSN39		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC6 - Snijeg 2 (X-)	0,750
			LC8 - Vjetar 1 (X-)	1,500
GSN40		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,350
			LC2 - Dodatno stalno	1,350
			LC6 - Snijeg 2 (X-)	0,750
			LC11 - Vjetar 3 (X-)	1,500
GSU1		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC3 - Snijeg 1	1,000
GSU2		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC4 - Snijeg 2 (Z+/Z-)	1,000
GSU3		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000

Slika 35: Kombinacije djelovanja

Name	Description	Type	Load cases	Coeff. [-]
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC5 - Snijeg 2 (X+)	1,000
GSU4		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC6 - Snijeg 2 (X-)	1,000
GSU5		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC7 - Vjetar 1 (X+)	1,000
GSU6		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC8 - Vjetar 1 (X-)	1,000
GSU7		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC9 - Vjetar 1 (Z+/Z-)	1,000
GSU8		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC10 - Vjetar 2 (X+)	1,000
GSU9		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC11 - Vjetar 3 (X-)	1,000
GSU10		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC12 - Vjetar 4 (Z+/Z-)	1,000
GSU11		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC3 - Snijeg 1	1,000
			LC7 - Vjetar 1 (X+)	0,600
GSU12		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC3 - Snijeg 1	1,000
			LC8 - Vjetar 1 (X-)	0,600
GSU13		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC3 - Snijeg 1	1,000
			LC9 - Vjetar 1 (Z+/Z-)	0,600
GSU14		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC3 - Snijeg 1	1,000
			LC10 - Vjetar 2 (X+)	0,600
GSU15		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC3 - Snijeg 1	1,000
			LC11 - Vjetar 3 (X-)	0,600
GSU16		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC3 - Snijeg 1	1,000
			LC12 - Vjetar 4 (Z+/Z-)	0,600
GSU17		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC4 - Snijeg 2 (Z+/Z-)	1,000
			LC9 - Vjetar 1 (Z+/Z-)	0,600
GSU18		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC4 - Snijeg 2 (Z+/Z-)	1,000
			LC12 - Vjetar 4 (Z+/Z-)	0,600
GSU19		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC5 - Snijeg 2 (X+)	1,000
			LC7 - Vjetar 1 (X+)	0,600
GSU20		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC5 - Snijeg 2 (X+)	1,000
			LC10 - Vjetar 2 (X+)	0,600
GSU21		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC6 - Snijeg 2 (X-)	1,000
			LC8 - Vjetar 1 (X-)	0,600
GSU22		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC6 - Snijeg 2 (X-)	1,000
			LC11 - Vjetar 3 (X-)	0,600
GSU23		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC3 - Snijeg 1	0,500
			LC7 - Vjetar 1 (X+)	1,000
GSU24		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000

Slika 36: Kombinacije djelovanja

Name	Description	Type	Load cases	Coeff. [-]
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC3 - Snijeg 1	0,500
			LC8 - Vjetar 1 (X-)	1,000
GSU25		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC3 - Snijeg 1	0,500
			LC9 - Vjetar 1 (Z+/Z-)	1,000
GSU26		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC3 - Snijeg 1	0,500
			LC10 - Vjetar 2 (X+)	1,000
GSU27		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC3 - Snijeg 1	0,500
			LC11 - Vjetar 3 (X-)	1,000
GSU28		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC3 - Snijeg 1	0,500
			LC12 - Vjetar 4 (Z+/Z-)	1,000
GSU29		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC4 - Snijeg 2 (Z+/Z-)	0,500
			LC9 - Vjetar 1 (Z+/Z-)	1,000
GSU30		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC4 - Snijeg 2 (Z+/Z-)	0,500
			LC12 - Vjetar 4 (Z+/Z-)	1,000
GSU31		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC5 - Snijeg 2 (X+)	0,500
			LC7 - Vjetar 1 (X+)	1,000
GSU32		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC5 - Snijeg 2 (X+)	0,500
			LC10 - Vjetar 2 (X+)	1,000
GSU33		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC6 - Snijeg 2 (X-)	0,500
			LC8 - Vjetar 1 (X-)	1,000
GSU34		Linear - serviceability	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC6 - Snijeg 2 (X-)	0,500
			LC11 - Vjetar 3 (X-)	1,000
POTRES1		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC13 - Potres X tip 1	1,000
			LC15 - Potres Y tip 1	0,300
POTRES2		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC13 - Potres X tip 1	0,300
			LC15 - Potres Y tip 1	1,000
POTRES3		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC14 - Potres X tip 2	1,000
			LC16 - Potres Y tip 2	0,300
POTRES4		Linear - ultimate	LC1 - Self weight	1,000
			LC2 - Dodatno stalno	1,000
			LC14 - Potres X tip 2	0,300
			LC16 - Potres Y tip 2	1,000

Slika 37: Kombinacije djelovanja



4.4. Proračun

Proračun unutarnjih sila i momenata u konstrukciji se može provesti na dva načina. Prva metoda, teorija prvoga reda, linearna je analiza i temelji se na početnom geometrijskom obliku konstrukcije. Druga, nelinearna analiza ili teorija drugoga reda, uzima u obzir utjecaj deformiranja konstrukcije.

Kada deformacije imaju značajan utjecaj na ponašanje konstrukcije ili dovode do značajnog povećanja unutarnjih sila i momenata, preporučuje se primjena teorije drugoga reda. S druge strane, ako se povećanje unutarnjih sila ili momenata može zanemariti, te ako deformacije ne uzrokuju bitne promjene u ponašanju konstrukcije, tada je primjena teorije prvoga reda prikladna. Ovaj odabir teorije ovisi o specifičnim uvjetima i zahtjevima stabilnosti i sigurnosti konstrukcije.

Da bi se odredilo koji pristup koristiti, može se primijeniti kriterij koji se izražava formulom:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{Ed}}{F_{cr}} \geq 10$$

Gdje α_{cr} predstavlja faktor povećanja proračunskog opterećenja koje uzrokuje elastičnu nestabilnost, F_{Ed} je ukupno vertikalno proračunsko opterećenje na konstrukciju, a F_{cr} je elastično kritično opterećenje koje dovodi do bočne nestabilnosti.

Izbor između linearne analize i nelinearne analize ovisi o vrijednosti parametra alfa kritično koji se može odrediti pomoću analize stabilnosti u računalnom programu SCIA Engineer kako bi se utvrdili odgovarajući modovi izvijanja. Ako je alfa kritično veće od 10, koristi se linearna analiza prvog reda i konstrukcija se gleda kao pomična, inače se preporučuje nelinearna analiza za preciznije modeliranje ponašanja konstrukcije.

Provedena je linearna analiza stabilnosti za sve kombinacije graničnog stanja nosivosti te prvih nekoliko modova izvijanja iznose:

Linear stability: OK

Number of buckling modes: 1

First critical load factor:

S1: 6.42

S2: 4.64

S3: 6.42

S4: 4.64

S5: 4.63

...

Slika 38: Prikaz prvih 5 kritičnih faktora izvijanja

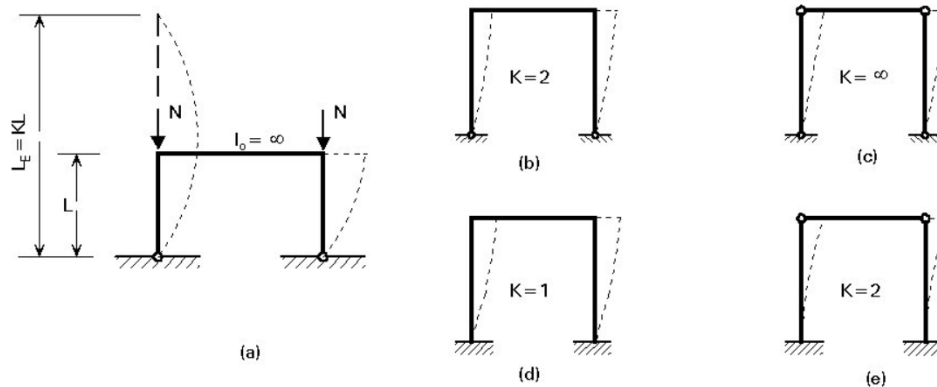
S obzirom na nepovoljne kritične faktore, konstrukcija se smatra pomičnom i provedet će se nelinearna analiza.

Ključne pretpostavke u nelinearnoj analizi uključuju osiguravanje ravnoteže u deformiranom obliku, uzimanje u obzir učinka aksijalnih sila na savojnu krutost nosača, razmatranje nelinearnih oslonaca i pretpostavku linearne elastičnosti materijala konstrukcije.[11]

Definiraju se nelinearne kombinacije kao i lokalne i globalne imperfekcije definirane prema smjericama Eurokoda. Imperfekcije se definiraju na razini nelinearne kombinacije: svaka nelinearna kombinacija može imati vlastiti skup imperfekcija. Ovo je korisno jer različiti scenariji opterećenja izazivaju različite načine otkazivanja, koji su zauzvrat više ili manje podložni određenom obliku imperfekcija. Najpraktičniji način dodjele vrijednosti imperfekcija je upućivanje (putem postavki kombinacije) na postavke savijanja. [12]

Pomični okviri nemaju odgovarajuću krutost protiv horizontalnih sila u ravnini, stoga bi u analizi trebalo uzeti u obzir dodatne sile ili momente koji proizlaze iz horizontalnih pomaka. Faktori koji utječu na pomičnost kod okvira su prisutnost nebalansiranog horizontalnog opterećenja na okvir, nesimetrično ili ekscentrično vertikalno opterećenje, nesimetrična geometrija konstrukcije, nejednoliki presjeci stupova u okviru i različiti krajnji uvjeti stupova okvira.

S obzirom da je konstrukcija klasificirana kao pomična vrijednosti faktora efektivne dužine su 1 ili veće od 1.



Slika 39: Izvijanje stupa kod pomičnog okvira [x]

Osjetljivi elementi bili su elementi rebra, te su prema približnom proračunu duljina izvijanja koje radi SCIA dimenzionirani s kritičnom duljinom 13,232 m, odnosno duljinom poluluka od oslonca do tlačnog prstena. Elementi prstena i dijagonala dimenzionirani su s duljinom izvijanja jednakoj svojoj duljini L.



5. DIMENZIONIRANJE

U kontekstu dokaza pouzdanosti nosivih konstrukcija, ključno je osigurati da konstrukcija zadovoljava sve granične zahtjeve koji se mogu pojaviti tijekom izgradnje i tijekom vijeka trajanja. Pouzdanost obuhvaća aspekte sigurnosti, uporabljivosti i trajnosti konstrukcije. Granična stanja nosivosti koncentrirana su na osiguravanje da konstrukcija može podnijeti opterećenja i održati ravnotežu, dok su granična stanja uporabljivosti usmjerena na dokazivanje sposobnosti konstrukcije da podnese deformacije ili vibracije. Proračun na razini poprečnog presjeka provodi se kako bi se analizirali kritični presjeci na pojedinom nosivom elementu. Dokaz pouzdanosti na razini elementa uključuje i razmatranje problema stabilnosti samog elementa, što je ključno za osiguravanje njegove pouzdanosti.

U okviru diplomskog rada, analiza dimenzioniranja elemenata provedena je u programskom paketu „SCIA Engineer 22.1“ za granično stanje nosivosti i uporabivosti prema standardima Eurokoda 1999 (EC – EN 1999) za aluminijske konstrukcije s dizajniranjem na provjeru graničnih uvjeta nosivosti (Aluminium ULS Check – Ultimate Limit State). Nakon dobivenih rezultata iz računalnog programa provelo se ručno dimenzioniranje svih skupina elemenata konstrukcije: meridijalna rebra, prsteni, dijagonale i tlačni prsten.

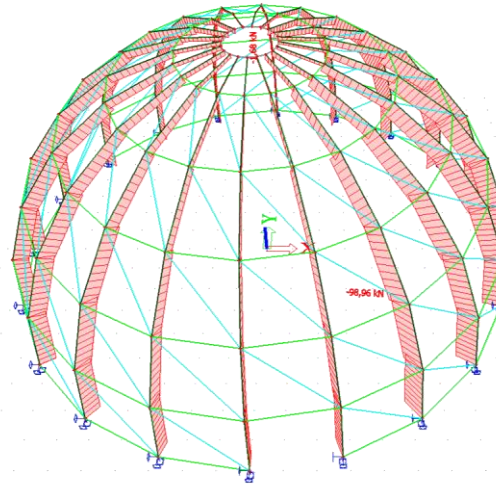
Odabrani su elementi koji su analizom u računalnom programu dali najveće vrijednosti iskoristivosti.

5.1. Unutarnje sile i momenti savijanja

Proračunske vrijednosti mjerodavnih naprezanja potrebnih za dimenzioniranje prema

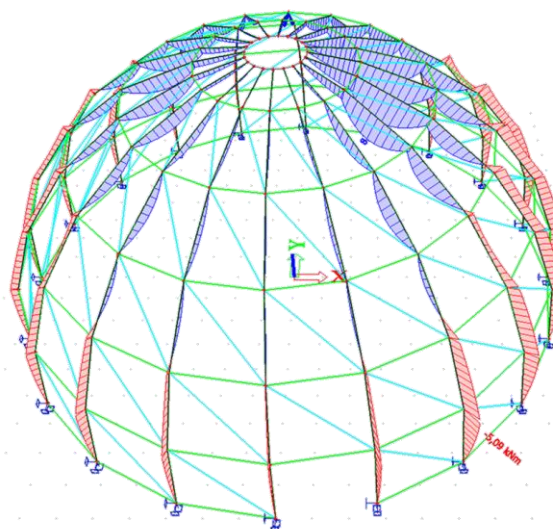
Vrijednosti mjerodavnih sila i momenata za poprečni presjek meridijalnih rebra:

1D Internal forces
Values: N
Nonlinear calculation
NonLinear Combi: NC_GSN2.2
Coordinate system: Principal
Extreme 1D: Global
Selection: All
Filter: Cross-section = Rebra -
SHS180/180/12.0



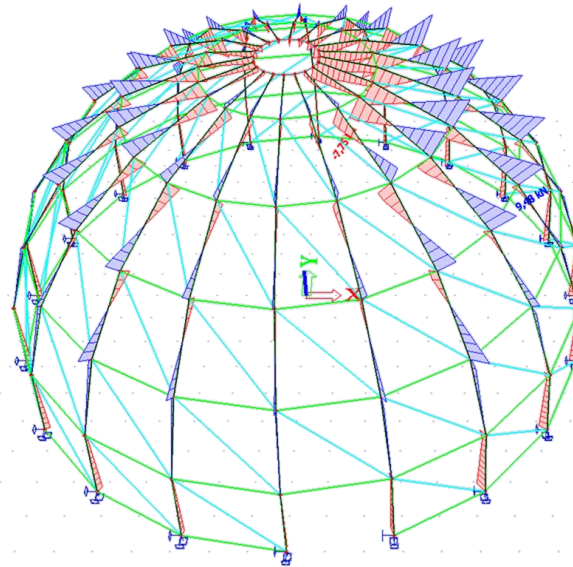
Slika 40: Proračunska vrijednost uzdužne sile za poprečni presjek rebra i mjerodavnu kombinaciju GSN 2

1D Internal forces
Values: M_y
Nonlinear calculation
NonLinear Combi: NC_GSN2.2
Coordinate system: Principal
Extreme 1D: Global
Selection: All
Filter: Cross-section = Rebra -
SHS180/180/12.0



Slika 41: Proračunska vrijednost momenta savijanja za poprečni presjek rebra i mjerodavnu kombinaciju GSN 2

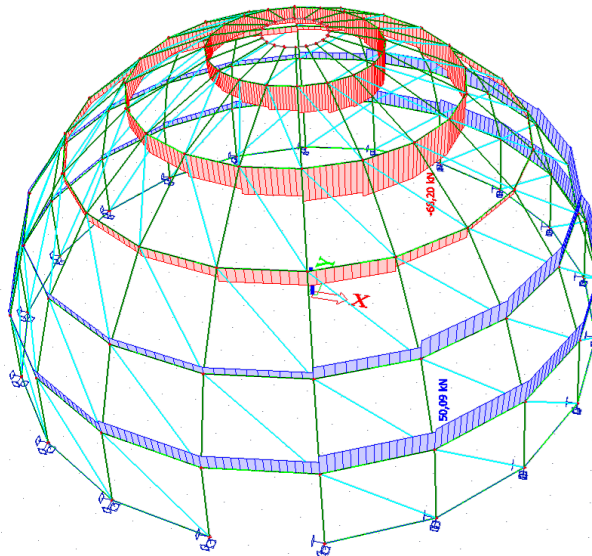
1D internal forces
Values: V_z
Nonlinear calculation
NonLinear Combi: NC_GSN2.2
Coordinate system: Principal
Extreme 1D: Global
Selection: All
Filter: Cross-section = Rebra -
SHS180/180/12.0



Slika 42: Proračunska vrijednost poprečne sile za poprečni presjek rebra i mjerodavnu kombinaciju GSN 2

Vrijednosti mjerodavnih sila i momenata za poprečni presjek prstena:

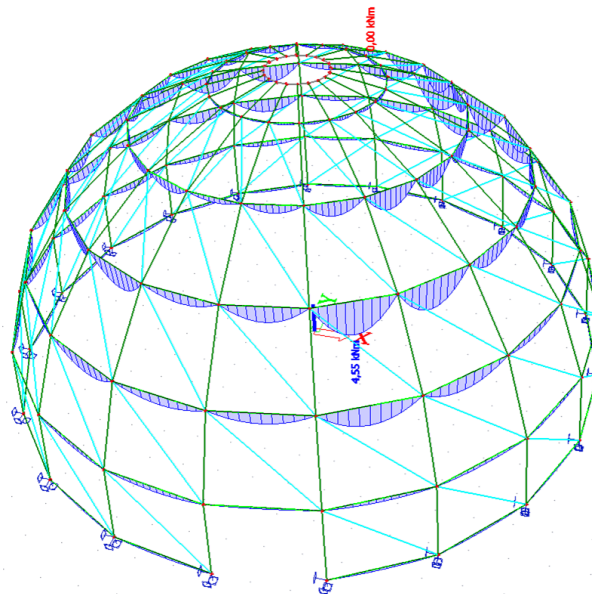
1D internal forces
Values: N
Nonlinear calculation
NonLinear Combi: NC_GSN26.2
Coordinate system: Principal
Extreme 1D: Global
Selection: All
Filter: Cross-section = Prsten -
CHS114.3/3.6



Slika 43: Proračunska vrijednost uzdužne sile za poprečni presjek prstena i mjerodavnu kombinaciju GSN 26

1D internal forces

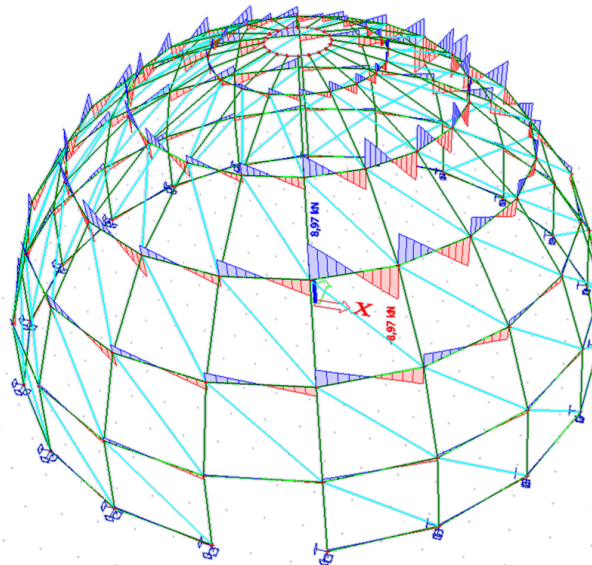
Values: M_y
Nonlinear calculation
NonLinear Combi: NC_GSN26.2
Coordinate system: Principal
Extreme 1D: Global
Selection: All
Filter: Cross-section = Prsten -
CH5114.3/3.6



Slika 44: Proračunska vrijednost momenta savijanja za poprečni presjek prstena i mjerodavnu kombinaciju GSN 26

1D internal forces

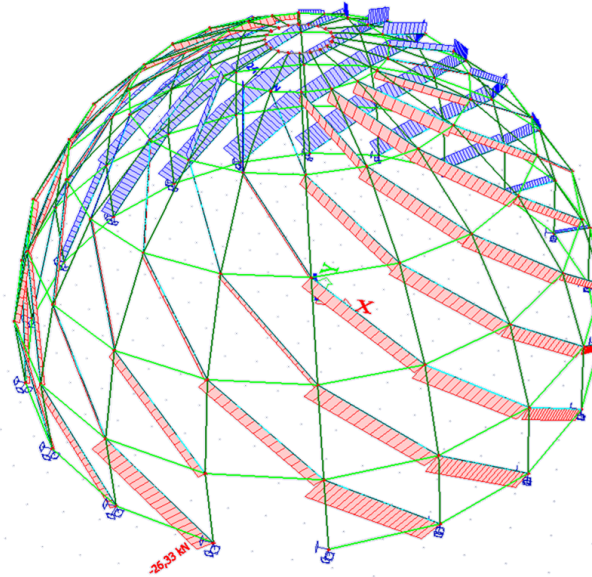
Values: V_z
Nonlinear calculation
NonLinear Combi: NC_GSN26.2
Coordinate system: Principal
Extreme 1D: Global
Selection: All
Filter: Cross-section = Prsten -
CH5114.3/3.6



Slika 45: Proračunska vrijednost poprečne sile za poprečni presjek prstena i mjerodavnu kombinaciju GSN 26

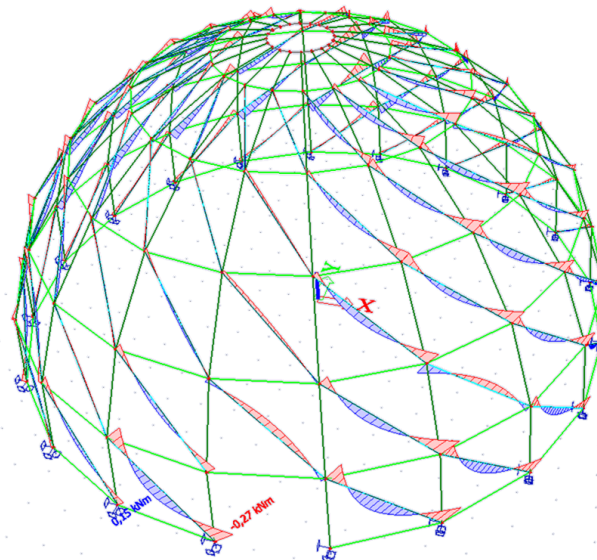
Vrijednosti mjerodavnih sila i momenata za poprečni presjek dijagonala:

1D internal forces
Values: **N**
Nonlinear calculation
NonLinear Combi: NC_GSN16.1
Coordinate system: Principal
Extreme 1D: Global
Selection: All
Filter: Cross-section = Dijagonale -
CH588.9/3.2



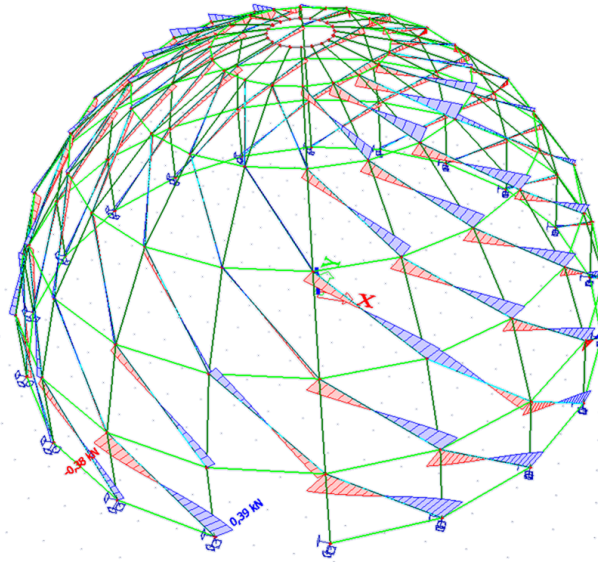
Slika 46: Proračunska vrijednost uzdužne sile za poprečni presjek dijagonala i mjerodavnu kombinaciju GSN 16

1D internal forces
Values: **M_y**
Nonlinear calculation
NonLinear Combi: NC_GSN16.1
Coordinate system: Principal
Extreme 1D: Global
Selection: All
Filter: Cross-section = Dijagonale -
CH588.9/3.2



Slika 47: Proračunska vrijednost momenata savijanja za poprečni presjek dijagonala i mjerodavnu kombinaciju GSN 16

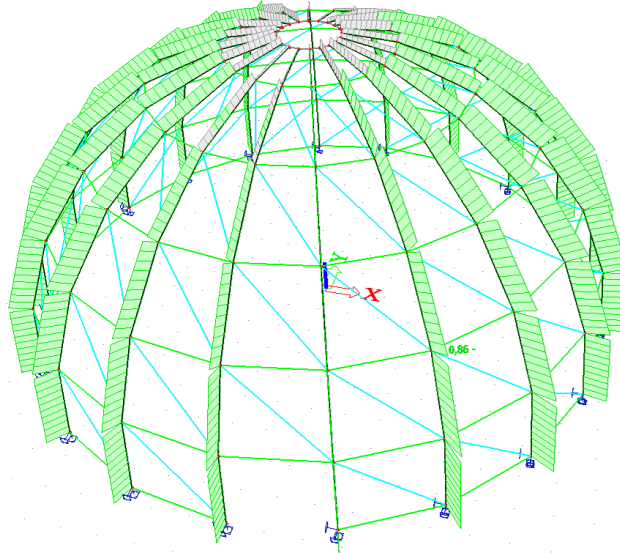
1D internal forces
Values: V_z
Nonlinear calculation
NonLinear Combi: NC_GSN16.1
Coordinate system: Principal
Extreme 1D: Global
Selection: All
Filter: Cross-section = Dijagonale -
CHS88.9/3.2



Slika 48: Proračunska vrijednost poprečnih sila za poprečni presjek dijagonala i mjerodavnu kombinaciju GSN 16

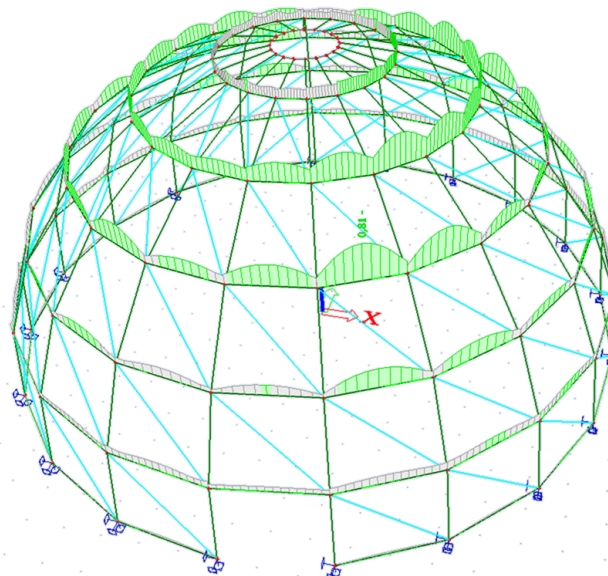
5.2. Iskorištenost elemenata računalnog dimenzioniranja za mjerodavnu kombinaciju

EC-EN 1999 Aluminium check ULS
Values: $U_{Coverall}$
Nonlinear calculation
NonLinear Combi: NC_GSN2.2
Coordinate system: Principal
Extreme 1D: Global
Selection: All
Filter: Cross-section = Rebra -
SHS180/180/12.0



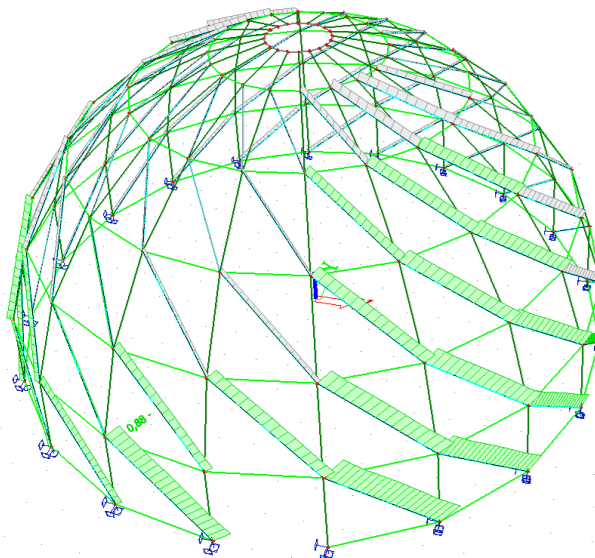
Slika 49: Iskorištenost mjerodavnog elementa poprečnog presjeka rebra

EC-EN 1999 Aluminium check ULS
Values: $U_{Coverall}$
Nonlinear calculation
NonLinear Combi: NC_GSN26.2
Coordinate system: Principal
Extreme 1D: Global
Selection: All
Filter: Cross-section = Prsten -
CHS114.3/3.6



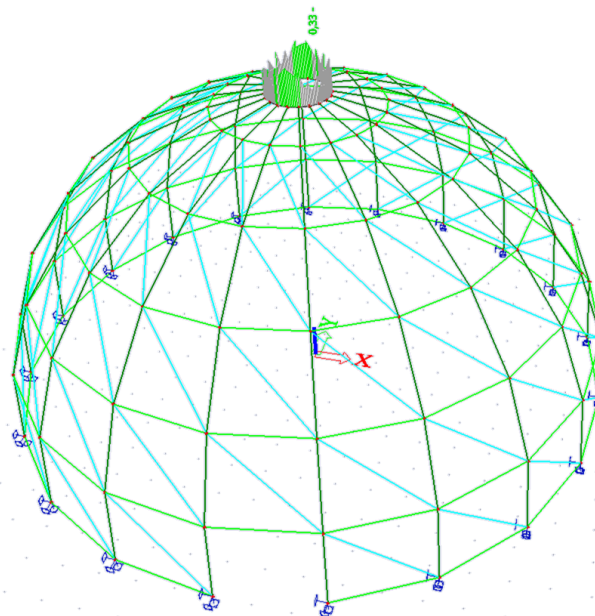
Slika 50: Iskorištenost mjerodavnog elementa poprečnog presjeka prstena

EC-EN 1999 Aluminium check ULS
Values: $U_{C_{overall}}$
NonLinear calculation
NonLinear Combi: NC_GSN16.1
Coordinate system: Principal
Extreme 1D: Global
Selection: All
Filter: Cross-section = Dijagonale -
CH588.9/3.2



Slika 51: Iskorištenost mjerodavnog elementa poprečnog presjeka dijagonala

EC-EN 1999 Aluminium check ULS
Values: $U_{C_{overall}}$
NonLinear calculation
NonLinear Combi: NC_GSN26.2
Coordinate system: Principal
Extreme 1D: Global
Selection: All
Filter: Cross-section = Tlačni prsten -
SHS180/180/5.0



Slika 52: Iskorištenost mjerodavnog elementa poprečnog presjeka tlačnog prstena

5.3. Provjera graničnog stanja nosivosti elemenata

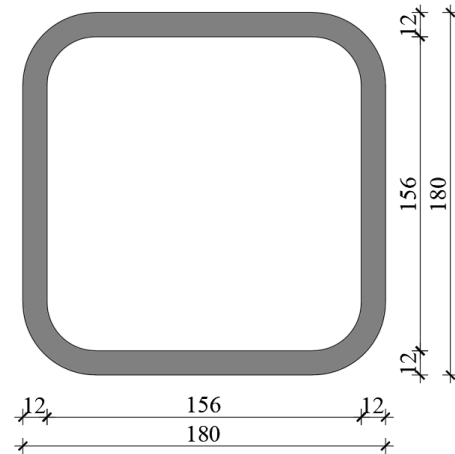
5.3.1. Poprečni presjek Rebra

Karakteristike poprečnog presjeka

Odabrani profil: SHS 180 x 12 mm

Debljina stijenke: 12 mm

Površina poprečnog presjeka: $A=7909 \text{ mm}^2$



Karakteristike materijala

EN-AW 6082 (EP/O, EP/H, ET) T6 (5-15)

Granica proporcionalnosti : $f_0 = 260,0 \text{ Mpa}$

Granica popuštanja: $f_u = 310,0 \text{ Mpa}$

Razred izvijanja : A

Parcijalni faktori sigurnosti

$$\gamma_{M0} = 1,0$$

$$\gamma_{M1} = 1,1$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

Kombinacija	Poprečni presjek	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]
NC_GSN2.2	SHS 180/12	-98,96	-1,08	7,51	-3,55	0,39

Tablica 6: Vrijednosti unutarnjih sila za mjerodavni element rebra

Klasifikacija poprečnog presjeka

Klasifikacija porečnog presjeka vrši se prema parametrima vitkosti β

Pojasnica:

$$\beta = \frac{b - 2 \cdot t_f}{t_f} = \frac{180 - 2 \cdot 12}{12} = 13,0$$

Koeficijent materijala

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{250 \text{ N/mm}^2}{f_0}} = \sqrt{\frac{250}{260}} = 0,98$$

$\beta > 11 \varepsilon = 11 \cdot 0,98 = 10,8$ pojasnica nije klase 1

$\beta < 16 \varepsilon = 16 \cdot 0,98 = 15,7$ pojasnica je klase 2

Hrbat – unutarnji element s omjerom naprezanja $\psi = 0,25$:

$$\eta = 0,7 + 0,3\psi = 0,7 + 0,3 \cdot 0,25 = 0,78$$

$$\beta = \eta \cdot \frac{b - 2 \cdot t_w}{t_w} = 0,78 \cdot \frac{180 - 2 \cdot 12}{12} = 10,1$$

$\beta < 11 \varepsilon = 11 \cdot 0,98 = 10,8$ hrbat je klase 1

Poprečni presjek je klase 2.

5.3.1.1. Otpornost poprečnog presjeka

Otpornost poprečnog presjeka na tlačnu silu

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_0}{\gamma_{M1}} = \frac{79,09 \cdot 26,0}{1,1} = 1869,4 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{-98,96 \text{ kN}}{1869,4 \text{ kN}} = 0,05 \leq 1,0$$

- Iskoristivost presjeka na tlak je 5 %.

Otpornost poprečnog presjeka na moment savijanja $M_{y,ED}$

$$M_{el,y,Rd} = \frac{\alpha \cdot W_{el,y} \cdot f_0}{\gamma_{M1}}$$

Prema EN 1999 za poprečni presjek klase 2 faktor oblika je $\alpha = \frac{W_{pl}}{W_{el}}$

$$W_{el,y} = 409,0 \text{ cm}^3$$

$$W_{pl,y} = 494,2 \text{ cm}^3$$

$$\alpha = \frac{W_{pl}}{W_{el}} = \frac{494,2}{409,0} = 1,21$$

$$M_{el,y,Rd} = \frac{\alpha_{2,u} \cdot W_{el,y} \cdot f_0}{\gamma_{M1}} = \frac{1,21 \cdot 409,0 \cdot 26,0}{1,1} = 11697,4 \text{ kNcm} = 116,9 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} = \frac{-3,55 \text{ kN}}{116,9 \text{ kNm}} = 0,03 \leq 1,0$$

- Iskoristivost poprečnog presjeka na savijanje je 3 %.

Otpornost poprečnog presjeka na moment savijanja $M_{z,ED}$

$$M_{el,z,Rd} = \frac{\alpha \cdot W_{el,z} \cdot f_0}{\gamma_{M1}}$$

Prema EN 1999 za poprečni presjek klase 2 $\alpha = \frac{W_{pl}}{W_{el}}$

$$W_{el,z} = 409,0 \text{ cm}^3$$

$$W_{pl,z} = 494,2 \text{ cm}^3$$

$$\alpha = \frac{W_{pl}}{W_{el}} = \frac{494,2}{409,0} = 1,21$$

$$M_{el,z,Rd} = \frac{\alpha_{3,u} \cdot W_{el,z} \cdot f_0}{\gamma_{M1}} = \frac{1,21 \cdot 409,0 \cdot 26,0}{1,1} = 11697,4 \text{ kNcm} = 116,9 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} = \frac{0,39 \text{ kN}}{116,9 \text{ kN}} \leq 1,0$$

- Nema utjecaja

Otpornost poprečnog presjeka na poprečnu silu

Za profile bez izvijanja koji zadovoljavaju uvjet, $\frac{h_w}{t_w} < 39 \cdot \varepsilon$ mogu se izračunati po formuli:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_0}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{156}{12} = 13 < 39 \cdot \varepsilon = 38,2$$

A_v je posmična ploština koja se određuje iz izraza:

➔ Za pravokutne šuplje poprečne presjeke

$$A_v = 2 \cdot h_w \cdot t_w$$

$$A_v = 2 \cdot 15,6 \cdot 1,2 = 37,33 \text{ cm}^2$$

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_0}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = 37,44 \cdot \frac{26,0}{\sqrt{3} \cdot 1,1} = 510,9 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{7,51 \text{ kN}}{510,9 \text{ kN}} = 0,02 \leq 1,0$$

- Iskoristivost poprečnog presjeka na poprečnu silu je 2 %.

Otpornost poprečnog presjeka – Interakcija M – N

Šuplji i puni profili moraju zadovoljiti kriterij:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}\right)^{\psi_c} + \left[\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}}\right)^{1,7} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}\right)^{\frac{1,7}{\chi_y^2}} \right]^{0,588} \leq 1,00$$

Gdje je za pravokutne poprečne presjeke $\psi_c = \psi_o \cdot \chi_y$, ali $\psi_c > 0,8$.

ψ_o je $1 < \alpha_y \alpha_z \leq 1,3$

$\alpha_y \alpha_z = 1,21 \cdot 1,21 = 1,46 > 1,3 - \psi_o = 1,3$

$$\left(\frac{-98,96}{1869,4}\right)^{1,3} + \left[\left(\frac{-3,55}{116,9}\right)^{1,7} + \left(\frac{0,39}{116,9}\right)^{\frac{1,7}{1}} \right]^{0,588} = 0,02 + 0,03 = 0,05 \leq 1,00$$

- Iskoristivost poprečnog presjeka na interakciju momenta savijanja i uzdužne sile je 5 %.

5.3.1.2. Otpornost elementa

Otpornost elementa na izvijanje

Tlačni element treba zadovoljiti uvijet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$$

N_{Ed} – proračunska tlačna sila

$N_{b,Rd}$ – proračunska otpornost tlačog elementa na izvijanje koja se dobije formulom

$$N_{b,Rd} = k\chi \omega_x \frac{A_{eff} f_0}{\gamma_{M1}}, \text{ gdje je}$$

χ – faktor izvijanja za odgovarajući oblik izvijanja

k – faktor kojim se uzima u obzir učinak oslabljenja zbog uzdužnih zavora, ako nema zavora uzima se vrijednost 1,0

ω_x – faktor kojim se uzima u obzir položaj poprečnog presjeka duž elementa

Kritična duljina iznosi:

$$L_{cr,y} = k \cdot L = 13,232 \text{ m}$$

$$L_{cr,z} = k \cdot L = 2,35 \text{ m}$$

Kritična sila izvijanja:

$$N_{cr,y} = \frac{I_y \cdot E \cdot \pi^2}{L_{cr}^2} = \frac{3677 \cdot 7000 \cdot \pi^2}{1323,2^2} = 145,1 \text{ kN}$$

$$N_{cr,z} = \frac{I_y \cdot E \cdot \pi^2}{L_{cr}^2} = \frac{3677 \cdot 7000 \cdot \pi^2}{235,0^2} = 4599,9 \text{ kN}$$

Relativna vitkost elementa:

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{f_y \cdot A}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{79,1 \cdot 26,0}{145,1}} = 3,76$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{f_y \cdot A}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{79,1 \cdot 26,0}{4599,9}} = 0,67$$

Faktor redukcije

$$\chi_{y,z} = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0$$

$$\phi_{y,z} = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2]$$

α – faktor nesavršenosti

$\bar{\lambda}_0$ – granica horizontalnog platoa

Faktor nesavršenosti i granica horizontalnog platoa određuju se na temelju razreda izvijanja materijala:

-za razred izvijanja materijala A : $\alpha = 0,18$, a $\bar{\lambda}_0 = 0,10$

$$\phi_y = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2] = 0,5[1 + 0,18(3,76 - 0,1) + 3,76^2] = 7,89$$

$$\phi_z = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2] = 0,5[1 + 0,18(0,67 - 0,1) + 0,67^2] = 0,77$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{7,89 + \sqrt{7,89^2 - 3,76^2}} = 0,07 \leq 1,0$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,77 + \sqrt{0,77^2 - 0,67^2}} = 0,87 \leq 1,0$$

Otpornost elementa na izvijanje iznosi:

$$N_{b,y,Rd} = k \cdot \omega_x \cdot \chi \cdot \frac{A_{eff} \cdot f_0}{\gamma_{M1}} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,07 \cdot \frac{79,1 \cdot 26,0}{1,1} = 130,8 \text{ kN}$$

$$N_{b,z,Rd} = k \cdot \omega_x \cdot \chi \cdot \frac{A_{eff} \cdot f_0}{\gamma_{M1}} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,87 \cdot \frac{79,1 \cdot 26,0}{1,1} = 1626,6 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,y,Rd}} = \frac{-98,96 \text{ kN}}{130,8 \text{ kN}} = 0,76 \leq 1,0$$

- Iskoristivost elementa na izvijanje je 76 %.

Otpornost elementa – interakcija M – N

$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}\right)^{\psi_c} + \left[\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}}\right)^{1,7} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}\right)^{\frac{1,7}{\chi_y^2}} \right]^{0,588} \leq 1,00$$

Gdje je za pravokutne poprečne presjeke $\psi_c = \psi_o \cdot \chi_y$, ali $\psi_c > 0,8$. ψ_o je $1 < \alpha_y \alpha_z \leq 1,3$

$$\alpha_y \alpha_z = 1,21 \cdot 1,21 = 1,46 > 1,3 - \psi_o = 1,3$$

$$\psi_c = \psi_o \cdot \chi_y = 1,3 \cdot 0,07 = 0,09 < 0,8$$

$$\left(\frac{-98,96 \text{ kN}}{130,8 \text{ kN}}\right)^{0,8} + \left[\left(\frac{3,12}{116,9}\right)^{1,7} + \left(\frac{1,04}{116,9}\right)^{\frac{1,7}{0,07^2}} \right]^{0,588} = 0,81 + 0,03 = 0,84 \leq 1,00$$

- Iskoristivost elementa na interakciju momenta savijanja i uzdužne sile je 84 %.

5.3.2. Poprečni presjek Prstena

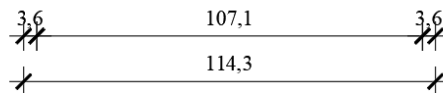
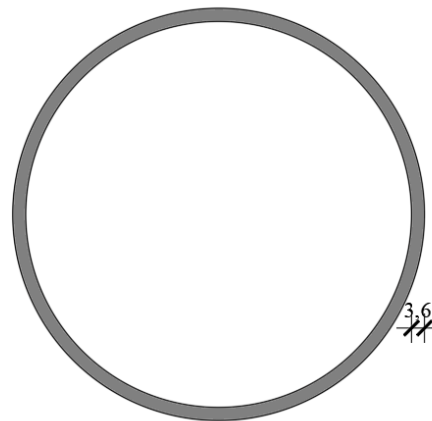
Karakteristike poprečnog presjeka

Odabrani profil: CHS 114,3 x 3,6 mm

Promjer: 114,3 mm

Debljina stijenke: 3,6 mm

Površina poprečnog presjeka: $A=1252 \text{ mm}^2$



Karakteristike materijala

EN-AW 6082 (EP/O, EP/H, ET) T6 (0-5)

Granica proporcionalnosti : $f_0 = 250,0 \text{ Mpa}$

Granica popuštanja: $f_u = 290,0 \text{ Mpa}$

Razred izvijanja : A

Parcijalni faktori sigurnosti

$$\gamma_{M0} = 1,0$$

$$\gamma_{M1} = 1,1$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

Kombinacija	Poprečni presjek	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]
NC_GSN26.2	CHS 114,3/3,6	-28,56	0,23	8,97	4,55	-0,15

Tablica 7: Vrijednosti unutarnjih sila za mjerodavni element prstena

Klasifikacija poprečnog presjeka

Klasifikacija porečnog presjeka vrši se prema parametrima vitkosti β

$$\beta = 3 \cdot \sqrt{\frac{D}{t}} = 3 \cdot \sqrt{\frac{114,3}{3,6}} = 16,9$$

Koeficijent materijala

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{250 \text{ N/mm}^2}{f_0}} = \sqrt{\frac{250}{250}} = 1,0$$

$\beta > 11 \varepsilon = 11 \cdot 1,0 = 11,0$ presjek nije klase 1

$\beta > 16 \varepsilon = 16 \cdot 1,0 = 16,0$ presjek nije klase 2

$\beta > 22 \varepsilon = 22 \cdot 1,0 = 22,0$ presjek je klase 3

5.3.2.1. Otpornost poprečnog presjeka

Otpornost poprečnog presjeka na tlačnu silu

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_0}{\gamma_{M1}} = \frac{12,52 \cdot 25,0}{1,1} = 284,6 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{-28,56 \text{ kN}}{284,6 \text{ kN}} = 0,10 \leq 1,0$$

- Iskoristivost presjeka na tlak je 10%.

Otpornost poprečnog presjeka na moment savijanja $M_{y,ED}$

$$M_{el,y,Rd} = \frac{\alpha \cdot W_{el,y} \cdot f_0}{\gamma_{M1}}$$

Prema EN 1999 za poprečni presjek klase 3 faktor oblika je $\alpha = 1,0$

$$M_{el,y,Rd} = \frac{\alpha_3 \cdot W_{el,y} \cdot f_0}{\gamma_{M1}} = \frac{1,0 \cdot 33,6 \cdot 25,0}{1,1} = 763,6 \text{ kNcm} = 7,64 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} = \frac{4,55 \text{ kN}}{7,64 \text{ kN}} = 0,60 \leq 1,0$$

- Iskoristivost poprečnog presjeka na savijanje je 60 %.

Otpornost poprečnog presjeka na moment savijanja $M_{z,ED}$

$$M_{el,z,Rd} = \frac{\alpha \cdot W_{el,z} \cdot f_0}{\gamma_{M1}}$$

Prema EN 1999 za poprečni presjek klase 3 faktor oblika je $\alpha = 1,0$

$$M_{el,z,Rd} = \frac{\alpha_3 \cdot W_{el,z} \cdot f_0}{\gamma_{M1}} = \frac{1,0 \cdot 33,6 \cdot 25,0}{1,1} = 763,6 \text{ kNcm} = 7,64 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} = \frac{0,15 \text{ kN}}{7,64 \text{ kN}} = 0,02 \leq 1,0$$

- Iskoristivost poprečnog presjeka na savijanje je 2 %.

Otpornost poprečnog presjeka na poprečnu silu

Za profile bez izvijanja koji zadovoljavaju uvjet, $\frac{h_w}{t_w} < 39 \cdot \varepsilon$ mogu se izračunati po formuli:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_0}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{114,3}{3,6} = 31,8 < 39 \cdot \varepsilon = 39,0$$

A_v je posmična ploština koja se određuje iz izraza:

→ Za punu šipku i okruglu cijev

$$A_v = \eta_v \cdot A_e$$

$\eta_v = 0,6$ za okruglu cijev

A_e – puna ploština nezavarenog presjeka

$$A_v = \eta_v \cdot A_e = 0,6 \cdot 12,52 = 7,51 \text{ cm}^2$$

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_o}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = 7,51 \cdot \frac{25,0}{\sqrt{3} \cdot 1,1} = 98,57 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{8,97 \text{ kN}}{98,57 \text{ kN}} = 0,09 \leq 1,0$$

- Iskoristivost poprečnog presjeka na savijanje je 9 %.

Otpornost poprečnog presjeka – Interakcija M – N

Šuplji i puni profili moraju zadovoljiti kriterij:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}\right)^\psi + \left[\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}}\right)^{1,7} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}\right)^{1,7}\right]^{0,588} \leq 1,00$$

Gdje je za šuplje cijevi $\psi_c = 1,75\chi$ za šuplje profile 1. i 2. razreda poprečnih presjeka, a $\psi = \chi$ za poprečne presjeke razreda 3. ili 4.

Za provjeru interakcije savijanja i uzdužne sile poprečnog presjeka uzima se $\chi=1$

$$\left(\frac{-28,56}{284,6}\right)^{1,0} + \left[\left(\frac{4,55}{7,64}\right)^{1,7} + \left(\frac{0,15}{7,64}\right)^{1,7}\right]^{0,588} = 0,10 + 0,60 = 0,70 \leq 1,00$$

- Iskoristivost poprečnog presjeka na interakciju momenta savijanja i uzdužne sile je 70 %.

5.3.2.2. *Otpornost elementa*

Otpornost elementa na izvijanje

Tlačni element treba zadovoljiti uvijet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$$

N_{Ed} – proračunska tlačna sila

$N_{b,Rd}$ – proračunska otpornost tlačog elementa na izvijanje koja se dobije formulom

$$N_{b,Rd} = k \chi \omega_x \frac{A_{eff} f_0}{\gamma_{M1}}, \text{ gdje je}$$

χ – faktor izvijanja za odgovarajući oblik izvijanja

k – faktor kojim se uzima u obzir učinak oslabljenja zbog uzdužnih zavora, ako nema zavora uzima se vrijednost 1,0

ω_x – faktor kojim se uzima u obzir položaj poprečnog presjeka duž elementa

Kritična duljina iznosi:

$$L_{cr} = k \cdot L = 1,0 \cdot 1,991m = 1,991 m$$

Kritična sila izvijanja:

$$N_{cr} = \frac{I_y \cdot E \cdot \pi^2}{L_{cr}^2} = \frac{192,0 \cdot 7000 \cdot \pi^2}{199,1^2} = 334,5 \text{ kN}$$

Relativna vitkost elementa:

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{f_y \cdot A}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{25,0 \cdot 12,52}{334,5}} = 0,97$$

Faktor redukcije

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0$$

$$\phi_y = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2]$$

α – faktor nesavršenosti

$\bar{\lambda}_0$ – granica horizontalnog platoa

Faktor nesavršenosti i granica horizontalnog platoa određuju se na temelju razreda izvijanja materijala:

-za razred izvijanja materijala A : $\alpha = 0,18$, a $\bar{\lambda}_0 = 0,10$

$$\phi_y = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2] = 0,5[1 + 0,18(0,97 - 0,1) + 0,97^2] = 1,05$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,05 + \sqrt{1,05^2 - 0,97^2}} = 0,69 \leq 1,0$$

Otpornost elementa na izvijanje iznosi:

$$N_{b,Rd} = k \chi \omega_x \frac{A_{eff} f_0}{\gamma_{M1}} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,69 \cdot \frac{12,52 \cdot 25,0}{1,1} = 196,34 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,z,Rd}} = \frac{-28,56 \text{ kN}}{196,34 \text{ kN}} = 0,15 \leq 1,0$$

- Iskoristivost elementa na izvijanje je 15 %.

Otpornost elementa – interakcija M – N

$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}\right)^{\psi_c} + \left[\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}}\right)^{1,7} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}\right)^{\frac{1,7}{\chi_y^2}} \right]^{0,588} \leq 1,00$$

Gdje je kružne šuplje profile $\psi_c = 1,75\chi_y$ za šuplje profile 1. i 2. razreda poprečnih presjeka, a $\psi_c = \chi_y$ za poprečne presjeke razreda 3. ili 4., ali $1 \leq \psi_c \leq 1,75$

$$\psi_c = \max(\chi_y = 0,69; 1,0) = 1,0$$

$$\left(\frac{-28,56}{196,34}\right)^1 + \left[\left(\frac{4,55}{7,64}\right)^{1,7} + \left(\frac{0,15}{7,64}\right)^{\frac{1,7}{0,69^2}} \right]^{0,588} = 0,15 + 0,60 = 0,75 \leq 1,00$$

- *Iskoristivost elementa na interakciju momenta savijanja i uzdužne sile je 75 %.*

5.3.3 Poprečni presjek Dijagonala

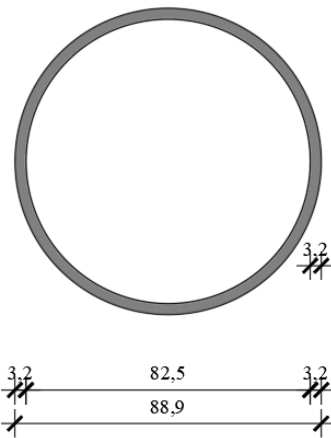
Karakteristike poprečnog presjeka

Odabrani profil: CHS 88,9 x 3,2 mm

Promjer: 88,9 mm

Debljina stijenke: 3,2 mm

Površina poprečnog presjeka: $A=862 \text{ mm}^2$



Karakteristike materijala

EN-AW 6082 (EP/O, EP/H, ET) T6 (0-5)

Granica proporcionalnosti : $f_0 = 250,0 \text{ Mpa}$

Granica popuštanja: $f_u = 290,0 \text{ Mpa}$

Razred izvijanja : A

Parcijalni faktori sigurnosti

$$\gamma_{M0} = 1,0$$

$$\gamma_{M1} = 1,1$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

Kombinacija	Poprečni presjek	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]
NC_GSN16.1	CHS 88,9/3,2	-26,28	0,36	-0,38	-0,23	0,27

Tablica 8: Vrijednosti unutarnjih sila za mjerodavni element dijagonala

Klasifikacija poprečnog presjeka

Klasifikacija porečnog presjeka vrši se prema parametrima vitkosti β

$$\beta = 3 \cdot \sqrt{\frac{D}{t}} = 3 \cdot \sqrt{\frac{88,9}{3,2}} = 15,8$$

Koeficijent materijala

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{250 \text{ N/mm}^2}{f_0}} = \sqrt{\frac{250}{250}} = 1,0$$

$\beta > 11 \varepsilon = 11 \cdot 1,0 = 11,0$ presjek nije klase 1

$\beta < 16 \varepsilon = 16 \cdot 1,0 = 16,0$ presjek je klase 2

5.3.3.1. Otpornost poprečnog presjeka

Otpornost poprečnog presjeka na tlačnu silu

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_0}{\gamma_{M1}} = \frac{8,62 \cdot 25,0}{1,1} = 195,9 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{-26,28 \text{ kN}}{195,9 \text{ kN}} = 0,13 \leq 1,0$$

- Iskoristivost presjeka na tlak je 13 %.

Otpornost poprečnog presjeka na moment savijanja $M_{y,ED}$

$$M_{el,y,Rd} = \frac{\alpha \cdot W_{el,y} \cdot f_0}{\gamma_{M1}}$$

Prema EN 1999 za poprečni presjek klase 2 faktor oblika je $\alpha = \frac{W_{pl}}{W_{el}}$

$$W_{el,y} = 17,8 \text{ cm}^3$$

$$W_{pl,y} = 23,5 \text{ cm}^3$$

$$\alpha = \frac{W_{pl}}{W_{el}} = \frac{23,5}{17,8} = 1,32$$

$$M_{el,y,Rd} = \frac{\alpha_2 \cdot W_{el,y} \cdot f_0}{\gamma_{M1}} = \frac{1,32 \cdot 17,8 \cdot 25,0}{1,1} = 534 \text{ kNcm} = 5,34 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} = \frac{0,23 \text{ kNm}}{5,34 \text{ kNm}} = 0,04 \leq 1,0$$

- Iskoristivost poprečnog presjeka na savijanje je 4 %.

Otpornost poprečnog presjeka na moment savijanja $M_{z,ED}$

$$M_{el,z,Rd} = \frac{\alpha \cdot W_{el,z} \cdot f_0}{\gamma_{M1}}$$

Prema EN 1999 za poprečni presjek klase 2 faktor oblika je $\alpha = \frac{W_{pl}}{W_{el}}$

$$W_{el,z} = 17,8 \text{ cm}^3$$

$$W_{pl,z} = 23,5 \text{ cm}^3$$

$$\alpha = \frac{W_{pl}}{W_{el}} = \frac{23,5}{17,8} = 1,32$$

$$M_{el,z,Rd} = \frac{\alpha_2 \cdot W_{el,z} \cdot f_0}{\gamma_{M1}} = \frac{1,32 \cdot 17,8 \cdot 25,0}{1,1} = 534 \text{ kNcm} = 5,34 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} = \frac{0,27 \text{ kNm}}{5,34 \text{ kNm}} = 0,05 \leq 1,0$$

- Iskoristivost poprečnog presjeka na savijanje je 5 %.

Otpornost poprečnog presjeka na poprečnu silu

Za profile bez izvijanja koji zadovoljavaju uvjet, $\frac{h_w}{t_w} < 39 \cdot \varepsilon$ mogu se izračunati po formuli:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_o}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{88,9}{3,2} = 27,8 < 39 \cdot \varepsilon = 39,0$$

A_v je posmična ploština koja se određuje iz izraza:

→ Za punu šipku i okruglu cijev

$$A_v = \eta_v \cdot A_e$$

η_v – 0,6 za okruglu cijev

A_e – puna ploština nezavarenog presjeka

$$A_v = \eta_v \cdot A_e = 0,6 \cdot 8,62 = 5,17 \text{ cm}^2$$

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_o}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = 5,17 \cdot \frac{25,0}{\sqrt{3} \cdot 1,1} = 67,86 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{0,38 \text{ kN}}{67,86 \text{ kN}} = 0,01 \leq 1,0$$

- Iskoristivost poprečnog presjeka na savijanje je 1 %.

Otpornost poprečnog presjeka – Interakcija M – N

Šuplji i puni profili moraju zadovoljiti kriterij:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}\right)^{\psi} + \left[\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}}\right)^{1,7} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}\right)^{1,7} \right]^{0,588} \leq 1,00$$

Gdje je za šuplje cijevi $\psi_c = 1,75\chi$ za šuplje profile 1. i 2. razreda poprečnih presjeka, a $\psi = \chi$ za poprečne presjeke razreda 3. ili 4.

Za provjeru interakcije savijanja i uzdužne sile poprečnog presjeka uzima se $\chi=1$

$$\left(\frac{-26,28}{195,9}\right)^{1,75} + \left[\left(\frac{0,23}{5,34}\right)^{1,7} + \left(\frac{0,27}{5,34}\right)^{1,7} \right]^{0,588} = 0,03 + 0,07 = 0,10 \leq 1,00$$

- Iskoristivost poprečnog presjeka na interakciju momenta savijanja i uzdužne sile je 10 %.

5.3.3.2. Otpornost elementa

Otpornost elementa na izvijanje

Tlačni element treba zadovoljiti uvijet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$$

N_{Ed} – proračunska tlačna sila

$N_{b,Rd}$ – proračunska otpornost tlačog elementa na izvijanje koja se dobije formulom

$$N_{b,Rd} = k \chi \omega_x \frac{A_{eff} f_0}{\gamma_{M1}}, \text{ gdje je}$$

χ – faktor izvijanja za odgovarajući oblik izvijanja

k – faktor kojim se uzima u obzir učinak oslabljenja zbog uzdužnih zavora, ako nema zavora uzima se vrijednost 1,0

ω_x – faktor kojim se uzima u obzir položaj poprečnog presjeka duž elementa

Kritična duljina iznosi:

$$L_{cr} = k \cdot L = 1,0 \cdot 3,630 = 3,630 \text{ m}$$

Kritična sila izvijanja:

$$N_{cr} = \frac{I_y \cdot E \cdot \pi^2}{L_{cr}^2} = \frac{79,2 \cdot 7000 \cdot \pi^2}{363,0^2} = 41,53 \text{ kN}$$

Relativna vitkost elementa:

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{f_y \cdot A}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{25,0 \cdot 8,62}{41,53}} = 2,28$$

Faktor redukcije

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0$$

$$\phi_y = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2]$$

α – faktor nesavršenosti

$\bar{\lambda}_0$ – granica horizontalnog platoa

Faktor nesavršenosti i granica horizontalnog platoa određuju se na temelju razreda izvijanja materijala:

-za razred izvijanja materijala A : $\alpha = 0,18$, a $\bar{\lambda}_0 = 0,10$

$$\phi_y = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2] = 0,5[1 + 0,18(2,28 - 0,1) + 2,28^2] = 3,30$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{3,30 + \sqrt{3,30^2 - 2,28^2}} = 0,18 \leq 1,0$$

Otpornost elementa na izvijanje iznosi:

$$N_{b,Rd} = k \chi \omega_x \frac{A_{eff} f_0}{\gamma_{M1}} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,18 \cdot \frac{8,62 \cdot 25,0}{1,1} = 35,26 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,z,Rd}} = \frac{-26,28 \text{ kN}}{35,26 \text{ kN}} = 0,75 \leq 1,0$$

- Iskoristivost poprečnog presjeka na savijanje je 75 %.

Otpornost elementa – interakcija M – N

$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}\right)^{\psi_c} + \left[\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}}\right)^{1,7} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}\right)^{\frac{1,7}{\chi_y^2}} \right]^{0,588} \leq 1,00$$

Gdje je kružne šuplje profile $\psi_c = 1,75\chi_y$ za šuplje profile 1. i 2. razreda poprečnih presjeka,

a $\psi_c = \chi_y$ za poprečne presjeke razreda 3. ili 4., ali $1 \leq \psi_c \leq 1,75$

$$\psi_c = \max(1,75\chi_y = 0,32; 1,0) = 1,0$$

$$\left(\frac{-26,28}{35,26}\right)^1 + \left[\left(\frac{0,23}{5,34}\right)^{1,7} + \left(\frac{0,27}{5,34}\right)^{\frac{1,7}{0,18^2}} \right]^{0,588} = 0,75 + 0,07 = 0,82 \leq 1,00$$

- Iskoristivost elementa na interakciju momenta savijanja i uzdužne sile je 82 %.

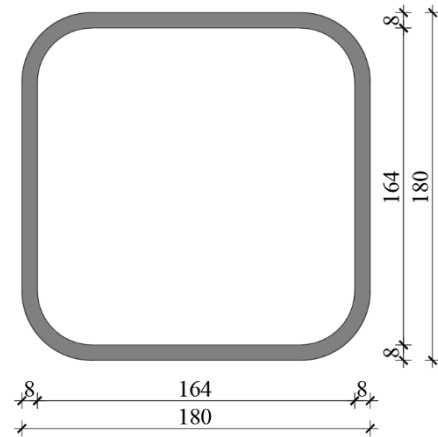
5.3.4 Poprečni presjek Tlačnog prstena

Karakteristike poprečnog presjeka

Odabrani profil: SHS 180 x 8 mm

Debljina stijenke: 8,0 mm

Površina poprečnog presjeka: $A=5435 \text{ mm}^2$



Karakteristike materijala

EN-AW 6082 (EP/O, EP/H, ET) T6 (5-15)

Granica proporcionalnosti : $f_0 = 260,0 \text{ Mpa}$

Granica popuštanja: $f_u = 310,0 \text{ Mpa}$

Razred izvijanja : A

Parcijalni faktori sigurnosti

$$\gamma_{M0} = 1,0$$

$$\gamma_{M1} = 1,1$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

Kombinacija	Poprečni presjek	N [kN]	V _y [kN]	V _z [kN]	M _y [kNm]	M _z [kNm]
NC_GSN26.2	SHS 180/8	-46,12	-26,38	-6,40	-0,24	6,10

Klasifikacija poprečnog presjeka

Klasifikacija porečnog presjeka vrši se prema parametrima vitkosti β

Pojasnica:

$$\beta = \frac{b - 2 \cdot t_f}{t_f} = \frac{180 - 2 \cdot 8}{8} = 20,5$$

Koeficijent materijala

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{250 \text{ N/mm}^2}{f_0}} = \sqrt{\frac{250}{260}} = 0,98$$

$\beta > 11 \varepsilon = 11 \cdot 0,98 = 10,8$ pojasnica nije klase 1

$\beta > 16 \varepsilon = 16 \cdot 0,98 = 15,7$ pojasnica nije klase 2

$\beta < 22 \varepsilon = 16 \cdot 0,98 = 21,5$ pojasnica je klase 3

Hrbat – unutarnji element s omjerom naprezanja $\psi = 1,0$:

$$\eta = 0,7 + 0,3\psi = 0,7 + 0,3 \cdot 1,0 = 1,0$$

$$\beta = \eta \cdot \frac{b - 2 \cdot t_w}{t_w} = 1,0 \cdot \frac{180 - 2 \cdot 8}{8} = 20,5$$

$\beta > 11 \varepsilon = 11 \cdot 0,98 = 10,8$ hrbat nije klase 1

$\beta > 16 \varepsilon = 16 \cdot 0,98 = 15,7$ hrbat nije klase 2

$\beta < 22 \varepsilon = 16 \cdot 0,98 = 21,5$ hrbat je klase 3

Poprečni presjek je klase 3.

5.3.4.1. Otpornost poprečnog presjeka

Otpornost poprečnog presjeka na tlačnu silu

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_0}{\gamma_{M1}} = \frac{54,35 \cdot 26,0}{1,1} = 1284,6 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{-46,12 \text{ kN}}{1284,6 \text{ kN}} = 0,04 \leq 1,0$$

- Iskoristivost presjeka na tlak je 4 %.

Otpornost poprečnog presjeka na moment savijanja $M_{y,ED}$

$$M_{el,y,Rd} = \frac{\alpha \cdot W_{el,y} \cdot f_0}{\gamma_{M1}}$$

Prema EN 1999 za poprečni presjek klase 3 faktor oblika je $\alpha = 1,0$

$$W_{el,y} = 2,96 \text{ cm}^3$$

$$M_{el,y,Rd} = \frac{\alpha_2 \cdot W_{el,y} \cdot f_0}{\gamma_{M1}} = \frac{1,0 \cdot 2,96 \cdot 26,0}{1,1} = 69,9 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} = \frac{-0,26 \text{ kN}}{69,9 \text{ kN}} \leq 1,0$$

- Nema utjecaja.

Otpornost poprečnog presjeka na moment savijanja $M_{z,ED}$

$$M_{el,z,Rd} = \frac{\alpha \cdot W_{el,z} \cdot f_0}{\gamma_{M1}}$$

Prema EN 1999 za poprečni presjek klase 3 faktor oblika je $\alpha = 1,0$

$$W_{el,z} = 2,96 \text{ cm}^3$$

$$M_{el,z,Rd} = \frac{\alpha_3 \cdot W_{el,z} \cdot f_0}{\gamma_{M1}} = \frac{1,0 \cdot 2,96 \cdot 26,0}{1,1} = 69,9 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} = \frac{6,40 \text{ kN}}{69,9 \text{ kN}} = 0,09 \leq 1,0$$

- Iskoristivost poprečnog presjeka na savijanje je 9 %.

Otpornost poprečnog presjeka na poprečnu silu

Za profile bez izvijanja koji zadovoljavaju uvjet, $\frac{h_w}{t_w} < 39 \cdot \varepsilon$ mogu se izračunati po formuli:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_0}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{164}{8,0} = 20,5 < 39 \cdot \varepsilon = 38,2$$

A_v je posmična ploština koja se određuje iz izraza:

→ Za pravokutne šuplje poprečne presjeke

$$A_v = 2 \cdot h_w \cdot t_w$$

$$A_v = 2 \cdot 16,4 \cdot 0,8 = 26,24 \text{ cm}^2$$

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_0}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = 26,24 \cdot \frac{26,0}{\sqrt{3} \cdot 1,1} = 358,1 \text{ kN}$$



Uvjet:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{26,38 \text{ kN}}{358,1 \text{ kN}} = 0,07 \leq 1,0$$

- Iskoristivost poprečnog presjeka na poprečnu silu je 7 %.

5.3.4.2. Otpornost elementa

Otpornost elementa na izvijanje

Tlačni element treba zadovoljiti uvijet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$$

N_{Ed} – proračunska tlačna sila

$N_{b,Rd}$ – proračunska otpornost tlačog elementa na izvijanje koja se dobije formulom

$$N_{b,Rd} = k \chi \omega_x \frac{A_{eff} f_0}{\gamma_{M1}}, \text{ gdje je}$$

χ – faktor izvijanja za odgovarajući oblik izvijanja

k – faktor kojim se uzima u obzir učinak oslabljenja zbog uzdužnih zavora, ako nema zavora uzima se vrijednost 1,0

ω_x – faktor kojim se uzima u obzir položaj poprečnog presjeka duž elementa

Kritična duljina iznosi:

$$L_{cr} = k \cdot L = 1,0 \cdot 0,274 = 0,274 \text{ m}$$

Kritična sila izvijanja:

$$N_{cr} = \frac{I_y \cdot E \cdot \pi^2}{L_{cr}^2} = \frac{2,66 \cdot 10^{-2} \cdot 70000 \cdot \pi^2}{0,274^2} = 244781 \text{ kN}$$

Relativna vitkost elementa:

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{f_y \cdot A}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{26,0 \cdot 54,35}{244781}} = 0,08$$

Faktor redukcije

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0$$

$$\phi_y = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2]$$

α –faktor nesavršenosti

$\bar{\lambda}_0$ –granica horizontalnog platoa

Faktor nesavršenosti i granica horizontalnog platoa određuju se na temelju razreda izvijanja materijala:

-za razred izvijanja materijala A : $\alpha = 0,18$, a $\bar{\lambda}_0 = 0,10$

$$\phi_y = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2] = 0,5[1 + 0,18(0,08 - 0,1) + 0,08^2] = 0,5$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,5 + \sqrt{0,5^2 - 0,08}} = 1,0 \leq 1,0$$

Otpornost elementa na izvijanje iznosi:

$$N_{b,Rd} = k \chi \omega_x \frac{A_{eff} f_0}{\gamma_{M1}} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot \frac{54,35 \cdot 26,0}{1,1} = 1284,6 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,z,Rd}} = \frac{-46,12 \text{ kN}}{1284,6 \text{ kN}} = 0,05 \leq 1,0$$

- Iskoristivost poprečnog presjeka na savijanje je 5 %.

Otpornost elementa – interakcija M – N

$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}\right)^{\psi_c} + \left[\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}}\right)^{1,7} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}\right)^{\frac{1,7}{\chi_y^2}} \right]^{0,588} \leq 1,00$$

Gdje je za pravokutne poprečne presjeke $\psi_c = \psi_o \cdot \chi_y$, ali $\psi_c > 0,8$. ψ_o je $1 < \alpha_y \alpha_z \leq 1,3$

$$\alpha_y \alpha_z = 1,0 \cdot 1,0 = 1,0 < 1,3 - \psi_o = 1,0$$

$$\psi_c = \psi_o \cdot \chi_y = 1,0 \cdot 1,0 = 1,0 > 0,8$$

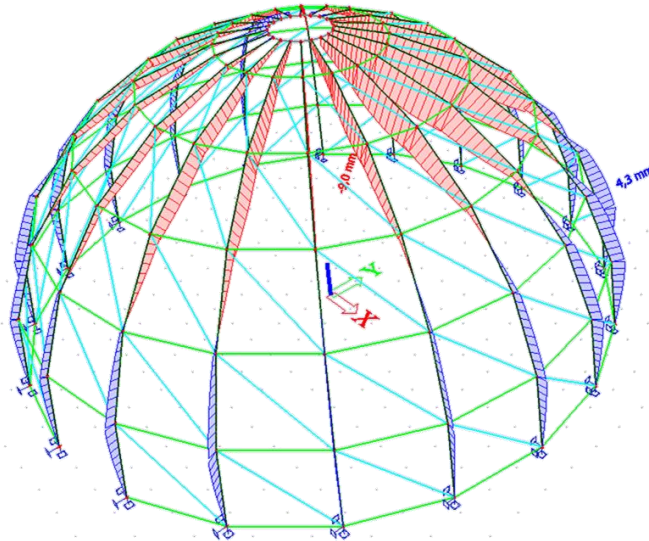
$$\left(\frac{-46,12 \text{ kN}}{1284,6 \text{ kN}}\right)^{1,0} + \left[\left(\frac{0,26}{69,9}\right)^{1,7} + \left(\frac{6,40}{69,9}\right)^{\frac{1,7}{1,0^2}} \right]^{0,588} = 0,04 + 0,09 = 0,13 \leq 1,00$$

- Iskoristivost elementa na interakciju momenta savijanja i uzdužne sile je 13 %.

5.4. Provjera graničnog stanja uporabivosti

Provjera graničnog stanja uporabivosti rebra

1D deformations
Values: u_z
Nonlinear calculation
NonLinear Combi: NC_GSU2.2
Coordinate system: Principal
Extreme 1D: Global
Selection: All
Filter: Cross-section = Rebra -
SHS180/180/12.0



Slika 53: Provjera graničnog stanja uporabivosti rebra

Uvjet:

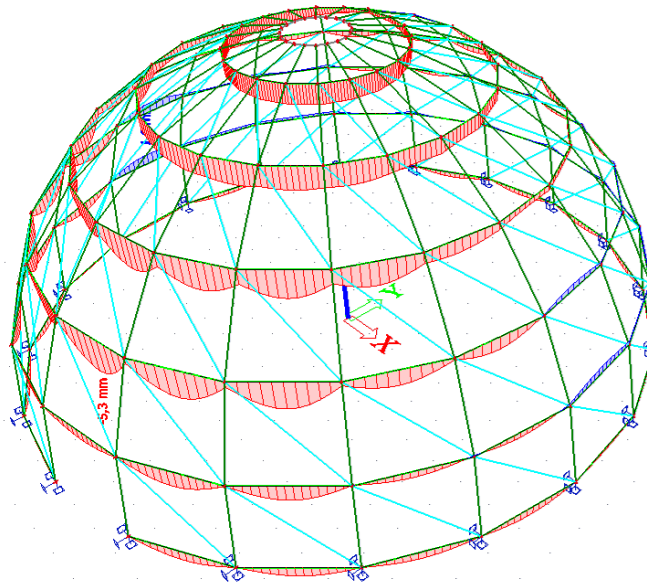
$$\delta_H < \frac{H}{250}$$

$$\frac{H}{200} = \frac{13232}{200} = 66,16\text{mm} > \delta_H = 9,0\text{ mm} \rightarrow \text{Zadovoljava}$$

Provjera graničnog stanja uporabivosti prstena

1D deformations

Values: u_z
Nonlinear calculation
NonLinear Combi: NC_GSU26.1
Coordinate system: Principal
Extreme 1D: Global
Selection: All
Filter: Cross-section = Prsten -
CHS114.3/3.6



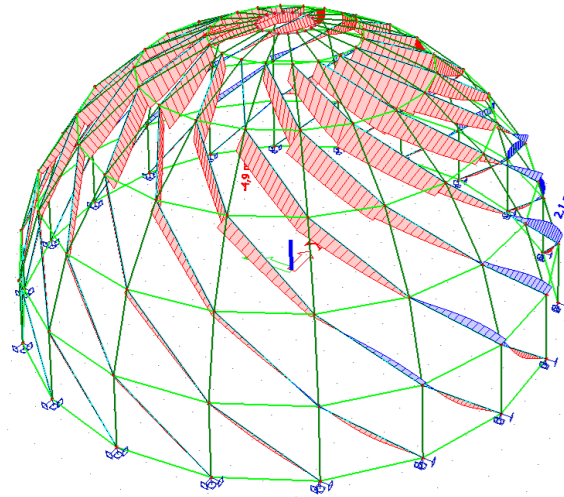
Slika 54: Provjera graničnog stanja uporabivosti prstena

$$\delta_H < \frac{H}{200}$$

$$\frac{H}{200} = \frac{2439}{200} = 12,2 \text{ mm} > \delta_H = 5,3 \text{ mm} \rightarrow \text{Zadovoljava}$$

Provjera graničnog stanja uporabivosti dijagonala

1D deformations
Values: u_z
Nonlinear calculation
NonLinear Combi: NC_GSU16.2
Coordinate system: Principal
Extreme 1D: Global
Selection: All
Filter: Cross-section = Dijagonale -
CH588.9/3.2



Slika 55: Provjera graničnog stanja uporabivosti dijagonala

$$\delta_H < \frac{H}{200}$$

$$\frac{H}{200} = \frac{2885}{200} = 14,4 \text{ mm} > \delta_H = 4,9 \text{ mm} \rightarrow \text{Zadovoljava}$$



6. PRIKLJUČCI

Dimenzioniranje priključaka provodi se ručno prema HRN EN 1999-1-1 i uz modeliranje u računalnom programu IDEA StatiCa. Računalni program ne podržava aluminij kao mogućnost materijala, stoga će se materijalne karakteristike aluminijske legure zadati ručno. Za spajanje aluminijskih legura koriste se vijci izrađeni od nehrđajućeg čelika

Kvaliteta aluminijske legure: EN-AW 6082 T6

- $f_o = 260 \text{ N/mm}^2$
- $f_u = 310 \text{ N/mm}^2$

Kvaliteta vijaka od nehrđajućeg čelika legure EN AW- A2 80

- $f_o^f = 600 \text{ N/mm}^2$
- $f_u^f = 800 \text{ N/mm}^2$

Koeficijenti sigurnosti:

- $\gamma_{M2} = 1,25$
- $\gamma_{M1} = 1,1$
- $\gamma_{M0} = 1,0$

6.1. Priključak prstena i dijagonale na element rebra

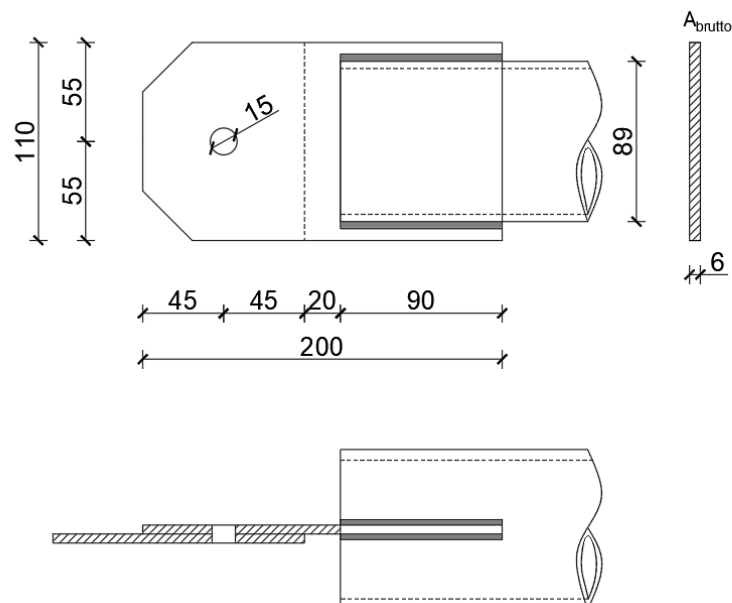
6.1.1. Spoj dijagonale na rebra

Profil elementa dijagonale je CHS 88,9 x 3,2 mm kvalitete aluminijske legure EN-AW 6082 T6. Najveća tlačna sila u elementu iznosi 26,42 kN, a vlačna 24,28 kN. Korišten je jedan vijak od nehrđajućeg čelika legure EN-AW A2 80 promjera 14 mm. Debljina pločice je 6 mm. Element je na pločicu spojen zavarom debljine 3 mm s obje strane na duljini od 360 mm. Dijagonalna je u xz ravnini pod nagibom 40°, a u xy ravnini 4°.

Odabrano: 1 vijak M14

Udaljenosti i razmaci	Minimum [mm]	Redovna vrijednost [mm]	Odabrano [mm]
Udaljenosti do kraja e_1	$1,2 \cdot d_0 = 18$	$3,0 \cdot d_0 = 45$	45
Udaljenosti do ruba e_2	$1,2 \cdot d_0 = 15$	$1,5 \cdot d_0 = 22,5$	55
Razmak p_1	$2,2 \cdot d_0 = 33$	$3,5 \cdot d_0 = 52,5$	-
Razmak p_2	$2,4 \cdot d_0 = 36$	$3,0 \cdot d_0 = 45$	-

Tablica 9: Razmaci i udaljenosti do kraja i ruba



Slika 56: Skica priključka dijagonale

Otpornost vijaka na odrez

Posmična otpornost jednog vijka

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

$$A_s = 1,15 \text{ cm}^2$$

$\alpha_v = 0,5$ -za vijke od nehrđajućeg čelika

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \cdot 80,0 \cdot 1,15}{1,25} = 36,8 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{F_{v,Rd}} = \frac{26,42}{36,8} < 1,0 \rightarrow \text{zadovoljava}$$

Otpornost na pritisak po omotaču rupe

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

Gdje je za kranje vijke:

$$\alpha_b = \min\left(\frac{e_1}{d_0}; \frac{3f_{ub}}{f_u}; 3\right) = \min\left(\frac{45}{15} = 3,0; \frac{3 \cdot 80}{31,0} = 7,7; 3\right) = 3,0$$

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{3,0 \cdot 31,0 \cdot 1,4 \cdot 0,6}{1,25} = 62,5 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{\sum F_{b,Rd}} = \frac{26,42}{62,5} < 1,0 \rightarrow \text{zadovoljava}$$

Otpornost na lom netto presjeka

$$A_{netto} = (110 - 15) \cdot 6 = 570 \text{ mm}^2$$

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{netto} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 5,7 \cdot 31,0}{1,25} = 127,2 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{u,Rd}} = \frac{24,28}{127,2} < 1,0 \rightarrow \text{zadovoljava}$$

Otpornost na lom brutto presjeka

$$A_{\text{brutto}} = 110 \cdot 6 = 660 \text{ mm}^2$$

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{\text{brutto}} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 6,6 \cdot 31,0}{1,25} = 147,3 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{u,Rd}} = \frac{24,28}{147,3} < 1,0 \rightarrow \text{zadovoljava}$$

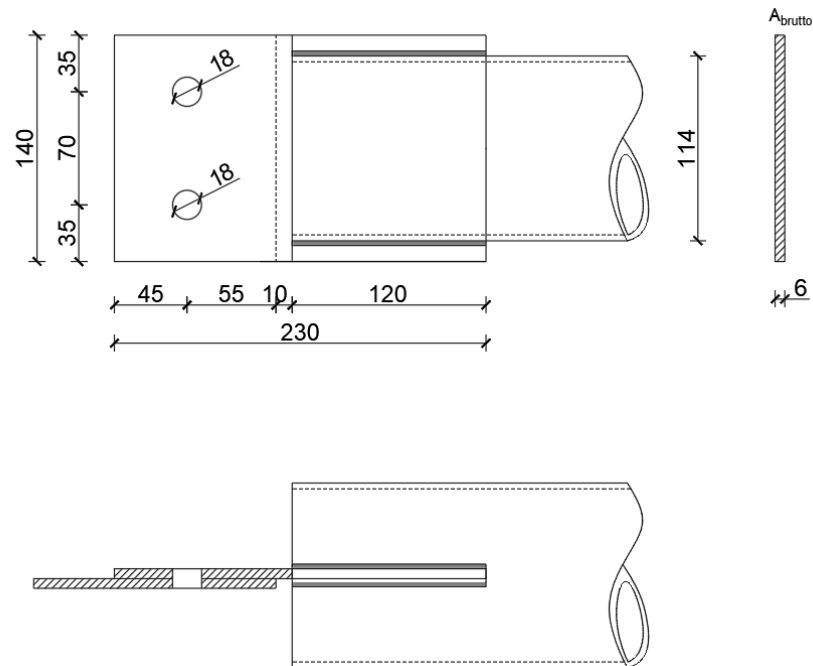
6.1.2. Spoj prstena na rebra

Profil elementa prstena je CHS 114,3 x 3,6 mm kvalitete aluminijske legure EN-AW 6082 T6. Najveća tlačna sila u elementu iznosi 67,82 kN, a vlačna 50,33 kN. Korištena su dva vijka od nehrđajućeg čelika legure EN-AW A2 80 promjera 16 mm. Debljina pločice je 6 mm. Element je na pločicu spojen zavarom debljine 3 mm s obje strane na duljini od 480 mm.

Odabrano: 2 vijka M16

Udaljenosti i razmaci	Minimum [mm]	Redovna vrijednost [mm]	Odabrano [mm]
Udaljenosti do kraja e_1	$1,2 \cdot d_0 = 21,6$	$3,0 \cdot d_0 = 54$	45
Udaljenosti do ruba e_2	$1,2 \cdot d_0 = 21,6$	$1,5 \cdot d_0 = 27$	45
Razmak p_1	$2,2 \cdot d_0 = 39,8$	$3,5 \cdot d_0 = 63$	45
Razmak p_2	$2,4 \cdot d_0 = 43,2$	$3,0 \cdot d_0 = 54$	50

Tablica 10: Razmaci i udaljenosti do kraja i ruba



Slika 57: Skica priključka prstena

Otpornost vijaka na odrez

Posmična otpornost jednog vijka

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

$$A_s = 1,57 \text{ cm}^2$$

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \cdot 80,0 \cdot 1,57}{1,25} = 50,2 \text{ kN}$$

Računska otpornost dvaju jednoreznih vijaka

$$F_{v,Rd} = 2 \cdot 50,2 = 100,4 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{F_{v,Rd}} = \frac{67,82}{100,4} < 1,0 \rightarrow \text{zadovoljava}$$

Otpornost na pritisak po omotaču rupe

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

Gdje je za kranje vijke:

$$\alpha_b = \min\left(\frac{e_1}{d_0}; \frac{3f_{ub}}{f_u}; 3\right) = \min\left(\frac{45}{18} = 2,5; \frac{3 \cdot 80}{31,0} = 7,7; 3\right) = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 31,0 \cdot 1,6 \cdot 0,6}{1,25} = 59,5 \text{ kN}$$

$$\sum F_{b,Rd} = 2 \times 59,5 = 119,0 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{\sum F_{b,Rd}} = \frac{67,82}{119,0} < 1,0 \rightarrow \text{zadovoljava}$$

Otpornost na lom netto presjeka

$$A_{netto} = (140 - 2 \cdot 18) \cdot 6 = 624 \text{ mm}^2$$

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{netto} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 6,24 \cdot 31}{1,25} = 139,3 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{u,Rd}} = \frac{50,33}{139,3} < 1,0 \rightarrow \text{zadovoljava}$$

Otpornost na lom brutto presjeka

$$A_{brutto} = 140 \cdot 6 = 840 \text{ mm}^2$$

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{brutto} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 8,4 \cdot 31,0}{1,25} = 187,5 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{u,Rd}} = \frac{50,33}{187,5} < 1,0 \rightarrow \text{zadovoljava}$$

Priključak će se provjeriti u računalnom programu Idea Statica.

Project:
Project no:
Author:



Material

Steel EN-AW 6082 T6 (5-15), EN-AW 6082 T6 (0-5)
Concrete C25/30

Project item Priključak prstena i dijagonale na element rebra

Design

Name Priključak prstena i dijagonale na element rebra
Description
Analysis Stress, strain/ simplified loading

Members

Geometry

Name	Cross-section	β - Direction [°]	γ - Pitch [°]	α - Rotation [°]	Offset ex [mm]	Offset ey [mm]	Offset ez [mm]
M1	1 - SHS 180x 180x12(RHS180x180)	0,0	90,0	0,0	0	0	0
M2	2 - CHS114,3(CHS114,3,3,6)	0,0	0,0	0,0	0	0	0
M3	3 - CHS88,9(CHS88,9,3,2)	4,0	-40,0	0,0	0	0	0

Supports and forces

Name	Support	Forces in	X [mm]
M1 / begin	N-Vy-Vz-Mx-My-Mz	Node	0
M1 / end	N-Vy-Vz-Mx-My-Mz	Node	0
M2 / end		Bolts	0
M3 / end		Bolts	0

Project:
Project no:
Author:

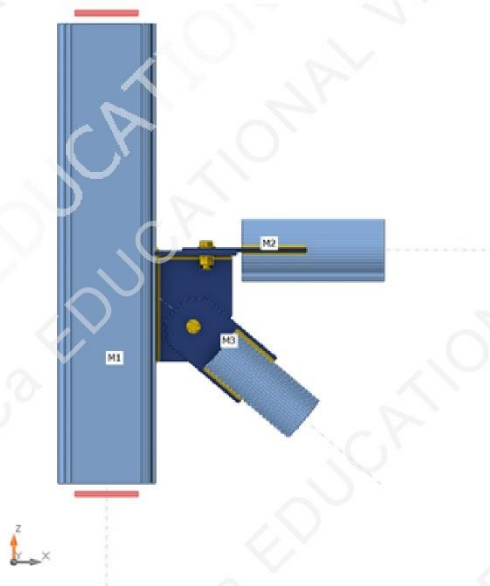
IDEA StatiCa®
Calculate yesterday's estimates



Slika 59: :Report priključka iz IDEA StatiCa

Project:
Project no:
Author:

IDEA StatiCa®
Calculate yesterday's estimates



Slika 60: Report priključka iz IDEA StatiCa

Project:
Project no:
Author:



Cross-sections

Name	Material
1 - SHS 180x180x12(RHS180x180)	EN-AW 6082 T6 (5-15)
2 - CHS114,3(CHS114,3,3,6)	EN-AW 6082 T6 (0-5)
3 - CHS88,9(CHS88,9,3,2)	EN-AW 6082 T6 (0-5)

Bolts

Name	Bolt assembly	Diameter [mm]	f_u [MPa]	Gross area [mm ²]
M16	M16	16	800,0	201
M14	M14	14	800,0	154

Load effects (Equilibrium not required)

Name	Member	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
LE1	M2 / End	-67,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	M3 / End	-26,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Check

Summary

Name	Value	Check status
Analysis	100,0%	OK
Plates	1,5 < 5,0%	OK
Bolts	77,7 < 100%	OK
Welds	80,8 < 100%	OK
Buckling	Not calculated	

Project:
Project no:
Author:



Plates

Name	Material	t_p [mm]	Loads	σ_{Ed} [MPa]	ϵ_{pl} [%]	$\sigma_{c,Ed}$ [MPa]	Status
M1-w 1	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE1	238,7	0,0	0,0	OK
M1-arc 1	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE1	140,9	0,0	0,0	OK
M1-arc 2	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE1	164,3	0,0	0,0	OK
M1-arc 3	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE1	194,2	0,0	0,0	OK
M1-w 2	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE1	156,9	0,0	0,0	OK
M1-arc 4	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE1	56,8	0,0	0,0	OK
M1-arc 5	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE1	63,4	0,0	0,0	OK
M1-arc 6	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE1	65,7	0,0	0,0	OK
M1-w 3	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE1	64,5	0,0	0,0	OK
M1-arc 7	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE1	67,1	0,0	0,0	OK
M1-arc 8	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE1	64,9	0,0	0,0	OK
M1-arc 9	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE1	58,4	0,0	0,0	OK
M1-w 4	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE1	156,9	0,0	0,0	OK
M1-arc 10	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE1	194,9	0,0	0,0	OK
M1-arc 11	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE1	166,3	0,0	0,0	OK
M1-arc 12	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE1	136,1	0,0	0,0	OK
M2	EN-AW 6082 T6 (0-5)	3,6	LE1	210,9	0,1	0,0	OK
M3	EN-AW 6082 T6 (0-5)	3,2	LE1	133,2	0,0	0,0	OK
SP1	EN-AW 6082 T6 (5-15)	6,0	LE1	261,0	1,5	29,0	OK
CPL1	EN-AW 6082 T6 (5-15)	6,0	LE1	260,1	0,1	29,0	OK
CPL2a	EN-AW 6082 T6 (5-15)	6,0	LE1	260,0	0,0	20,0	OK
CPL2b	EN-AW 6082 T6 (5-15)	6,0	LE1	248,0	0,0	19,6	OK

Design data

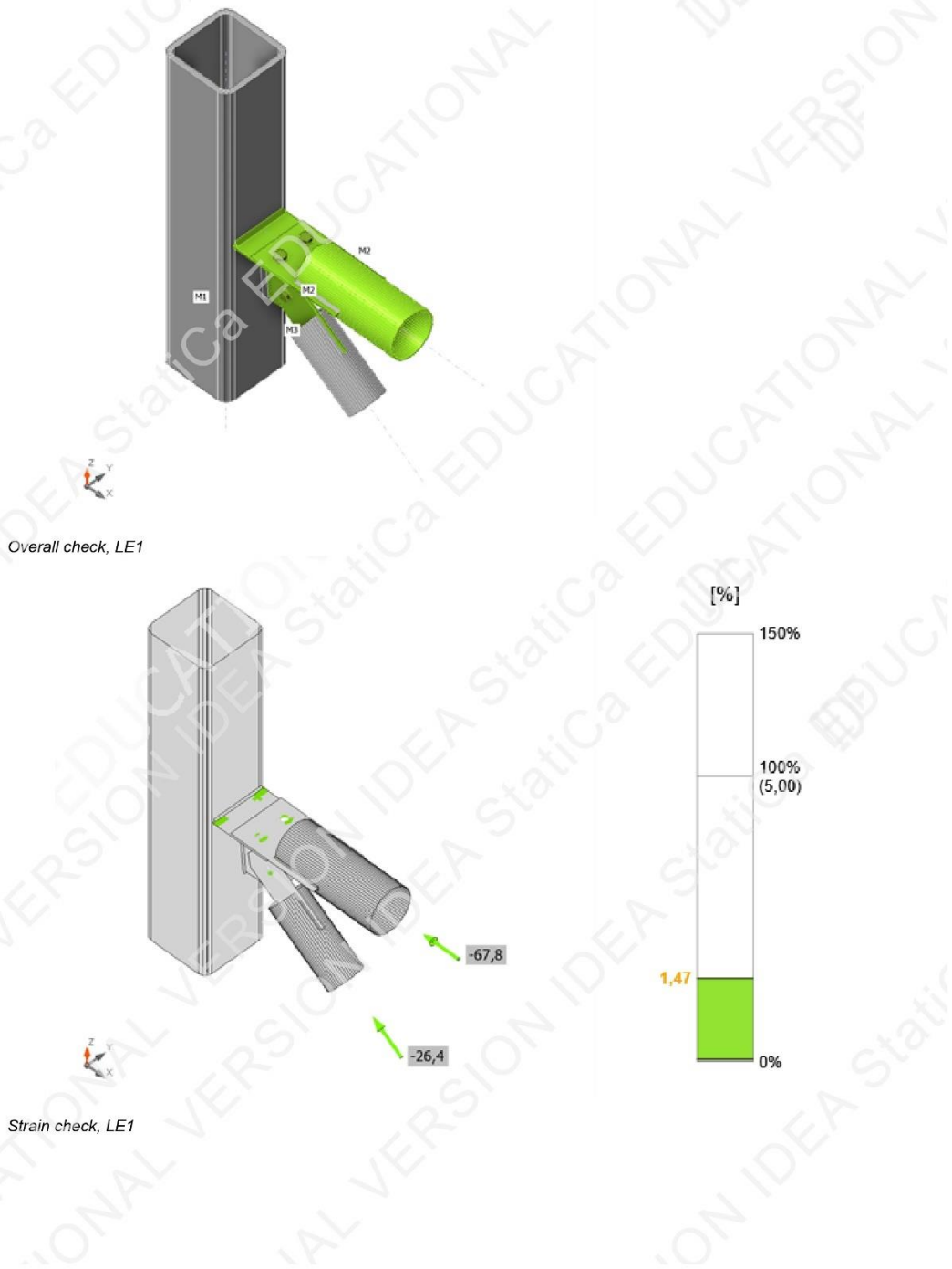
Material	f_y [MPa]	ϵ_{lim} [%]
EN-AW 6082 T6 (5-15)	260,0	5,0
EN-AW 6082 T6 (0-5)	250,0	5,0

Symbol explanation

t_p	Plate thickness
σ_{Ed}	Equivalent stress
ϵ_{pl}	Plastic strain
$\sigma_{c,Ed}$	Contact stress
f_y	Yield strength
ϵ_{lim}	Limit of plastic strain

Project:
Project no:
Author:

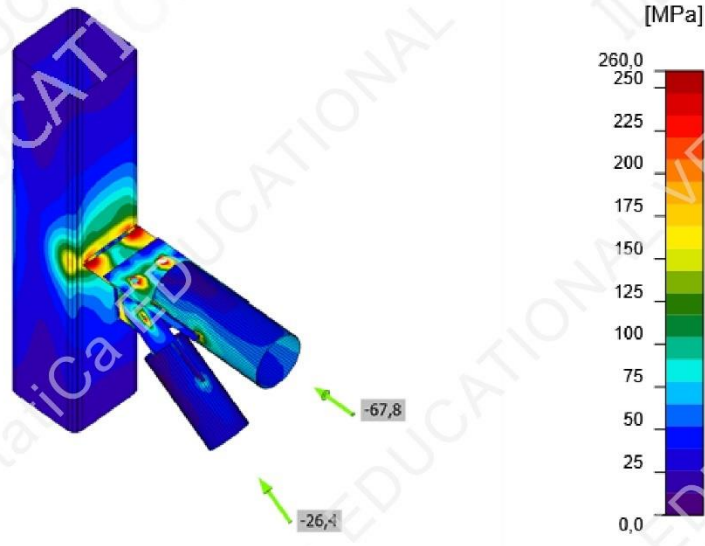
IDEA StatiCa®
Calculate yesterday's estimates



Slika 63: Report priključka iz IDEA StatiCa

Project:
 Project no:
 Author:

IDEA StatiCa®
 Calculate yesterday's estimates



Equivalent stress, LE1

Bolts

Shape	Item	Grade	Loads	$F_{t,Ed}$ [kN]	$F_{v,Ed}$ [kN]	$F_{b,Rd}$ [kN]	U_t [%]	U_s [%]	U_{ts} [%]	Status
	B1	M16 - 1	LE1	8,2	33,9	59,5	11,6	67,5	74,0	OK
	B2	M16 - 1	LE1	13,0	33,9	59,5	18,2	67,5	77,7	OK
	B3	M14 - 2	LE1	5,5	26,4	52,1	8,8	71,5	77,4	OK

Design data

Grade	$F_{t,Rd}$ [kN]	$F_{p,Rd}$ [kN]	$F_{v,Rd}$ [kN]
M16 - 1	90,4	71,2	50,2
M14 - 2	66,5	62,2	36,9

Slika 64: Report priključka iz IDEA StatiCa

Project:
Project no:
Author:



Symbol explanation

$F_{t,Ed}$	Tension force
$F_{v,Ed}$	Resultant of bolt shear forces V_y and V_z in shear planes
$F_{b,Rd}$	Plate bearing resistance EN 1993-1-8 – Tab. 3.4
U_t	Utilization in tension
U_s	Utilization in shear
U_{ts}	Interaction of tension and shear EN 1993-1-8 – Tab. 3.4
$F_{t,Rd}$	Bolt tension resistance EN 1993-1-8 – Tab. 3.4
$B_{p,Rd}$	Punching shear resistance EN 1993-1-8 – Tab. 3.4
$F_{v,Rd}$	Bolt shear resistance EN 1993-1-8 – Tab. 3.4

Welds

Item	Edge	T_w [mm]	L [mm]	Loads	$\sigma_{w,Ed}$ [MPa]	ϵ_{pl} [%]	σ_{\perp} [MPa]	τ_{\perp} [MPa]	τ_{\parallel} [MPa]	Ut [%]	U _t [%]	Status
CPL1	M2-arc 1	▲ 3,0 ▼	119	LE1	160,8	0,0	-5,3	17,4	-91,1	51,9	14,7	OK
		▲ 3,0 ▼	119	LE1	121,5	0,0	-54,0	39,8	48,6	39,2	14,9	OK
CPL1	M2-arc 32	▲ 3,0 ▼	119	LE1	160,8	0,0	-5,8	17,4	91,2	51,9	14,8	OK
		▲ 3,0 ▼	119	LE1	116,4	0,0	36,7	-16,3	-61,7	37,6	14,7	OK
CPL1	M2-arc 33	▲ 3,0 ▼	119	LE1	161,1	0,0	-5,9	17,3	-91,3	52,0	15,2	OK
		▲ 3,0 ▼	119	LE1	119,2	0,0	-52,5	39,8	47,3	38,4	14,4	OK
CPL1	M2-arc 64	▲ 3,0 ▼	119	LE1	161,0	0,0	-5,9	17,3	91,3	51,9	15,3	OK
		▲ 3,0 ▼	119	LE1	116,3	0,0	36,8	-16,5	-61,5	37,5	14,3	OK
M1-w 1	CPL2a	▲ 5,0 ▼	196	LE1	76,2	0,0	12,5	13,9	-41,1	24,6	11,4	OK
		▲ 5,0 ▼	196	LE1	65,8	0,0	10,0	-8,6	36,6	21,2	6,6	OK
SP1	CPL2a	▲ 5,0 ▼	140	LE1	79,7	0,0	-20,6	-16,9	41,1	25,7	12,1	OK
		▲ 5,0 ▼	140	LE1	81,5	0,0	-25,8	29,8	-33,2	26,3	11,7	OK
CPL2b	M3-arc 13	▲ 3,0 ▼	89	LE1	77,9	0,0	-1,0	9,1	44,0	25,1	7,4	OK
		▲ 3,0 ▼	89	LE1	59,5	0,0	15,5	-6,4	-32,6	19,2	7,9	OK
CPL2b	M3-arc 14	▲ 3,0 ▼	89	LE1	79,2	0,0	-1,2	8,8	-44,9	25,6	8,4	OK
		▲ 3,0 ▼	89	LE1	59,1	0,0	15,8	-7,8	31,9	19,1	7,0	OK
CPL2b	M3-arc 37	▲ 3,0 ▼	89	LE1	77,7	0,0	-2,1	8,1	44,1	25,1	8,2	OK
		▲ 3,0 ▼	89	LE1	58,2	0,0	14,9	-5,7	-32,0	18,8	7,1	OK
CPL2b	M3-arc 38	▲ 3,0 ▼	89	LE1	76,5	0,0	-1,5	8,7	-43,3	24,7	7,6	OK
		▲ 3,0 ▼	89	LE1	57,1	0,0	15,1	-6,9	31,0	18,4	7,7	OK
M1-w 1	SP1	▲ 6,0 ▼	131	LE1	247,7	0,0	-115,1	-117,3	-47,8	79,9	35,8	OK
		▲ 6,0 ▼	131	LE1	250,6	0,0	-121,2	118,9	43,7	80,8	32,1	OK

Design data

Material	β_w [-]	$\sigma_{w,Rd}$ [MPa]	0,9 σ [MPa]
EN-AW 6082 T6 (5-15)	0,80	310,0	223,2



Project:

Project no:

Author:

IDEA StatiCa®
Calculate yesterday's estimates

Symbol explanation

T_w	Throat thickness a
L	Length
$\sigma_{w,Ed}$	Equivalent stress
ϵ_{Pl}	Strain
σ_{\perp}	Perpendicular stress
τ_{\perp}	Shear stress perpendicular to weld axis
τ_{\parallel}	Shear stress parallel to weld axis
Ut	Utilization
Ut _c	Weld capacity utilization
β_w	Correlation factor EN 1993-1-8 – Tab. 4.1
$\sigma_{w,Rd}$	Equivalent stress resistance
0.9 σ	Perpendicular stress resistance: 0.9*fu/√M2
▲	Fillet weld

Buckling

Buckling analysis was not calculated.

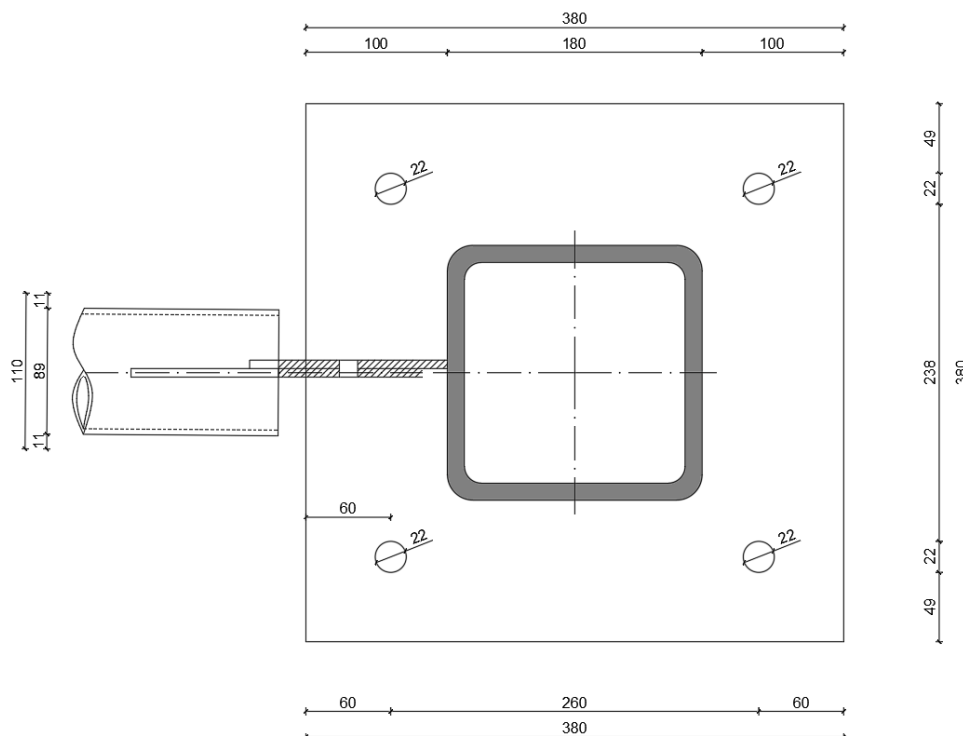
6.2. Priključak u stopi luka s dijagonalom

Spoj luka na temelj ostvaruje se preko podložne ploče dimenzija 380/380/15 mm povezane s lukom dimenzija SHS 180 x 12 mm aluminijske legure kvalitete EN-AW 6082 T6 . Podložna ploča navarena je na kraj stupa i pričvršćena vijcima M20 od nehrđajućeg čelika legure EN-AW A2 80. Između podložne ploče i armirano–betonskog temelja podlijeva se ekspandirajući mort. Tlačna reakcija na ležaju iznosi 99,90 kN, vlačna 36,20 kN. Na luk je spojena dijagonala profila CHS 88,9 x 3,2 mm i pridržana jednim vijkom M14 od nehrđajućeg čelika.

Odabrano: 4 vijka M20

Udaljenosti i razmaci	Minimum [mm]	Redovna vrijednost [mm]	Odabrano [mm]
Udaljenosti do kraja e_1	$1,2 \cdot d_0 = 26,4$	$3,0 \cdot d_0 = 66$	60
Udaljenosti do ruba e_2	$1,2 \cdot d_0 = 26,4$	$1,5 \cdot d_0 = 33$	60
Razmak p_1	$2,2 \cdot d_0 = 48,4$	$3,5 \cdot d_0 = 77$	240
Razmak p_2	$2,4 \cdot d_0 = 52,8$	$3,0 \cdot d_0 = 66$	240

Tablica 11: Razmaci i udaljenosti do kraja i ruba



Slika 67: Skica priključka u stopi luka

Otpornost vijaka na odrez

Posmična otpornost jednog vijka

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

$$A_s = 2,45 \text{ cm}^2$$

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \cdot 80,0 \cdot 2,45}{1,25} = 78,4 \text{ kN}$$

Računska otpornost četvero vijka

$$F_{v,Rd} = 4 \cdot 78,4 = 313,6 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{F_{v,Rd}} = \frac{99,90}{313,6} < 1,0 \rightarrow \text{zadovoljava}$$

Otpornost na pritisak po omotaču rupe

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

Gdje je za kranje vijke:

$$\alpha_b = \min\left(\frac{e_1}{d_0}; \frac{3f_{ub}}{f_u}; 3\right) = \min\left(\frac{60}{22} = 2,7; \frac{3 \cdot 80}{31,0} = 7,7; 3\right) = 2,7$$

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,7 \cdot 31,0 \cdot 2,0 \cdot 1,5}{1,25} = 200,9 \text{ kN}$$

$$\sum F_{b,Rd} = 4 \times 200,9 = 803,6 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{\sum F_{b,Rd}} = \frac{99,90}{803,6} < 1,0 \rightarrow \text{zadovoljava}$$

Otpornost podložne ploče na lom netto presjeka

$$A_{\text{netto}} = (380 - 4 \cdot 22) \cdot 15 = 4380 \text{ mm}^2$$

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{\text{netto}} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 43,80 \cdot 31}{1,25} = 1049,9 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{u,Rd}} = \frac{99,90}{1049,9} < 1,0 \rightarrow \text{zadovoljava}$$

Otpornost na lom brutto presjeka

$$A_{\text{brutto}} = 380 \cdot 15 = 5700 \text{ mm}^2$$

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{\text{brutto}} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 57,0 \cdot 31,0}{1,25} = 1272,2 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{u,Rd}} = \frac{99,90}{1272,2} < 1,0 \rightarrow \text{zadovoljava}$$

Provjera vijka s glavom na vlačnu reakciju:

Vlačna otpornost vijka

$$F_{v,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

$$A_s = 2,45 \text{ cm}^2$$

$$F_{v,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 80,0 \cdot 2,45}{1,25} = 141,1 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{F_{v,Rd}} = \frac{36,2}{141,1} < 1,0 \rightarrow \text{zadovoljava}$$

Slom vijka izvlačenjem

Karakteristična otpornost u slučaju sloma izvlačenjem $N_{Rk,p}$ pričvršćivača s glavom dana je izrazom iz HRN EN 1992-4.

$$N_{v,Rk} = k_2 \cdot A_h \cdot f_{ck}$$

$$A_h = \frac{\pi}{4} \cdot (d_h^2 - d_a^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (4,5^2 - 2^2) = 12,8 \text{ cm}^2$$

d_h - stranica glave vijka

$$N_{v,Rd} = \frac{k_2 \cdot A_h \cdot f_{ck}}{\gamma_{Mc}} = \frac{7,5 \cdot 12,8 \cdot 2,5}{1,5} = 160,0 \text{ kN}$$

$k_2 = 7,5$ za pričvršćivače u puknutom betonu

$$\frac{N_{Ed}}{N_{v,Rd}} = \frac{36,2}{160,0} < 1,0 \rightarrow \text{zadovoljava}$$

Priključak će se provjeriti u računalnom programu Idea Statica. Otpor sidrenih vijaka računalni program procjenjuje sa EN 1992-4, provjerava se slom čelika, slom betonskog konusa, slom izvlačenje, kombiniran slom betona izvlačenjem i slom prijanjajućih pričvršćivača, slom betona cijepanjem, slom betona 'napuhivanjem'.

Project:
 Project no:
 Author:



Project item Priključak u stopi luka s dijagonalom

Design

Name Priključak u stopi luka s dijagonalom
 Description
 Analysis Stress, strain/ loads in equilibrium

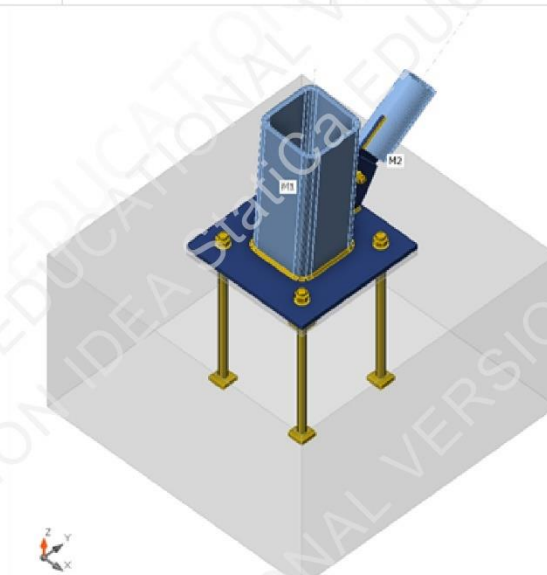
Members

Geometry

Name	Cross-section	β - Direction [°]	γ - Pitch [°]	α - Rotation [°]	Offset ex [mm]	Offset ey [mm]	Offset ez [mm]
M1	1 - SHS180x180(RHS180x180)	0,0	86,0	0,0	0	0	0
M2	2 - CHS88,9,3,2	86,0	40,0	0,0	0	0	0

Supports and forces

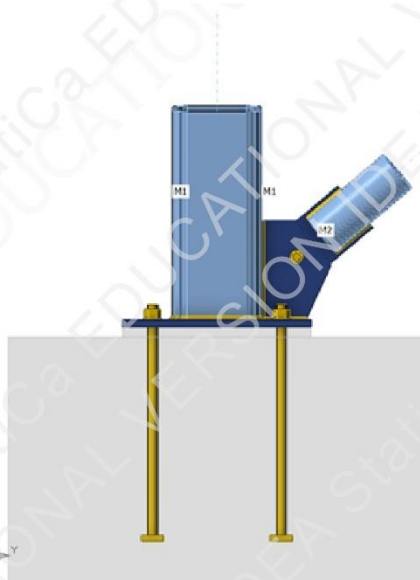
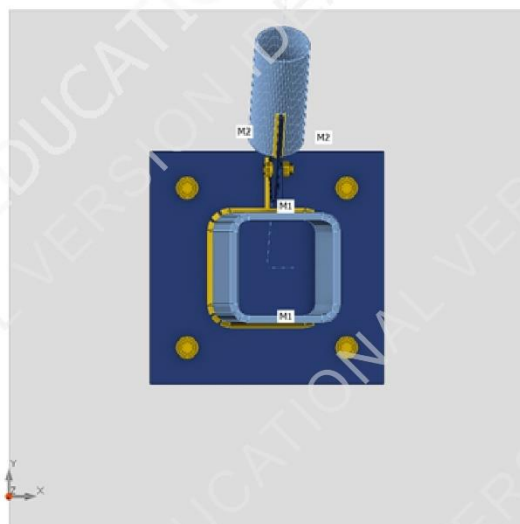
Name	Support	Forces in	X [mm]
M1 / end		Bolts	0
M2 / end		Bolts	0



Slika 68: Report priključka iz IDEA StatiCa

Project:
Project no:
Author:

IDEA StatiCa®
Calculate yesterday's estimates



Cross-sections

Name	Material
1 - SHS180x130(RHS180x180)	EN-AW 6082 T6 (5-15)
2 - CHS88,9,3,2	EN-AW 6082 T6 (0-5)

2 / 9

Slika 69: Report priključka iz IDEA StatiCa

Project:
Project no:
Author:



Anchors / Bolts

Name	Bolt assembly	Diameter [mm]	f_u [MPa]	Gross area [mm ²]
M20	M20	20	800,0	314
M14	M14	14	800,0	154

Load effects (forces in equilibrium)

Name	Member	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
LE1	M1 / End	-99,9	-19,1	-22,3	0,0	0,0	0,0
	M2 / End	-26,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
LE2	M1 / End	36,2	-19,1	-22,3	0,0	0,0	0,0
	M2 / End	-26,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Unbalanced forces

Name	X [kN]	Y [kN]	Z [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
LE1	13,9	-39,3	-118,2	0,0	0,0	0,0
LE2	23,4	-39,3	17,6	0,0	0,0	0,0

Foundation block

Item	Value	Unit
CB 1		
Dimensions	840 x 840	mm
Depth	500	mm
Anchor	M20	
Anchoring length	400	mm
Shear force transfer	Anchors	
Mortar joint	20	mm

Check

Summary

Name	Value	Check status
Analysis	100,0%	OK
Plates	0,0 < 5,0%	OK
Bolts	77,5 < 100%	OK
Anchors	95,3 < 100%	OK
Welds	37,4 < 100%	OK
Concrete block	9,3 < 100%	OK
Buckling	Not calculated	

Project:
Project no:
Author:



Plates

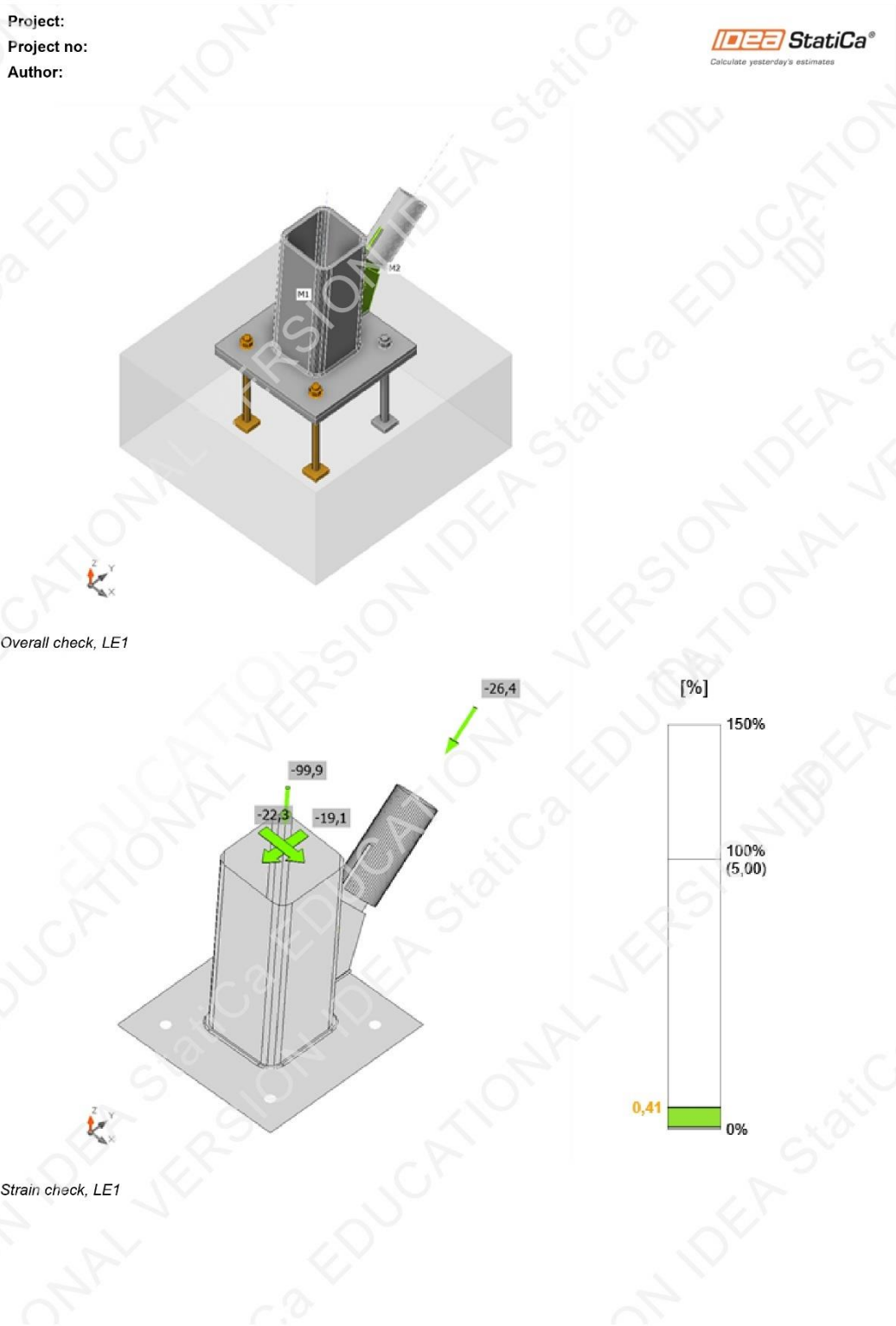
Name	Material	t_p [mm]	Loads	σ_{Ed} [MPa]	ϵ_{pl} [%]	$\sigma_{c,Ed}$ [MPa]	Status
M1-w 1	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE2	42,4	0,0	0,0	OK
M1-arc 1	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE2	33,1	0,0	0,0	OK
M1-arc 2	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE1	36,1	0,0	0,0	OK
M1-arc 3	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE1	37,6	0,0	0,0	OK
M1-w 2	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE1	58,7	0,0	0,0	OK
M1-arc 4	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE1	52,7	0,0	0,0	OK
M1-arc 5	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE1	54,9	0,0	0,0	OK
M1-arc 6	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE1	54,4	0,0	0,0	OK
M1-w 3	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE1	51,8	0,0	0,0	OK
M1-arc 7	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE1	25,4	0,0	0,0	OK
M1-arc 8	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE2	24,8	0,0	0,0	OK
M1-arc 9	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE2	28,0	0,0	0,0	OK
M1-w 4	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE2	41,8	0,0	0,0	OK
M1-arc 10	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE2	45,1	0,0	0,0	OK
M1-arc 11	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE2	46,5	0,0	0,0	OK
M1-arc 12	EN-AW 6082 T6 (5-15)	12,0	LE2	45,4	0,0	0,0	OK
M2	EN-AW 6082 T6 (0-5)	3,2	LE2	136,5	0,0	0,0	OK
SP1	EN-AW 6082 T6 (5-15)	15,0	LE2	59,5	0,0	0,0	OK
CPL1a	EN-AW 6082 T6 (5-15)	6,0	LE2	260,0	0,0	19,2	OK
CPL1b	EN-AW 6082 T6 (5-15)	6,0	LE2	247,0	0,0	18,4	OK

Design data

Material	f_y [MPa]	ϵ_{lim} [%]
EN-AW 6082 T6 (5-15)	260,0	5,0
EN-AW 6082 T6 (0-5)	250,0	5,0

Symbol explanation

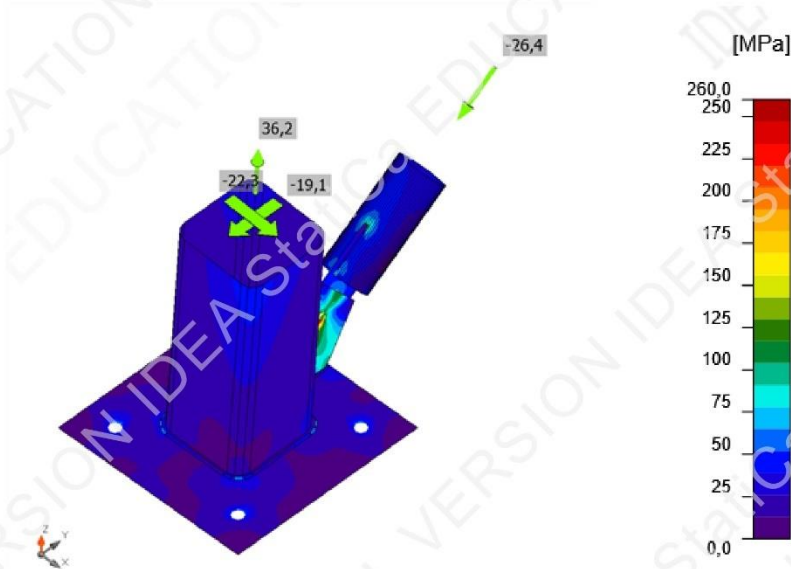
t_p	Plate thickness
σ_{Ed}	Equivalent stress
ϵ_{pl}	Plastic strain
$\sigma_{c,Ed}$	Contact stress
f_y	Yield strength
ϵ_{lim}	Limit of plastic strain



Slika 72: Report priključka iz IDEA StatiCa

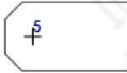
Project:
Project no:
Author:

IDEA StatiCa®
Calculate yesterday's estimates



Equivalent stress, LE2

Bolts

Shape	Item	Grade	Loads	$F_{t,Ed}$ [kN]	$F_{v,Ed}$ [kN]	$F_{b,Rd}$ [kN]	U_t [%]	U_s [%]	U_{ts} [%]	Status
	B5	M14 - 1	LE2	5,5	26,4	52,1	8,9	71,5	77,5	OK

Design data

Grade	$F_{t,Rd}$ [kN]	$B_{p,Rd}$ [kN]	$F_{v,Rd}$ [kN]
M14 - 1	66,5	62,2	36,9

Symbol explanation

$F_{t,Ed}$	Tension force
$F_{v,Ed}$	Resultant of bolt shear forces V_y and V_z in shear planes
$F_{b,Rd}$	Plate bearing resistance EN 1993-1-8 – Tab. 3.4
U_t	Utilization in tension
U_s	Utilization in shear
U_{ts}	Interaction of tension and shear EN 1993-1-8 – Tab. 3.4
$F_{t,Rd}$	Bolt tension resistance EN 1993-1-8 – Tab. 3.4
$B_{p,Rd}$	Punching shear resistance EN 1993-1-8 – Tab. 3.4
$F_{v,Rd}$	Bolt shear resistance EN 1993-1-8 – Tab. 3.4

6 / 9

Slika 73: Report priključka iz IDEA StatiCa

Project:
Project no:
Author:



Anchors

Shape	Item	Loads	N_{Ed} [kN]	V_{Ed} [kN]	$N_{Rd,c}$ [kN]	$N_{Rd,p}$ [kN]	$N_{Rd,cb}$ [kN]	$V_{Rd,s}$ [kN]	$V_{Rd,c}$ [kN]	$V_{Rd,cp}$ [kN]	U_t [%]	U_s [%]	U_{ts} [%]	Status
	A1	LE2	7,5	11,2	135,0	178,2	-	19,3	45,4	334,6	21,2	90,2	95,3	OK
	A2	LE2	7,7	11,6	135,0	178,2	-	19,2	45,4	334,6	21,2	90,2	95,3	OK
	A3	LE2	6,6	11,6	135,0	178,2	-	19,4	-	334,6	21,2	59,5	14,8	OK
	A4	LE2	6,8	11,3	135,0	178,2	-	19,4	53,0	334,6	21,2	58,3	53,4	OK

Design data

Grade	$N_{Rd,s}$ [kN]
M20 - 2	104,1

Symbol explanation

N_{Ed}	Tension force
V_{Ed}	Resultant of bolt shear forces V_y and V_z in shear planes
$N_{Rd,c}$	Design resistance in case of concrete cone failure under tension load - EN 1992-4 – 7.2.1.4
$N_{Rd,p}$	Design resistance in case of pull-out failure - EN 1992-4 – 7.2.1.5
$N_{Rd,cb}$	Design resistance in case of concrete blow-out failure - EN 1992-4 – 7.2.1.8
$V_{Rd,s}$	Design shear resistance of a fastener in case of steel failure - EN 1992-4 – 7.2.2.3.2
$V_{Rd,c}$	Design resistance in case of concrete cone failure under shear load - EN 1992-4 – 7.2.2.5
$V_{Rd,cp}$	Design resistance in case of concrete pryout failure - EN 1992-4 – 7.2.2.4
U_t	Utilization in tension
U_s	Utilization in shear
U_{ts}	Utilization in tension and shear
$N_{Rd,s}$	Design tensile resistance of a fastener in case of steel failure - EN 1992-4 – 7.2.1.3

Project:
Project no:
Author:



Welds

Item	Edge	T _w [mm]	L [mm]	Loads	$\sigma_{w,Ed}$ [MPa]	ϵ_{pl} [%]	σ_{\perp} [MPa]	τ_{\perp} [MPa]	τ_{\parallel} [MPa]	Ut [%]	Ut _c [%]	Status
SP1	M1-w 1	▲↓ 5,0	120	LE2	49,8	0,0	12,8	-14,2	-23,9	16,1	10,8	OK
SP1	M1-arc 1	▲↓ 5,0	12	LE2	61,4	0,0	24,7	-14,6	-29,0	19,8	19,8	OK
SP1	M1-arc 2	▲↓ 5,0	12	LE2	65,2	0,0	35,9	-13,3	-28,4	21,0	21,0	OK
SP1	M1-arc 3	▲↓ 5,0	12	LE2	46,5	0,0	20,4	-9,6	-22,1	15,0	15,0	OK
SP1	M1-w 2	▲↓ 5,0	119	LE2	53,6	0,0	-2,3	3,7	-30,7	17,3	8,4	OK
SP1	M1-arc 4	▲↓ 5,0	12	LE2	29,3	0,0	25,5	-7,4	-3,9	11,4	9,5	OK
SP1	M1-arc 5	▲↓ 5,0	12	LE2	48,0	0,0	41,2	-12,9	-6,0	18,4	15,5	OK
SP1	M1-arc 6	▲↓ 5,0	12	LE2	45,4	0,0	27,7	-13,5	15,7	14,6	14,6	OK
SP1	M1-w 3	▲↓ 5,0	120	LE2	37,9	0,0	11,9	-4,7	20,2	12,2	10,4	OK
SP1	M1-arc 7	▲↓ 5,0	12	LE2	54,2	0,0	33,7	-10,4	22,2	17,5	17,5	OK
SP1	M1-arc 8	▲↓ 5,0	12	LE2	61,0	0,0	47,1	-14,8	16,9	21,1	19,7	OK
SP1	M1-arc 9	▲↓ 5,0	12	LE2	62,2	0,0	31,9	-13,3	27,8	20,1	20,1	OK
SP1	M1-w 4	▲↓ 5,0	120	LE2	38,5	0,0	8,4	-4,0	21,4	12,4	8,8	OK
SP1	M1-arc 10	▲↓ 5,0	12	LE2	43,5	0,0	34,0	-15,5	-2,0	15,3	14,0	OK
SP1	M1-arc 11	▲↓ 5,0	12	LE2	59,3	0,0	48,4	-18,7	6,6	21,7	19,1	OK
SP1	M1-arc 12	▲↓ 5,0	12	LE2	39,1	0,0	32,8	-11,7	-3,5	14,7	12,6	OK
M1-w 2	CPL1a	▲ 4,0 ▼	199	LE1	115,5	0,0	-50,2	-47,0	37,4	37,3	15,0	OK
		▲ 4,0 ▼	199	LE1	67,7	0,0	-10,7	11,4	36,9	21,9	10,2	OK
SP1	CPL1a	▲ 4,0 ▼	89	LE2	37,6	0,0	5,5	4,7	20,9	12,1	8,2	OK
		▲ 4,0 ▼	90	LE2	50,7	0,0	32,1	-21,7	-6,5	16,4	10,0	OK
CPL1b	M2-arc 17	▲ 3,0	89	LE1	113,2	0,0	23,2	-0,5	-64,0	36,5	14,6	OK
CPL1b	M2-arc 49	▲ 3,0	89	LE1	113,5	0,0	22,2	-0,8	-64,3	36,6	14,6	OK
CPL1b	M2	▲ 3,0	179	LE2	115,8	0,0	21,6	0,3	65,7	37,4	14,6	OK

Design data

Material	β_w [-]	$\sigma_{w,Rd}$ [MPa]	$0,9 \sigma$ [MPa]
EN-AW 6082 T6 (5-15)	0,80	310,0	223,2

Project:
Project no:
Author:



Symbol explanation

T_w	Throat thickness a
L	Length
$\sigma_{w,Ed}$	Equivalent stress
ϵ_{pl}	Strain
σ_{\perp}	Perpendicular stress
τ_{\perp}	Shear stress perpendicular to weld axis
τ_{\parallel}	Shear stress parallel to weld axis
Ut	Utilization
Ut _c	Weld capacity utilization
β_w	Correlation factor EN 1993-1-8 – Tab. 4.1
$\sigma_{w,Rd}$	Equivalent stress resistance
0.9 σ	Perpendicular stress resistance: 0.9*fu/γM2
▲↓	Fillet weld with contact
▲	Fillet weld

Concrete block

Item	Loads	c [mm]	A _{eff} [mm ²]	σ [MPa]	k _j [-]	f _{jd} [MPa]	Ut [%]	Status
CB 1	LE1	24	39434	3,1	3,00	33,5	9,3	OK

Symbol explanation

c	Bearing width
A _{eff}	Effective area
σ	Average stress in concrete
k _j	Concentration factor
f _{jd}	The ultimate bearing strength of the concrete block
Ut	Utilization

Buckling

Buckling analysis was not calculated.

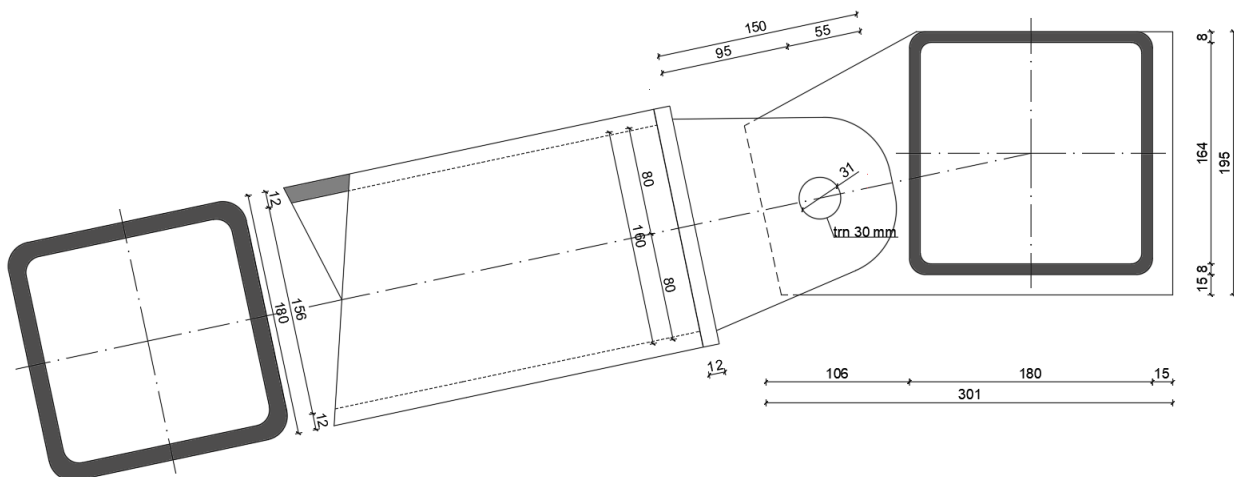
6.3. Priključak rebra na tlačni prsten

Priključak tlačnog prstena i rebra izveden je kao svornjački spoj prema normi EN 1999-1-1. Elementi tlačnog prstena dimenzija SHS 180 x 8 mm navareni su na ploču od aluminija koja ujedno služi i za spajanje luka dimenzija SHS 180 x 12 mm pod nagibom od 12°. Korišten je trn promjera 30 mm od nehrđajućeg čelika. Uzdužna sila u rebro je 99,96 kN, a u tlačnom prstenu 46,12 kN.

Odabrano: trn M30

Geometrija	Minimum [mm]	Odabrano [mm]
Udaljenosti do kraja a_{pin}	$a_{pin} \geq \frac{F_{Ed} \cdot \gamma_{M1}}{2 \cdot t \cdot f_0} + \frac{2 \cdot d_0}{3} = 26,3$	40
Udaljenosti do ruba c_{pin}	$c_{pin} \geq \frac{F_{Ed} \cdot \gamma_{M1}}{2 \cdot t \cdot f_0} + \frac{d_0}{3} = 16$	45

Tablica 12: Razmaci i udaljenosti do kraja i ruba



Slika 77: Skica priključka rebra na tlačni prsten

Otpornost trna na odrez

Posmična otpornost jednog trna

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

$$A_s = 7,07 \text{ cm}^2$$

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \cdot 80,0 \cdot 7,07}{1,25} = 226,2 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{F_{v,Rd}} = \frac{99,96}{226,2} < 1,0 \rightarrow \text{zadovoljava}$$

Otpornost na pritisak po omotaču rupe

$$F_{b,Rd} = \frac{1,5 \cdot f_{o,min} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M1}}$$

$f_{o,min}$ – manja od proračunske granice popuštanja trna i spojenog dijela

$$F_{b,Rd} = \frac{1,5 \cdot f_{o,min} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M1}} = \frac{1,5 \cdot 26 \cdot 3 \cdot 1,6}{1,1} = 170,2 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{F_{b,Rd}} = \frac{99,96}{170,2} < 1,0 \rightarrow \text{zadovoljava}$$

Savijanje trna

Moment savijanja u trnu izračunan je formulom:

$$M_{Ed} = \frac{F_{Ed} (2t_2 + 4e + t_1)}{8} = \frac{99,96 (2 \cdot 0,8 + 4 \cdot 0,1 + 1,6)}{8} = 44,9 \text{ kNcm}$$
$$= 0,45 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} = \frac{1,5 \cdot W_{el} \cdot f_{op}}{\gamma_{M1}} = \frac{1,5 \cdot 2,65 \cdot 60}{1,1} = 216,8 \text{ kNcm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{44,9}{216,8} < 1,0 \rightarrow \text{zadovoljava}$$



Kombinirani posmik i savijanje

$$\left(\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}}\right)^2 + \left(\frac{N_{Ed}}{F_{v,Rd}}\right)^2 = \left(\frac{44,9}{216,8}\right)^2 + \left(\frac{99,96}{226,2}\right)^2 = 0,24 < 1,0 \rightarrow \text{zadovoljava}$$

Priključak će se provjeriti u računalnom programu Idea Statica.

Project:
Project no:
Author:



Project item Priključak tlačnog prstena i rebra

Design

Name Priključak tlačnog prstena i rebra
Description
Analysis Stress, strain/ loads in equilibrium

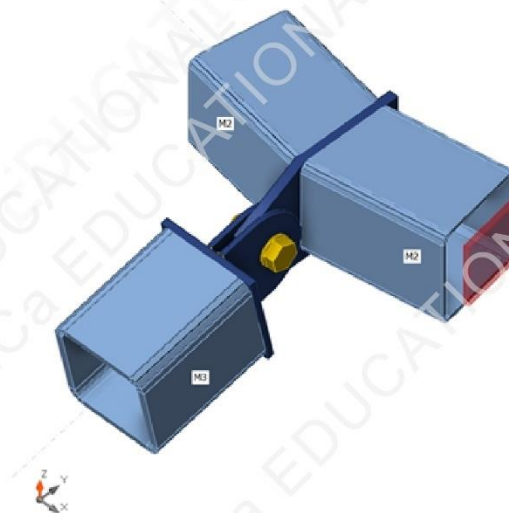
Members

Geometry

Name	Cross-section	β - Direction [°]	γ - Pitch [°]	α - Rotation [°]	Offset ex [mm]	Offset ey [mm]	Offset ez [mm]
M2	2 - RHS180x180X8(RHS180x180)	9,0	0,0	0,0	0	0	0
M2	2 - RHS180x180X8(RHS180x180)	171,0	0,0	0,0	0	0	0
M3	1 - RHS180x180X12(RHS180x180)	-90,0	-12,0	0,0	210	0	0

Supports and forces

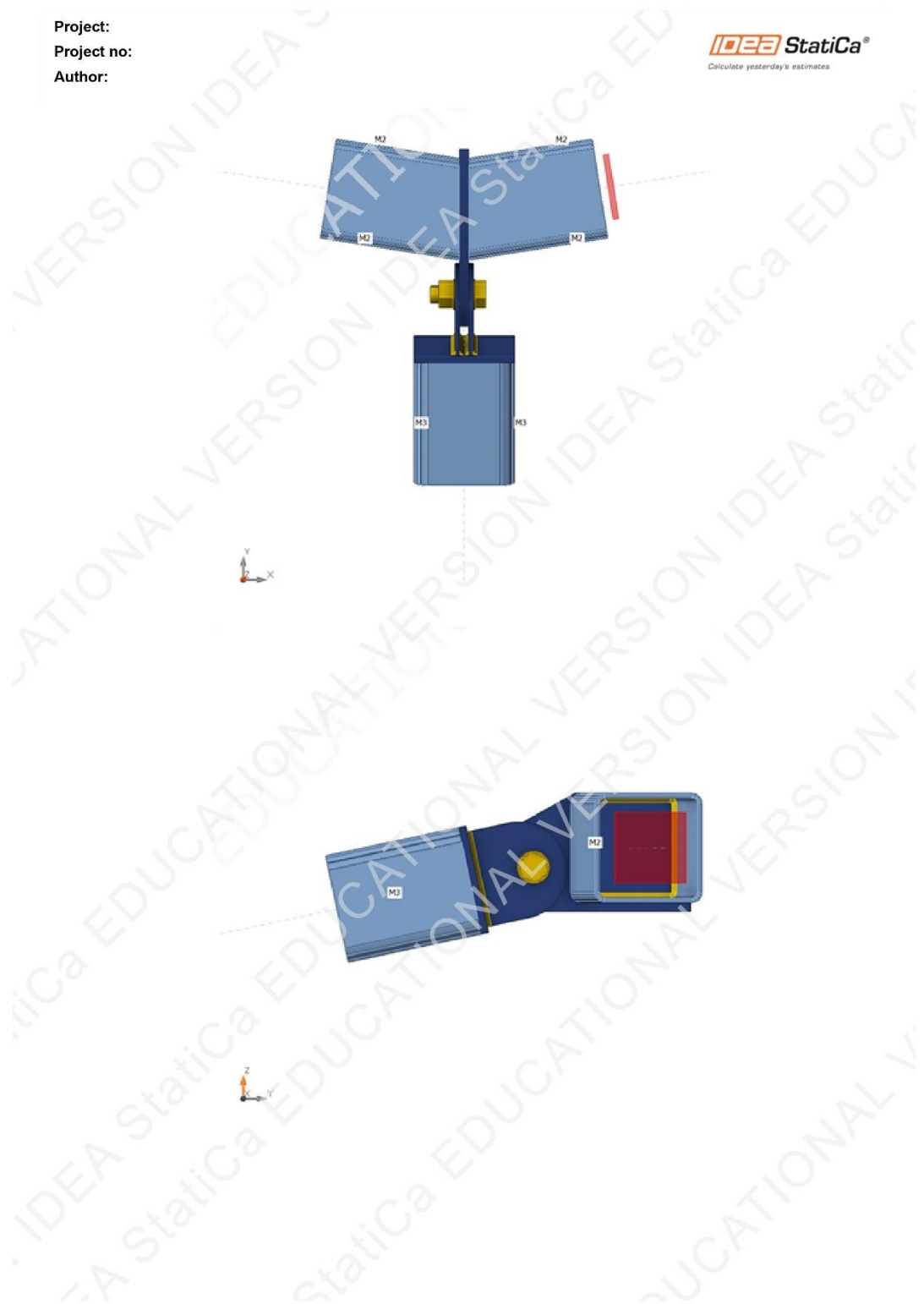
Name	Support	Forces in	X [mm]
M2 / end	N-Vy-Vz-Mx-My-Mz	Node	0
M2 / end		Node	0
M3 / end		Bolts	0



Slika 78: Report priključka iz IDEA StatiCa



Project:
Project no:
Author:



Slika 79: Report priključka iz IDEA StatiCa

Project:
Project no:
Author:



Cross-sections

Name	Material
2 - RHS180x180X8(RHS180x180)	EN-AW 6082 T6 (5-15)
1 - RHS180x180X12(RHS180x180)	EN-AW 6082 T6 (5-15)

Bolts

Name	Bolt assembly	Diameter [mm]	f_u [MPa]	Gross area [mm ²]
M30 trn	M30 trn	30	800,0	707

Load effects (forces in equilibrium)

Name	Member	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
LE1	M2 / End	-46,0	-27,0	-7,0	0,0	0,0	0,0
	M2 / End	-46,0	-27,0	-7,0	0,0	0,0	0,0
	M3 / End	-99,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Unbalanced forces

Name	X [kN]	Y [kN]	Z [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
LE1	8,4	82,4	6,6	0,0	0,0	0,0

Check

Summary

Name	Value	Check status
Analysis	100,0%	OK
Plates	0,3 < 5,0%	OK
Bolts	33,3 < 100%	OK
Welds	98,1 < 100%	OK
Buckling	Not calculated	

Project:
Project no:
Author:



Plates

Name	t_p [mm]	Loads	σ_{Ed} [MPa]	ϵ_{pI} [%]	$\sigma_{c,Ed}$ [MPa]	Status
M2-w 1	8,0	LE1	95,4	0,0	0,0	OK
M2-arc 1	8,0	LE1	101,0	0,0	0,0	OK
M2-arc 2	8,0	LE1	102,8	0,0	0,0	OK
M2-arc 3	8,0	LE1	104,9	0,0	0,0	OK
M2-w 2	8,0	LE1	115,6	0,0	0,0	OK
M2-arc 4	8,0	LE1	116,8	0,0	0,0	OK
M2-arc 5	8,0	LE1	114,7	0,0	0,0	OK
M2-arc 6	8,0	LE1	111,8	0,0	0,0	OK
M2-w 3	8,0	LE1	105,9	0,0	0,0	OK
M2-arc 7	8,0	LE1	82,5	0,0	0,0	OK
M2-arc 8	8,0	LE1	83,6	0,0	0,0	OK
M2-arc 9	8,0	LE1	83,9	0,0	0,0	OK
M2-w 4	8,0	LE1	91,8	0,0	0,0	OK
M2-arc 10	8,0	LE1	93,5	0,0	0,0	OK
M2-arc 11	8,0	LE1	91,9	0,0	0,0	OK
M2-arc 12	8,0	LE1	89,6	0,0	0,0	OK
M2-w 1	8,0	LE1	30,6	0,0	0,0	OK
M2-arc 1	8,0	LE1	28,8	0,0	0,0	OK
M2-arc 2	8,0	LE1	29,5	0,0	0,0	OK
M2-arc 3	8,0	LE1	29,8	0,0	0,0	OK
M2-w 2	8,0	LE1	36,0	0,0	0,0	OK
M2-arc 4	8,0	LE1	36,5	0,0	0,0	OK
M2-arc 5	8,0	LE1	36,1	0,0	0,0	OK
M2-arc 6	8,0	LE1	35,3	0,0	0,0	OK
M2-w 3	8,0	LE1	33,6	0,0	0,0	OK
M2-arc 7	8,0	LE1	33,7	0,0	0,0	OK
M2-arc 8	8,0	LE1	35,5	0,0	0,0	OK
M2-arc 9	8,0	LE1	34,1	0,0	0,0	OK
M2-w 4	8,0	LE1	34,5	0,0	0,0	OK
M2-arc 10	8,0	LE1	26,4	0,0	0,0	OK
M2-arc 11	8,0	LE1	30,9	0,0	0,0	OK
M2-arc 12	8,0	LE1	31,3	0,0	0,0	OK
M3-w 1	12,0	LE1	70,0	0,0	0,0	OK
M3-arc 1	12,0	LE1	55,3	0,0	0,0	OK
M3-arc 2	12,0	LE1	39,3	0,0	0,0	OK
M3-arc 3	12,0	LE1	66,6	0,0	0,0	OK
M3-w 2	12,0	LE1	39,5	0,0	0,0	OK
M3-arc 4	12,0	LE1	33,5	0,0	0,0	OK
M3-arc 5	12,0	LE1	39,6	0,0	0,0	OK
M3-arc 6	12,0	LE1	32,8	0,0	0,0	OK
M3-w 3	12,0	LE1	70,0	0,0	0,0	OK

4 / 9

Slika 81: Report priključka iz IDEA StatiCa

Project:
Project no:
Author:

IDEA StatiCa®
Calculate yesterday's estimates

Name	t_p [mm]	Loads	σ_{Ed} [MPa]	ϵ_{Pl} [%]	$\sigma_{c,Ed}$ [MPa]	Status
M3-arc 7	12,0	LE1	32,8	0,0	0,0	OK
M3-arc 8	12,0	LE1	39,6	0,0	0,0	OK
M3-arc 9	12,0	LE1	33,5	0,0	0,0	OK
M3-w 4	12,0	LE1	39,4	0,0	0,0	OK
M3-arc 10	12,0	LE1	66,7	0,0	0,0	OK
M3-arc 11	12,0	LE1	39,2	0,0	0,0	OK
M3-arc 12	12,0	LE1	55,2	0,0	0,0	OK
PP1	16,0	LE1	178,8	0,0	15,3	OK
CPL1a	12,0	LE1	162,1	0,0	0,0	OK
CPL1b	8,0	LE1	219,2	0,3	15,4	OK
CPL1c	8,0	LE1	219,4	0,3	15,4	OK

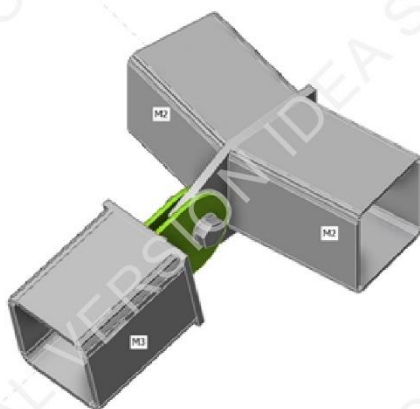
Design data

Material	f_y [MPa]	ϵ_{lim} [%]
EN-AW 6082 T6 (5-15)	260,0	5,0

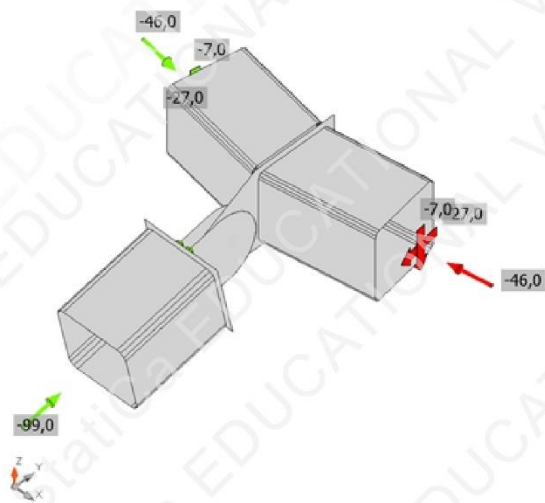
Symbol explanation

t_p	Plate thickness
σ_{Ed}	Equivalent stress
ϵ_{Pl}	Plastic strain
$\sigma_{c,Ed}$	Contact stress
f_y	Yield strength
ϵ_{lim}	Limit of plastic strain

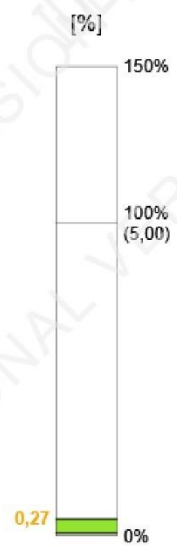
Project:
Project no:
Author:



Overall check, LE1

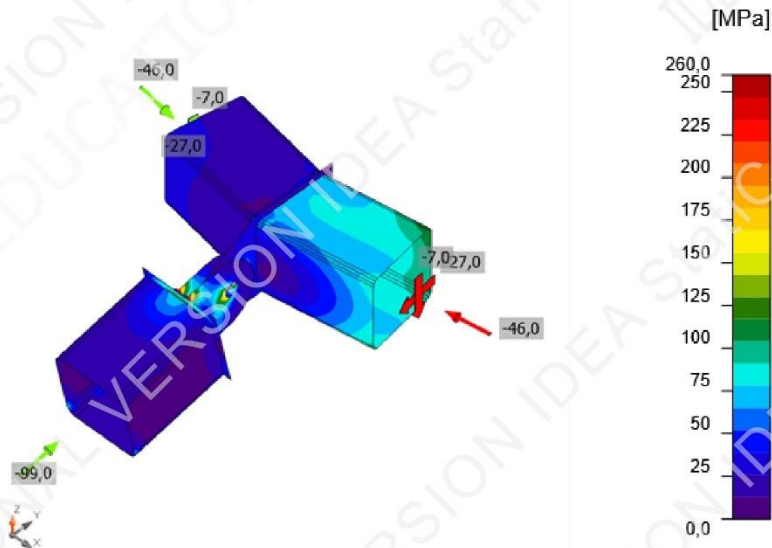


Strain check, LE1



Slika 83: Report priključka iz IDEA StatiCa

Project:
 Project no:
 Author:



Equivalent stress, LE1

Bolts

Shape	Item	Grade	Loads	$F_{t,Ed}$ [kN]	$F_{v,Ed}$ [kN]	$F_{b,Rd}$ [kN]	U_t [%]	U_s [%]	U_{ts} [%]	Status
	B1	M30 tm - 1	LE1	12,5	49,5	148,8	6,9	33,3	30,3	OK

Design data

Grade	$F_{t,Rd}$ [kN]	$B_{p,Rd}$ [kN]	$F_{v,Rd}$ [kN]
M30 tm - 1	323,1	181,1	179,5

Symbol explanation

- $F_{t,Ed}$ Tension force
- $F_{v,Ed}$ Resultant of bolt shear forces V_y and V_z in shear planes
- $F_{b,Rd}$ Plate bearing resistance EN 1993-1-8 – Tab. 3.4
- U_t Utilization in tension
- U_s Utilization in shear
- U_{ts} Interaction of tension and shear EN 1993-1-8 – Tab. 3.4
- $F_{t,Rd}$ Bolt tension resistance EN 1993-1-8 – Tab. 3.4
- $B_{p,Rd}$ Punching shear resistance EN 1993-1-8 – Tab. 3.4
- $F_{v,Rd}$ Bolt shear resistance EN 1993-1-8 – Tab. 3.4

Slika 84: Report priključka iz IDEA StatiCa

Project:
Project no:
Author:



Welds

Item	Edge	T _w [mm]	L [mm]	Loads	$\sigma_{w,Ed}$ [MPa]	ϵ_{PI} [%]	σ_{\perp} [MPa]	τ_{\perp} [MPa]	τ_{\parallel} [MPa]	Ut [%]	Ut _c [%]	Status
PP1	M2-w 1	▲ 5,0	149	LE1	116,6	0,0	-3,8	-3,6	67,2	37,6	34,5	OK
PP1	M2-arc 1	▲ 5,0	6	LE1	112,2	0,0	-11,2	-10,9	63,5	36,2	36,2	OK
PP1	M2-arc 2	▲ 5,0	6	LE1	98,1	0,0	-12,5	-2,1	56,1	31,6	31,6	OK
PP1	M2-arc 3	▲ 5,0	6	LE1	92,8	0,0	-15,2	0,1	52,9	29,9	29,9	OK
PP1	M2-w 2	▲ 5,0	148	LE1	78,9	0,0	-16,2	-8,4	43,8	25,5	19,4	OK
PP1	M2-arc 4	▲ 5,0	6	LE1	90,0	0,0	-17,9	5,5	-50,6	29,0	29,0	OK
PP1	M2-arc 5	▲ 5,0	6	LE1	79,8	0,0	-16,6	8,7	-44,2	25,8	25,8	OK
PP1	M2-arc 6	▲ 5,0	6	LE1	57,5	0,0	-9,9	-1,8	-32,6	18,5	18,5	OK
PP1	M2-w 3	▲ 5,0	149	LE1	124,2	0,0	-8,8	-8,6	-71,0	40,0	36,4	OK
PP1	M2-arc 7	▲ 5,0	6	LE1	39,3	0,0	-6,2	-13,7	-17,8	12,7	12,7	OK
PP1	M2-arc 8	▲ 5,0	6	LE1	82,1	0,0	-2,3	-38,6	-27,4	26,5	26,5	OK
PP1	M2-arc 9	▲ 5,0	6	LE1	128,5	0,0	-6,9	-47,0	-57,2	41,4	41,4	OK
PP1	M2-w 4	▲ 5,0	148	LE1	80,6	0,0	-8,9	-21,5	-41,0	26,0	14,5	OK
PP1	M2-arc 10	▲ 5,0	6	LE1	123,5	0,0	-20,5	-52,2	47,2	39,8	39,8	OK
PP1	M2-arc 11	▲ 5,0	6	LE1	117,7	0,0	-13,3	-41,7	53,2	38,0	38,0	OK
PP1	M2-arc 12	▲ 5,0	6	LE1	106,3	0,0	-9,4	-23,7	56,4	34,3	34,3	OK
PP1	M2-w 1	▲ 5,0	149	LE1	52,1	0,0	-4,9	-6,3	29,3	16,8	11,5	OK
PP1	M2-arc 1	▲ 5,0	6	LE1	60,8	0,0	-12,4	-29,8	-17,1	19,6	19,6	OK
PP1	M2-arc 2	▲ 5,0	6	LE1	71,5	0,0	-14,6	-36,5	-17,4	23,1	23,1	OK
PP1	M2-arc 3	▲ 5,0	6	LE1	69,5	0,0	-18,3	-36,8	-11,8	22,4	22,4	OK
PP1	M2-w 2	▲ 5,0	147	LE1	38,9	0,0	-16,4	-19,4	6,3	12,6	10,2	OK
PP1	M2-arc 4	▲ 5,0	6	LE1	63,0	0,0	-6,4	-33,7	13,2	20,3	20,3	OK
PP1	M2-arc 5	▲ 5,0	6	LE1	60,2	0,0	-3,3	-32,2	-13,1	19,4	19,4	OK
PP1	M2-arc 6	▲ 5,0	6	LE1	50,3	0,0	-6,7	-20,7	-19,9	16,2	16,2	OK
PP1	M2-w 3	▲ 5,0	149	LE1	50,1	0,0	-9,6	-8,9	-27,0	16,2	10,7	OK
PP1	M2-arc 7	▲ 5,0	6	LE1	82,0	0,0	-2,4	-1,8	-47,3	26,5	26,5	OK
PP1	M2-arc 8	▲ 5,0	6	LE1	53,8	0,0	-1,5	5,3	-30,6	17,4	17,4	OK
PP1	M2-arc 9	▲ 5,0	6	LE1	55,4	0,0	-5,2	-2,3	-31,7	17,9	17,9	OK
PP1	M2-w 4	▲ 5,0	147	LE1	54,2	0,0	-5,8	-6,2	-30,5	17,5	14,5	OK
PP1	M2-arc 10	▲ 5,0	6	LE1	49,8	0,0	-3,9	-8,5	27,4	16,1	16,1	OK
PP1	M2-arc 11	▲ 5,0	6	LE1	46,6	0,0	0,1	-4,2	26,6	15,0	15,0	OK
PP1	M2-arc 12	▲ 5,0	6	LE1	50,2	0,0	-1,4	-2,0	28,9	16,2	16,2	OK
CPL1a	CPL1b	▲ 5,0 ▲	159	LE1	304,0	0,1	-105,5	-114,4	118,3	98,1	22,3	OK
		▲ 5,0 ▲	159	LE1	303,9	0,1	-112,2	103,3	-126,2	98,0	21,0	OK
CPL1a	CPL1c	▲ 5,0 ▲	159	LE1	303,9	0,1	-112,5	-103,3	126,1	98,0	21,0	OK
		▲ 5,0 ▲	159	LE1	304,0	0,1	-105,2	114,4	-118,4	98,1	22,3	OK
CPL1a	M3-w 1	▲ 5,0	131	LE1	219,0	0,0	-126,3	-103,3	0,0	70,6	34,6	OK
CPL1a	M3-arc 1	▲ 5,0	9	LE1	37,4	0,0	-2,3	20,4	-6,8	12,0	12,0	OK
CPL1a	M3-arc 2	▲ 5,0	9	LE1	44,4	0,0	-8,4	24,4	6,0	14,3	14,3	OK

8 / 9

Slika 85: Report priključka iz IDEA StatiCa

Project:
Project no:
Author:



Item	Edge	T_w [mm]	L [mm]	Loads	$\sigma_{w,Ed}$ [MPa]	ϵ_{pl} [%]	σ_{\perp} [MPa]	τ_{\perp} [MPa]	τ_{\parallel} [MPa]	Ut [%]	Ut _c [%]	Status
CPL1a	M3-arc 3	▲ 5,0	9	LE1	42,7	0,0	-6,7	23,9	4,6	13,8	13,8	OK
CPL1a	M3-w 2	▲ 5,0	131	LE1	30,5	0,0	-1,1	6,7	16,3	9,8	6,3	OK
CPL1a	M3-arc 4	▲ 5,0	9	LE1	44,5	0,0	-6,0	25,0	-4,9	14,4	14,4	OK
CPL1a	M3-arc 5	▲ 5,0	9	LE1	44,5	0,0	-6,9	24,5	-6,8	14,4	14,4	OK
CPL1a	M3-arc 6	▲ 5,0	9	LE1	37,3	0,0	-2,5	20,1	7,6	12,0	12,0	OK
CPL1a	M3-w 3	▲ 5,0	131	LE1	219,8	0,0	-126,4	-103,8	0,0	70,9	34,8	OK
CPL1a	M3-arc 7	▲ 5,0	9	LE1	37,3	0,0	-2,5	20,1	-7,6	12,0	12,0	OK
CPL1a	M3-arc 8	▲ 5,0	9	LE1	44,5	0,0	-6,9	24,5	6,8	14,4	14,4	OK
CPL1a	M3-arc 9	▲ 5,0	9	LE1	44,6	0,0	-6,0	25,0	4,9	14,4	14,4	OK
CPL1a	M3-w 4	▲ 5,0	131	LE1	30,5	0,0	-1,2	6,7	-16,3	9,8	6,3	OK
CPL1a	M3-arc 10	▲ 5,0	9	LE1	42,8	0,0	-6,8	23,9	-4,6	13,8	13,8	OK
CPL1a	M3-arc 11	▲ 5,0	9	LE1	44,4	0,0	-8,4	24,4	-6,0	14,3	14,3	OK
CPL1a	M3-arc 12	▲ 5,0	9	LE1	37,5	0,0	-2,3	20,5	6,8	12,1	12,1	OK

Design data

Material	β_w [-]	$\sigma_{w,Rd}$ [MPa]	$0,9 \sigma$ [MPa]
EN-AW 6082 T6 (5-15)	0,80	310,0	223,2

Symbol explanation

T_w	Throat thickness a
L	Length
$\sigma_{w,Ed}$	Equivalent stress
ϵ_{pl}	Strain
σ_{\perp}	Perpendicular stress
τ_{\perp}	Shear stress perpendicular to weld axis
τ_{\parallel}	Shear stress parallel to weld axis
Ut	Utilization
Ut _c	Weld capacity utilization
β_w	Correlation factor EN 1993-1-8 – Tab. 4.1
$\sigma_{w,Rd}$	Equivalent stress resistance
$0,9 \sigma$	Perpendicular stress resistance: $0,9 \cdot f_u / \gamma_{M2}$
▲	Fillet weld

Buckling

Buckling analysis was not calculated.



7. ISKAZ MATERIJALA

Pozicija	Poprečni presjek [mm]	Površina poprečnog presjeka [m ²]	Duljina [m]	Volumen [m ³]	Broj komada	Gustoća aluminija [kg/m ³]	Ukupna masa [kg]	
R1	SHS 180 x 12	0,007909	13,232	0,104652	20	2700	5651,20	
T1	SHS 180 x 8	0,005435	0,274	0,001489	20		80,42	
P1	CHS 114,3 x 3,6	0,001252	2,720	0,003405	20		183,89	
P2	CHS 114,3 x 3,6	0,001252	2,439	0,003054	20		164,90	
P3	CHS 114,3 x 3,6	0,001252	1,991	0,002493	20		134,61	
P4	CHS 114,3 x 3,6	0,001252	1,408	0,001763	20		95,19	
P5	CHS 114,3 x 3,6	0,001252	0,729	0,000913	20		49,29	
D1	CHS 88,9 x 3,2	0,000862	3,63	0,003129	19		160,52	
D2	CHS 88,9 x 3,2	0,000862	3,486	0,003005	20		162,27	
D3	CHS 88,9 x 3,2	0,000862	3,221	0,002777	20		149,93	
D4	CHS 88,9 x 3,2	0,000862	2,885	0,002487	20		134,29	
D5	CHS 88,9 x 3,2	0,000862	2,559	0,002206	20		119,12	
Ukupno								7085,62
<i>Površina kupole [m²]</i>								509
Utrošak aluminija po m²							13,92	

Tablica 13: Iskaz materijala

8. ZAKLJUČAK

U okviru ovog diplomskog rada prikazan je postupak projektiranja aluminijske kupole namijenjene meditaciji. Po obliku, Schwedlerova kupola, smještena je u Fužinama, ima kružnu bazu promjera 18 metara i visoka je 9 metara. Analizirani su svi bitni faktori koji utječu na konstrukciju, uključujući vlastitu težinu aluminijske konstrukcije, pokrov od lameliranog stakla debljine 14 mm te promjenjiva djelovanja snijega, vjetra i potresa. Aluminiij, koji je manje korišten metal od čelika, nudi značajne prednosti u smislu ekonomske isplativosti, jednostavnosti proizvodnje i učinkovitosti u agresivnom okolišu. Odabrani konstrukcijski elementi izrađeni su od ekstrudiranih cijevnih profila aluminijske legure AW 6082 T6.

Analiza konstrukcije i dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata provedeni su u računalnom paketu „SCIA Engineer 22.1“ u trodimenzionalnom modelu. Konstrukcija kupole sastoji se od meridijanskih cijevnih rebara profila SHS 180 x 12 mm, horizontalnih poligonalnih cijevnih prstenova CHS 114,3 x 3,6 mm i dijagonalnih cijevnih elemenata CHS 88,9 x 3,2 mm. Provedena linearna analiza stabilnosti za sve kombinacije graničnog stanja nosivosti rezultirala je nepovoljnim kritičnim faktorima manjim od 10. te je u konačnici trebalo provesti nelinearnu analizu. Dimenzioniranje u računalnom paketu SCIA provedeno je prema Eurokodu za projektiranje aluminijskih konstrukcija (Eurokod 9). Naknadno, provedeno je kontrolno (ručno) dimenzioniranje najiskorištenijih konstrukcijskih elemenata prema konstrukcijskoj funkciji. Utvrđene su blage razlike u iskoristivosti s obzirom na ručni i računalni proračun zato što SCIA Engineer dimenzionira prema Eurokodu 9 iz 2015. godine, dok je ručni proračun proveden prema najnovijoj verziji norme iz 2023. godine (2. generacija eurokoda). Razlika u iskoristivosti nije značajna, svega par posto i javlja se kod otpornosti elementa na izvijanje radi promjena linije izvijanja. Ručni proračun prema novom Eurokodu 9 rezultirao je većom otpornošću na izvijanje, odnosno manje iskorištenom interakcijom momenta savijanja i uzdužne sile.

U radu je također prikazan proračun karakterističnih priključaka u vijčanoj i zavarenoj izvedbi. Priključci su modelirani i dimenzionirani koristeći specijalizirani računalni program IDEA StatiCa, gdje su mehanička svojstva korištene aluminijske legure i vijaka od nehrđajućeg čelika unesene ručno.



Na kraju, utrošeno je 14 kg aluminija po m² kupole što u potpunosti opravdava tezu da su aluminijske kupole prave lagane i ekonomski isplative konstrukcije; bez pretjeranih troškova temeljenja, transporta i održavanja.



9. PRILOZI

Popis priloga:

Prilog 1: Dispozicija, Mj. 1:100

Prilog 2: Priključak prstena i dijagonale na element rebra, Mj. 1:5

Prilog 3: Priključak u stopi luka s dijagonalom, Mj. 1:5

Prilog 4: Priključak rebra na tlačni prsten, Mj. 1:5

LITERATURA

- [1] Braced Domes, *Cnxzlf.com*, [pristupljeno: 07/2023],
<https://www.cnxzlf.com/news/braced-domes/>
- [2] NCStateArchitecture, 08 3 1 DomeBasicDefsAndBehavior ,Youtube; 2021
[pristupljeno:07/2023], <https://www.youtube.com/watch?v=ubqXxGEpUPQ&t=178s>
- [3] Eliassen, M.; Huseby, A. The Digital Workflow of Parametric Structural Design, Developing Grid Shells in a Nordic Climate, Norwegian University of Science and Technology, 2018; str. 15.
- [4] Makowski ZS, Analysis, design and construction of braced domes. London, Engleska: HarperCollins; 1987.
- [5] Partlow W., Schwedler dome horizontal polygonal rings, Beyond Discovery. 2023
[pristupljeno: 08/2023], <https://www.beyonddiscovery.org/structural-engineering/info-irg.html>
- [6] Wikipedia, Johann Wilhelm Schwedler ,Wikipedia The Free Encyclopedia, 2023,
[pristupljeno:08/2023], https://en.wikipedia.org/wiki/Johann_Wilhelm_Schwedler
- [7] Boko, I.; Skejić, D.; Torić, N.: Aluminiij kao materijal za suvremene konstrukcije, *Građevinar* 67 (2015) 11, 1075 – 1085
- [8] Boko, I.; Skejić, D.; Torić, N.: Aluminijske konstrukcije, Sveučilište u Splitu – Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split, 2017.
- [9] Co. SPI. Što je ekstruzija aluminiija?, Shenzhen Ponos Industrijski Co., doo. 2020
[pristupljeno:08/2023], <https://ba.pride-machining.com/info/what-is-aluminum-extrusion-46929384.html>
- [10] Ringlokschuppen ,Foursquare. [pristupljeno: 09/2023],
<https://foursquare.com/v/ringlokschuppen/5eaf0f95efa03a00085cf1bf?openPhotoId=5eaf0fb5b4ced6000830dacf>
- [11] Static nonlinear calculation,Scia.net, [pristupljeno:08/2023],
https://kc.scia.net/Help/kik/calculation/nonlinear_analysis/nonlinear_analysis.htm
-



[12] sens.00 - Basic non-linear analysis , SCIA, [pristupljeno: 07/2023],

<https://www.scia.net/en/scia-engineer/fact-sheets/analysis-results/sens00-basic-non-linear-analysis>

[13] HRN EN 1990:2011 Eurokod: Osnove projektiranja konstrukcija, Hrvatski zavod za norme (HZN), Zagreb, 2011.

[14] HRN EN 1991-1-1:2012 Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije – Dio 1-1: Opća djelovanja –Obujamske težine, vlastite težine i uporabna opterećenja zgrada, Hrvatski zavod za norme (HZN), Zagreb, 2012.

[15] HRN EN 1991-1-3:2012 Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije – Dio 1-3: Opća djelovanja –Opterećenja snijegom, Hrvatski zavod za norme (HZN), Zagreb, 2012.

[16] HRN EN 1991-1-4:2012 Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije – Dio 1-4: Opća djelovanja –Djelovanja vjetrom, Hrvatski zavod za norme (HZN), Zagreb, 2012.

[17] HRN EN 1998:2011 Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija, Hrvatski zavod za norme (HZN), Zagreb, 2011.

[18] HRN EN 1999-1-1:2023 Eurokod 9: Projektiranje aluminijskih konstrukcija – Dio 1-1: Opća pravila, HZN, 2023.

POPIS SLIKA

Slika 1: Ploha dvostruke zakrivljenosti, pozitivna Gaussova krivulja [2]	1
Slika 2: Dijagram unutarnjih sila u kupoli [3].....	2
Slika 3: Različiti tipovi ukurčenih kupola [4]	3
Slika 4: Prikaz Fichte-Bunkera iz 1876.godine [6]	4
Slika 5: Rundlokschuppen Rummelsburg, primjer Schwedlerove kupole [10].....	5
Slika 6: Karta snježnih područja [15].....	14
Slika 7: Koeficijenti oblika opterećenja snijegom za valjkasti krov [15]	15
Slika 8: Prikaz dimenzija djelovanja snijega na kupolu.....	16
Slika 9: Preporučene vrijednosti faktora oblika krova za promjenjiv odnos visine i raspona (za $\beta < 60^\circ$) [15]	16
Slika 10: Prikaz opterećenja snijega na konstrukciju.....	17
Slika 11: Karta osnovne brzine vjetra [16].....	18
Slika 12: Grafički prikaz faktora izloženosti [16].....	21
Slika 13: Preporučene vrijednosti koeficijent vanjskog tlaka za kupole s kružnom osnovicom [16]	22
Slika 14: približne vrijednost koeficijenta vanjskog tlaka na pet razina.....	23
Slika 15: Prikaz aproksimacija ploha konstrukcije na djelovanje vjetra.....	24
Slika 16: Slučaj 1 puhanja vjetra.....	24
Slika 17: Slučaj 2 puhanja vjetra.....	25
Slika 18: Slučaj 3 puhanja vjetra.....	26
Slika 19: Slučaj 4 puhanja vjetra.....	27
Slika 20: Karta potresnih područja Republike Hrvatske , Fužine [17]	28
Slika 21: Vrijednosti parametara koje opisuju preporučeni elastični spektar odziva tipa 1 (a) i tipa 2(b)[17].....	30
Slika 22: Grafički prikaz horizontalnog elastičnog spektra odziva tipa 1 za temeljno tlo tipa C i vršno ubrzanje 0,219 (5%-tno prigušenje)	30
Slika 23: Grafički prikaz horizontalnog elastičnog spektra odziva tipa 2 za temeljno tlo tipa C i vršno ubrzanje 0,219 (5%-tno prigušenje)	31
Slika 24: Grafički prikaz horizontalnog projektnog spektra odziva tipa 1 i tipa 2 i faktor ponašanja 4.....	32
Slika 25: Prikaz modela kupole.....	33



Slika 26: Prikaz modela kupole sa panelima za unos opterećenja	34
Slika 27: Slučajevi opterećenja	35
Slika 28: Grupe opterećenja	35
Slika 29: Prikaz načina unosa opterećenja asimetričnog snijega	36
Slika 30: Prikaz načina unosa opterećenja vjetrom; primjer za vjetra koji puše u smjeru X+.	37
Slika 31: Prikaz prvog moda izvijanja – translacija u x smjeru, $f = 4,54$ Hz.....	40
Slika 32: Prikaz drugog moda izvijanja – translacija u y smjeru, $f = 4,69$ Hz.....	40
Slika 33: Prikaz Eigen frequencies.....	40
Slika 34: Kombinacije djelovanja	41
Slika 35: Kombinacije djelovanja	42
Slika 36: Kombinacije djelovanja	43
Slika 37: Kombinacije djelovanja	44
Slika 38: Prikaz prvih 5 kritičnih faktora izvijanja	46
Slika 39: Izvijanje stupa kod pomičnog okvira [x]	47
Slika 40: Proračunska vrijednost uzdužne sile za poprečni presjek rebra i mjerodavnu kombinaciju GSN 2.....	49
Slika 41: Proračunska vrijednost momenta savijanja za poprečni presjek rebra i mjerodavnu kombinaciju GSN 2.....	49
Slika 42: Proračunska vrijednost poprečne sile za poprečni presjek rebra i mjerodavnu kombinaciju GSN 2.....	50
Slika 43: Proračunska vrijednost uzdužne sile za poprečni presjek prstena i mjerodavnu kombinaciju GSN 26.....	50
Slika 44: Proračunska vrijednost momenta savijanja za poprečni presjek prstena i mjerodavnu kombinaciju GSN 26.....	51
Slika 45: Proračunska vrijednost poprečne sile za poprečni presjek prstena i mjerodavnu kombinaciju GSN 26.....	51
Slika 46: Proračunska vrijednost uzdužne sile za poprečni presjek dijagonala i mjerodavnu kombinaciju GSN 16.....	52
Slika 47: Proračunska vrijednost momenata savijanja za poprečni presjek dijagonala i mjerodavnu kombinaciju GSN 16.....	52
Slika 48: Proračunska vrijednost poprečnih sila za poprečni presjek dijagonala i mjerodavnu kombinaciju GSN 16.....	53

Slika 49: Iskorištenost mjerodavnog elementa poprečnog presjeka rebra	54
Slika 50: Iskorištenost mjerodavnog elementa poprečnog presjeka prstena	54
Slika 51: Iskorištenost mjerodavnog elementa poprečnog presjeka dijagonala.....	55
Slika 52: Iskorištenost mjerodavnog elementa poprečnog presjeka tlačnog prstena	55
Slika 53: Provjera graničnog stanja uporabivosti rebra	85
Slika 54: Provjera graničnog stanja uporabivosti prstena	86
Slika 55: Provjera graničnog stanja uporabivosti dijagonala	87
Slika 56: Skica priključka dijagonale	89
Slika 57: Skica priključka prstena	92
Slika 58: Report priključka iz IDEA StatiCa	94
Slika 59: :Report priključka iz IDEA StatiCa	95
Slika 60: Report priključka iz IDEA StatiCa	96
Slika 61: Report priključka iz IDEA StatiCa	97
Slika 62: Report priključka iz IDEA StatiCa	98
Slika 63: Report priključka iz IDEA StatiCa	99
Slika 64: Report priključka iz IDEA StatiCa	100
Slika 65: Report priključka iz IDEA StatiCa	101
Slika 66: Report priključka iz IDEA StatiCa	102
Slika 67: Skica priključka u stopi luka	103
Slika 68: Report priključka iz IDEA StatiCa	107
Slika 69: Report priključka iz IDEA StatiCa	108
Slika 70: Report priključka iz IDEA StatiCa	109
Slika 71: Report priključka iz IDEA StatiCa	110
Slika 72: Report priključka iz IDEA StatiCa	111
Slika 73: Report priključka iz IDEA StatiCa	112
Slika 74: Report priključka iz IDEA StatiCa	113
Slika 75: Report priključka iz IDEA StatiCa	114
Slika 76: Report priključka iz IDEA StatiCa	115
Slika 77: Skica priključka rebra na tlačni prsten	116
Slika 78: Report priključka iz IDEA StatiCa	119
Slika 79: Report priključka iz IDEA StatiCa	120
Slika 80: Report priključka iz IDEA StatiCa	121



Slika 81:Report priključka iz IDEA StatiCa	122
Slika 82:Report priključka iz IDEA StatiCa	123
Slika 83:Report priključka iz IDEA StatiCa	124
Slika 84:Report priključka iz IDEA StatiCa	125
Slika 85:Report priključka iz IDEA StatiCa	126
Slika 86:Report priključka iz IDEA StatiCa	127

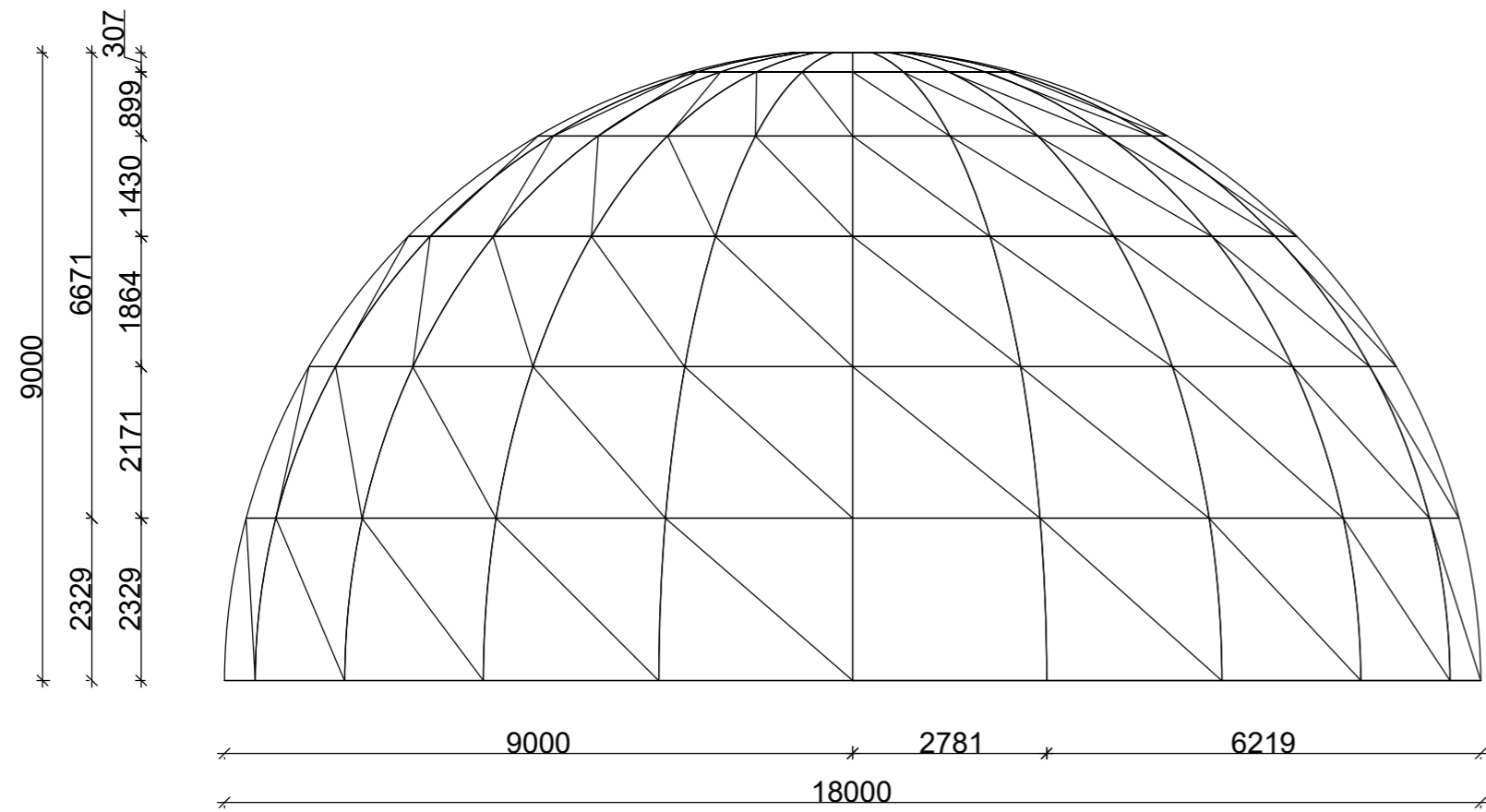


POPIS TABLICA

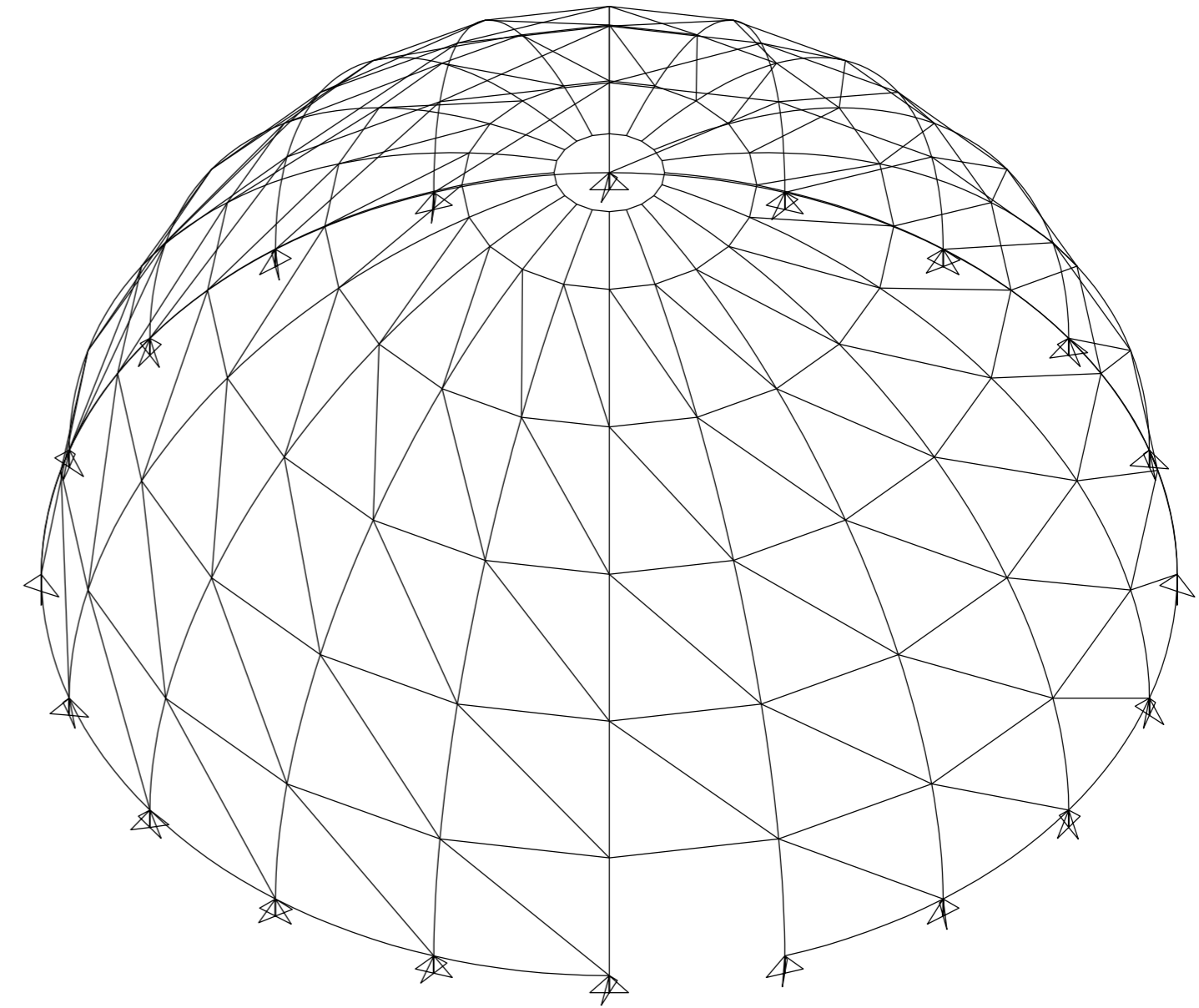
Tablica 1: Kategorije terena i paramtri terena [16]	19
Tablica 2: Vrijednosti ukupnog tlaka na površinu za slučaj 1 puhanja vjetra.....	24
Tablica 3: Vrijednosti ukupnog tlaka na površinu za slučaj 2 puhanja vjetra.....	25
Tablica 4: Vrijednosti ukupnog tlaka na površinu za slučaj 3 puhanja vjetra.....	26
Tablica 5: Vrijednosti ukupnog tlaka na površinu za slučaj 4 puhanja vjetra.....	27
Tablica 6: Vrijednosti unutarnjih sila za mjerodavni element rebra	56
Tablica 7: Vrijednosti unutarnjih sila za mjerodavni element prstena.....	64
Tablica 8: Vrijednosti unutarnjih sila za mjerodavni element dijagonala.....	71
Tablica 9:Razmaci i udaljenosti do kraja i ruba	89
Tablica 10:Razmaci i udaljenosti do kraja i ruba	91
Tablica 11:Razmaci i udaljenosti do kraja i ruba	103
Tablica 12:Razmaci i udaljenosti do kraja i ruba	116
Tablica 13: Iskaz materijala	128

DISPOZICIJA MJ 1:100

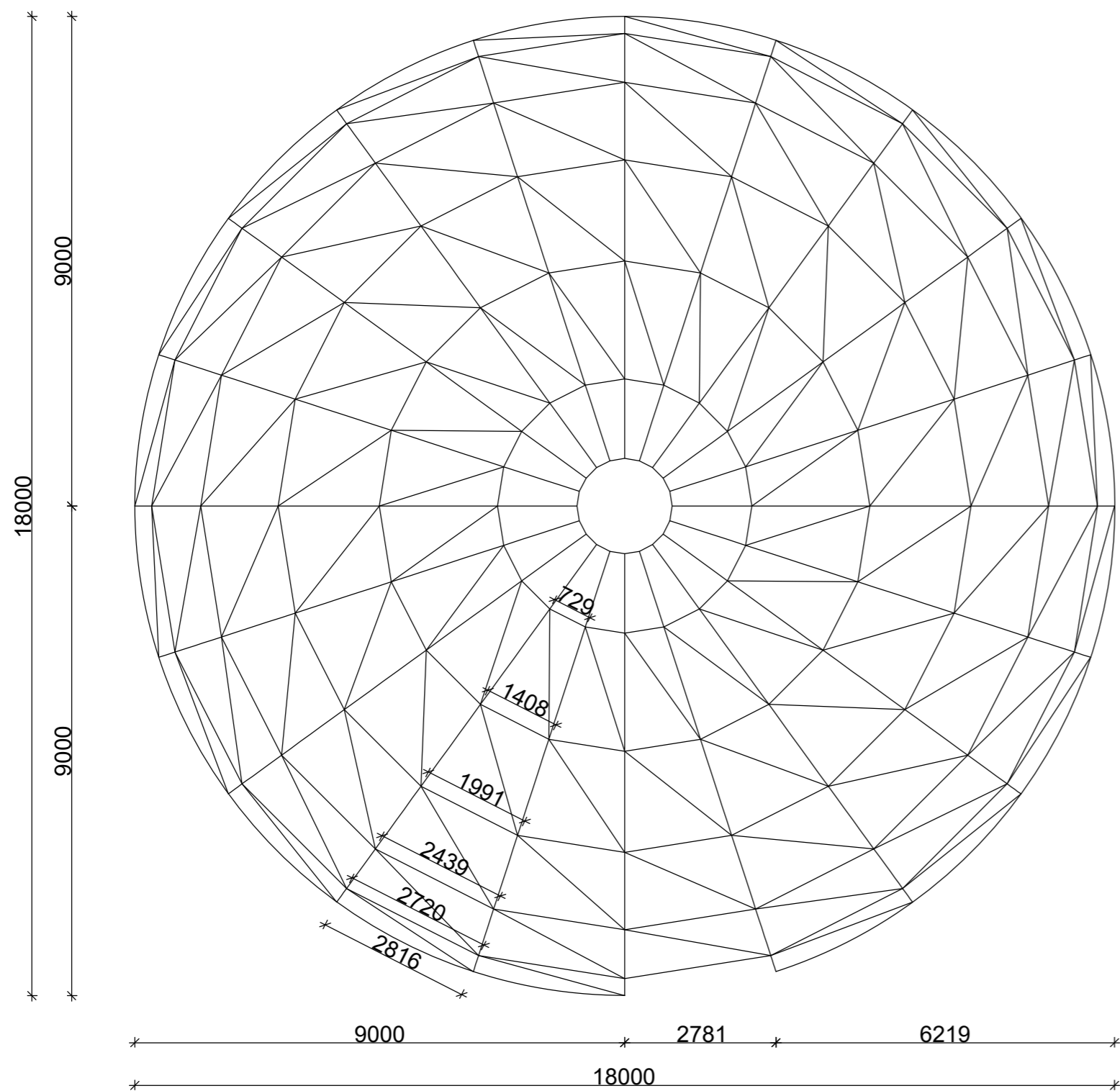
POGLED



AKSONOMETRIJA



TLOCRT



GF

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

SADRŽAJ NACRTA: DISPOZICIJA
POGLED, TLOCRT, AKSONOMETRIJA

PREDMET: METALNE KONSTRUKCIJE 3

RAZINA OBRADE: DISPOZICIJSKO RJEŠENJE

MENTOR: prof.dr.sc. DAVOR SKEJIĆ

MJERILO:
1:100

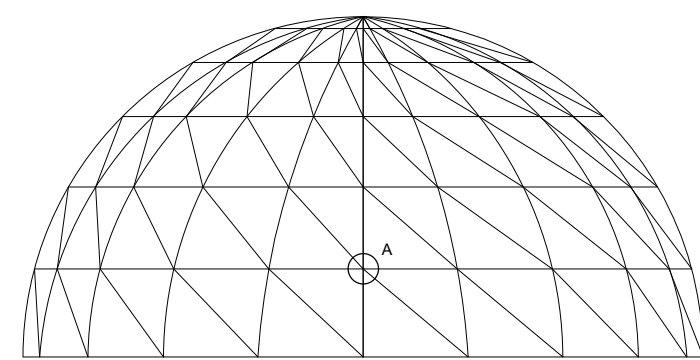
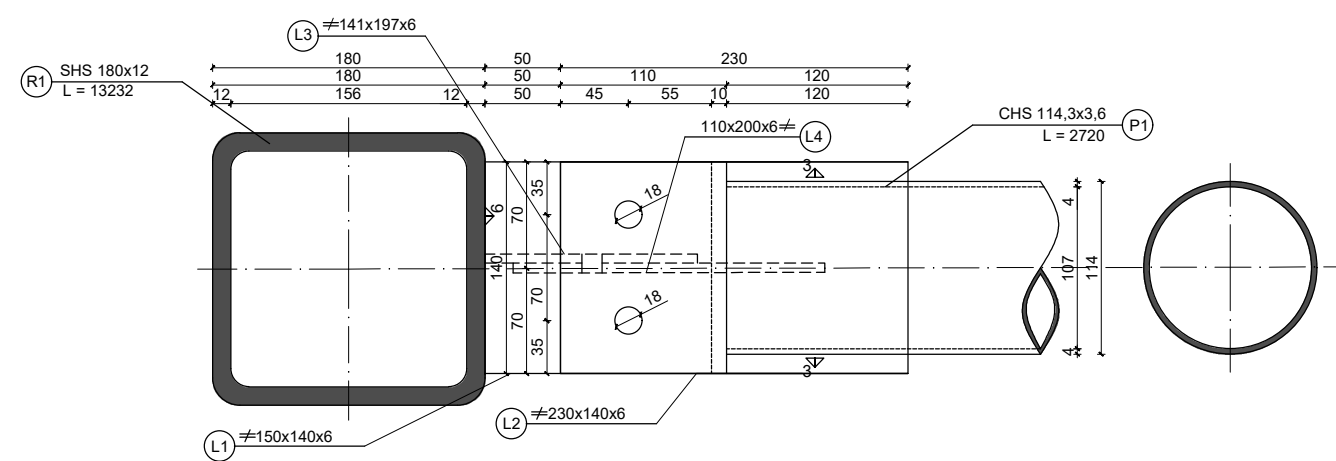
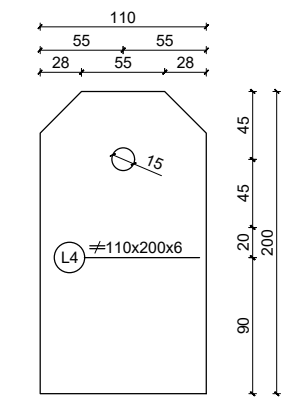
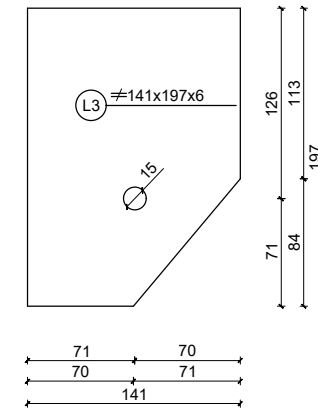
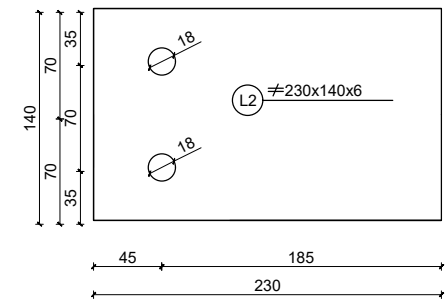
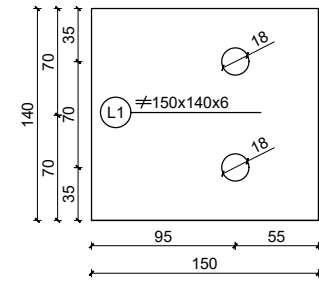
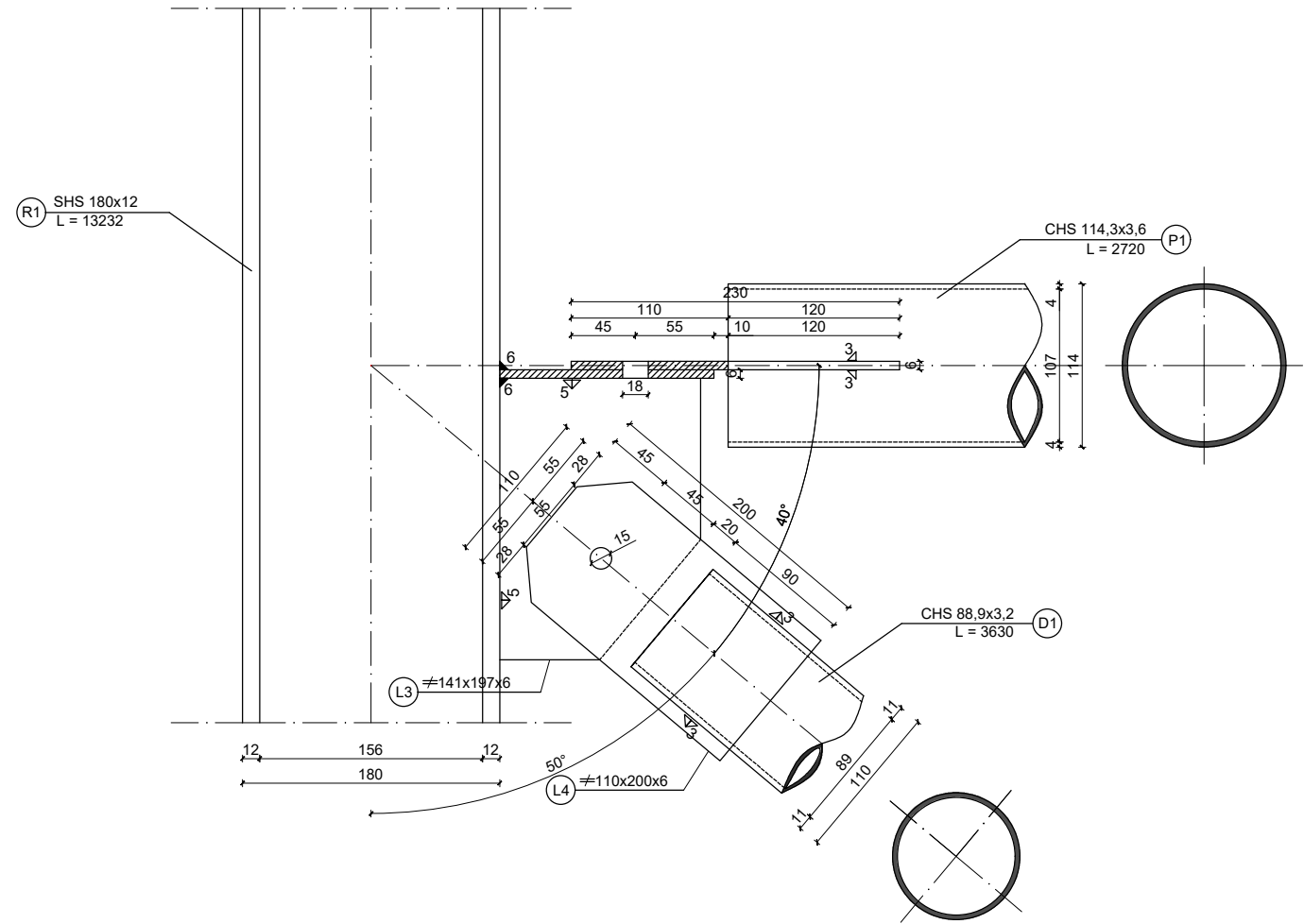
DATUM: studeni, 2023.

AKADEMSKA GODINA: 2023./24.

IZRADIO: TATJANA CIGULA

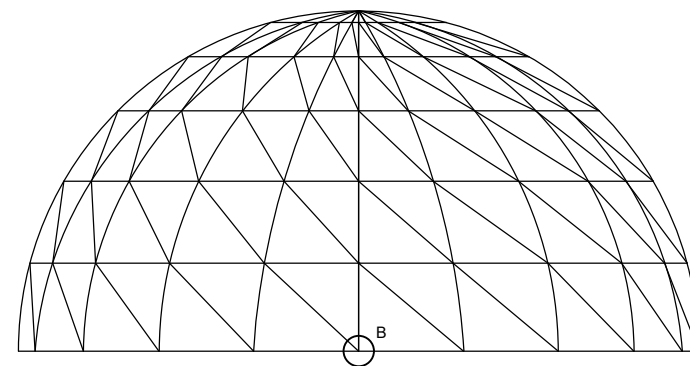
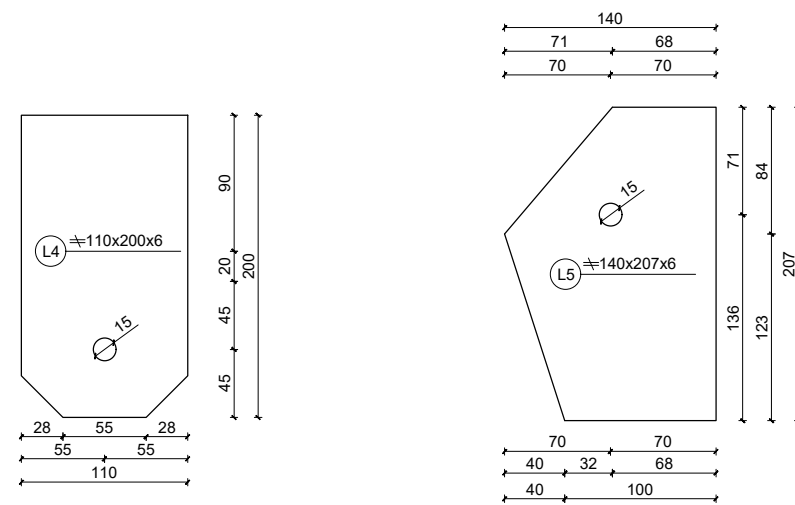
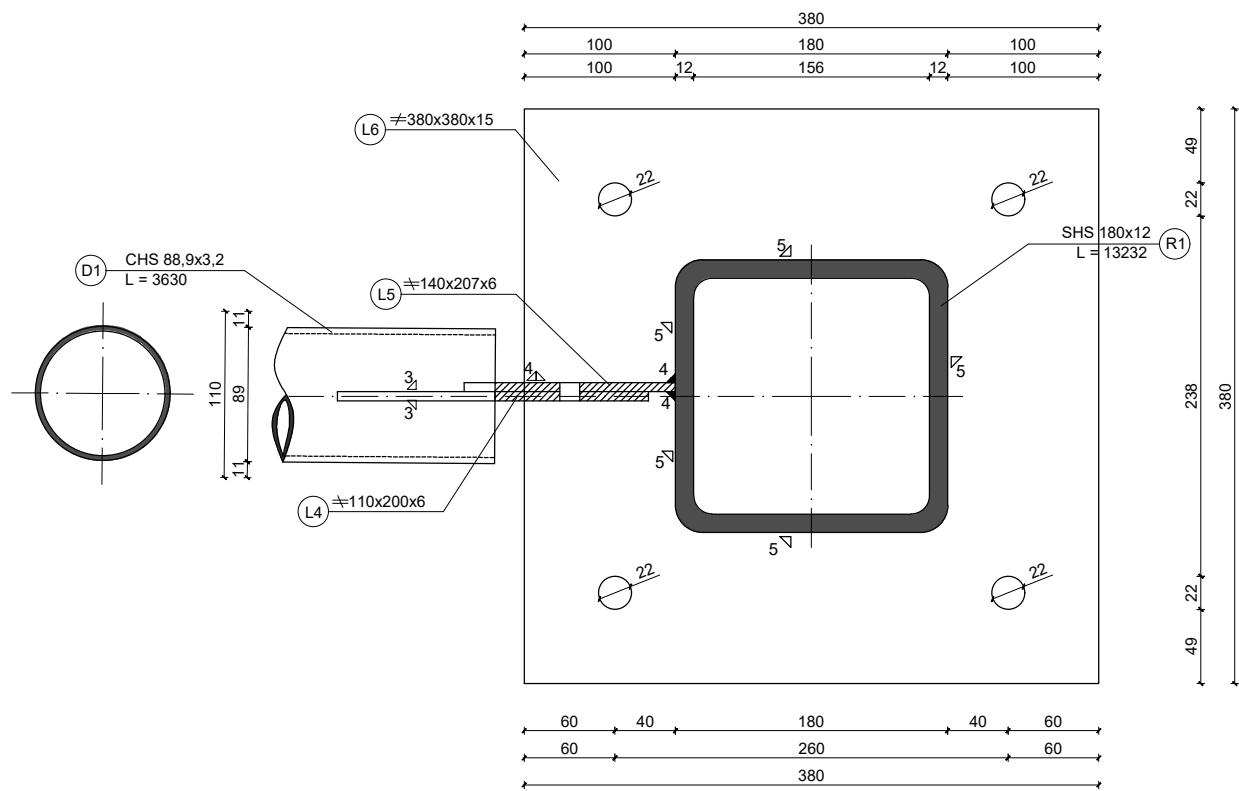
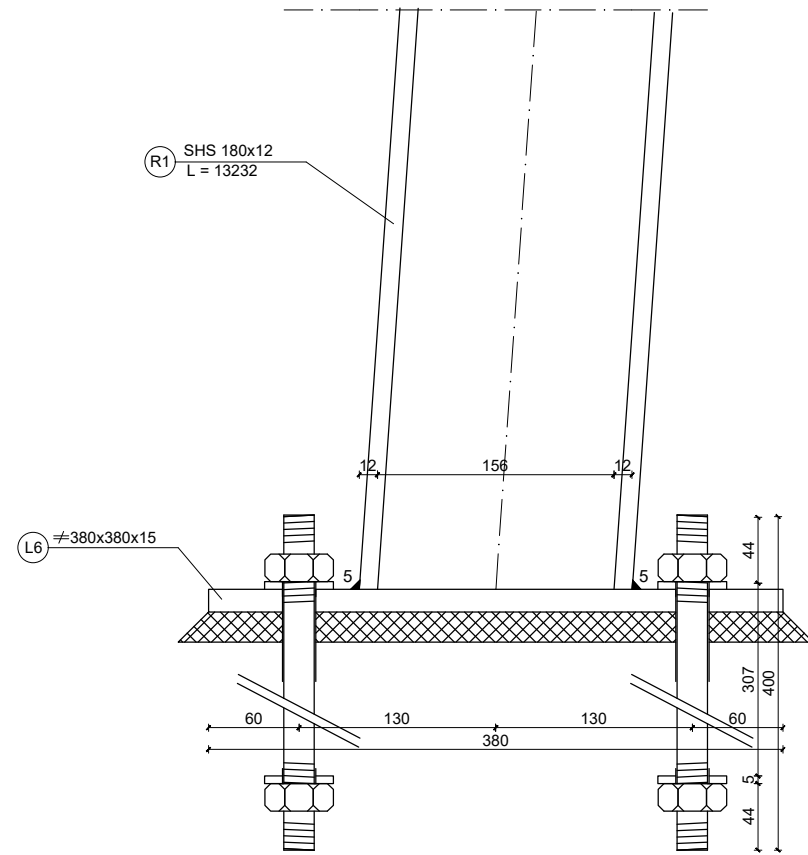
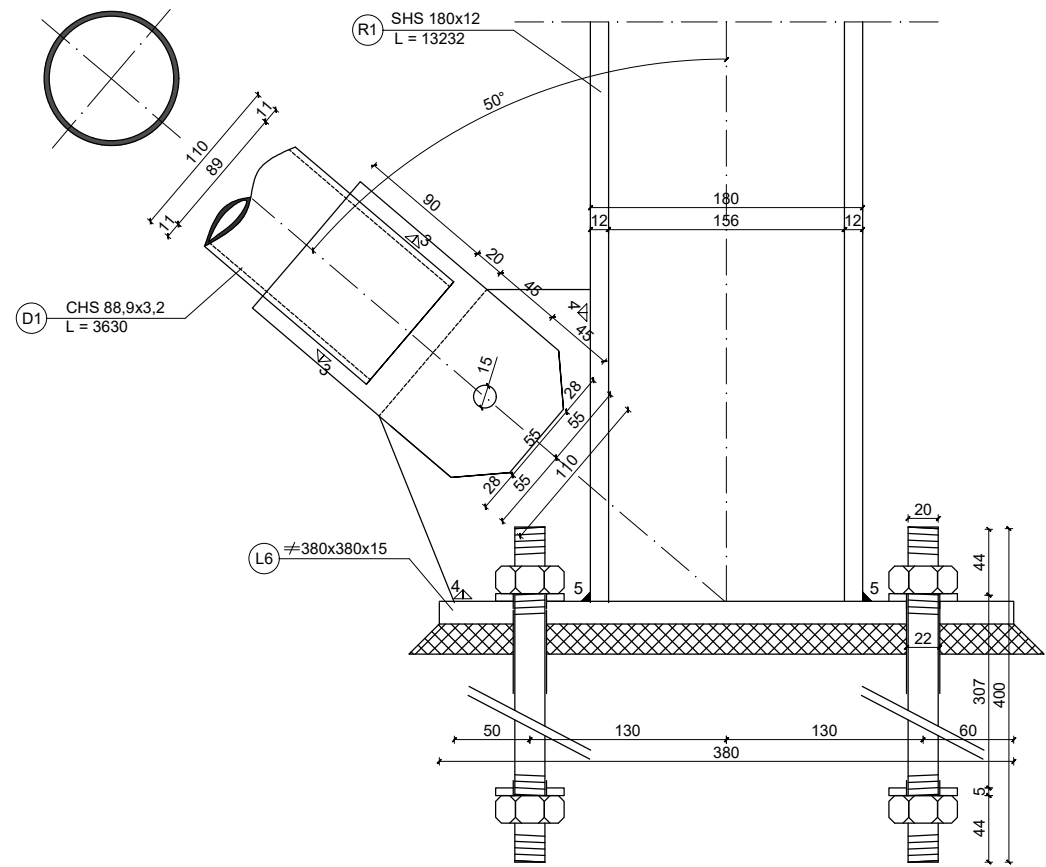
SMJER: KONSTRUKCIJE

DETALJ A MJ 1:5



GF	SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET	
	SADRŽAJ NACRTA: IZVEDBENI NACRT DETALJ A, PRIKLJUČAK PRSTENA I DIJAGONALE NA ELEMENT REBRA	
PREDMET: METALNE KONSTRUKCIJE 3		
RAZINA OBRADE: IZVEDBENI PROJEKT		
MENTOR: prof.dr.sc. DAVOR SKEJIĆ	MJERILO: 1:5	
DATUM: studeni, 2023.		
AKADEMSKA GODINA: 2023./24.		
IZRADIO: TATJANA CIGULA	SMJER: KONSTRUKCIJE	

DETALJ B MJ 1:5



GF SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

SADRŽAJ NACRTA: IZVEDBENI NACRT
DETALJ B, PRIKLJUČAK U STOPI LUKA S
DIJAGONALOM

PREDMET: METALNE KONSTRUKCIJE 3

RAZINA OBRADE: IZVEDBENI PROJEKT

MENTOR: prof.dr.sc. DAVOR SKEJIĆ

DATUM: studeni, 2023.

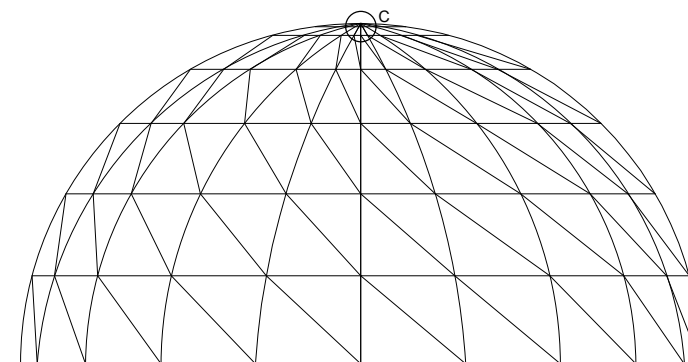
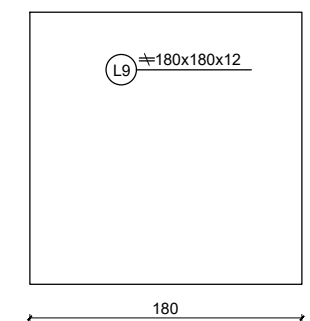
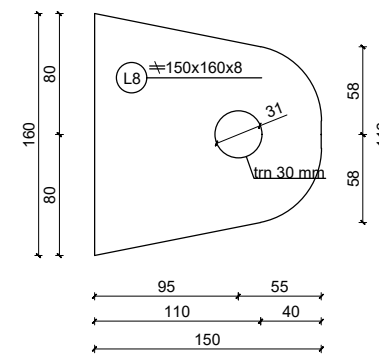
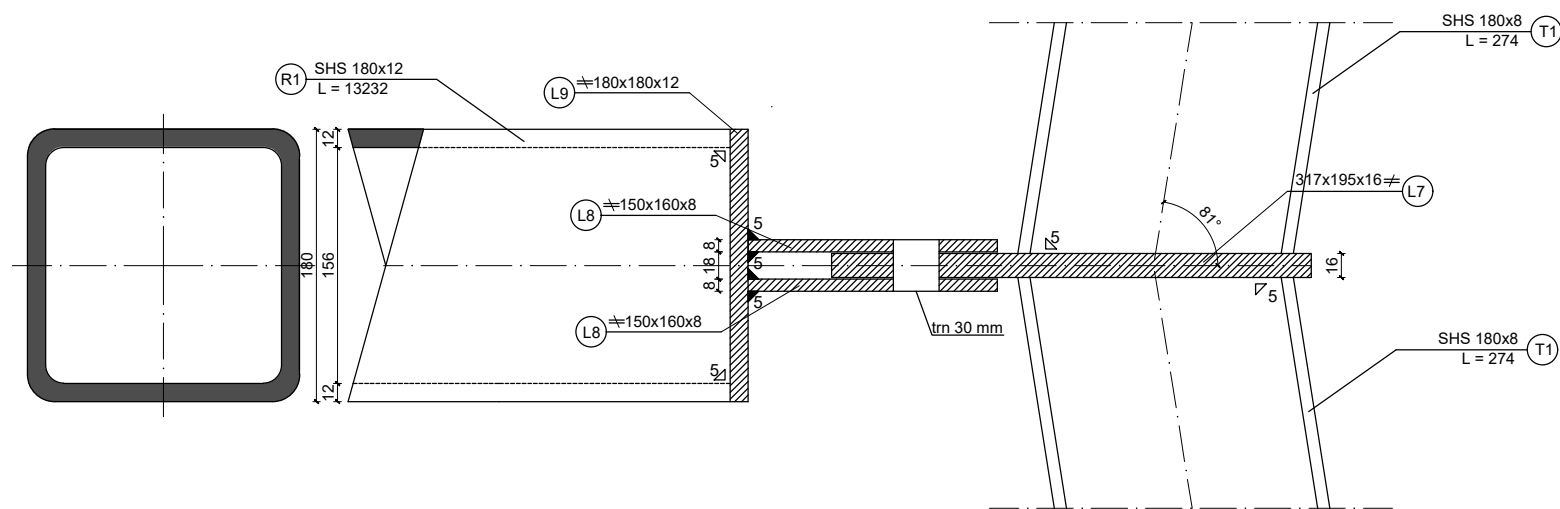
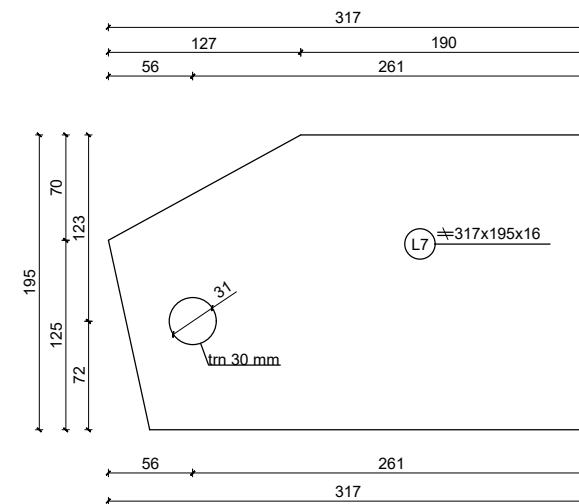
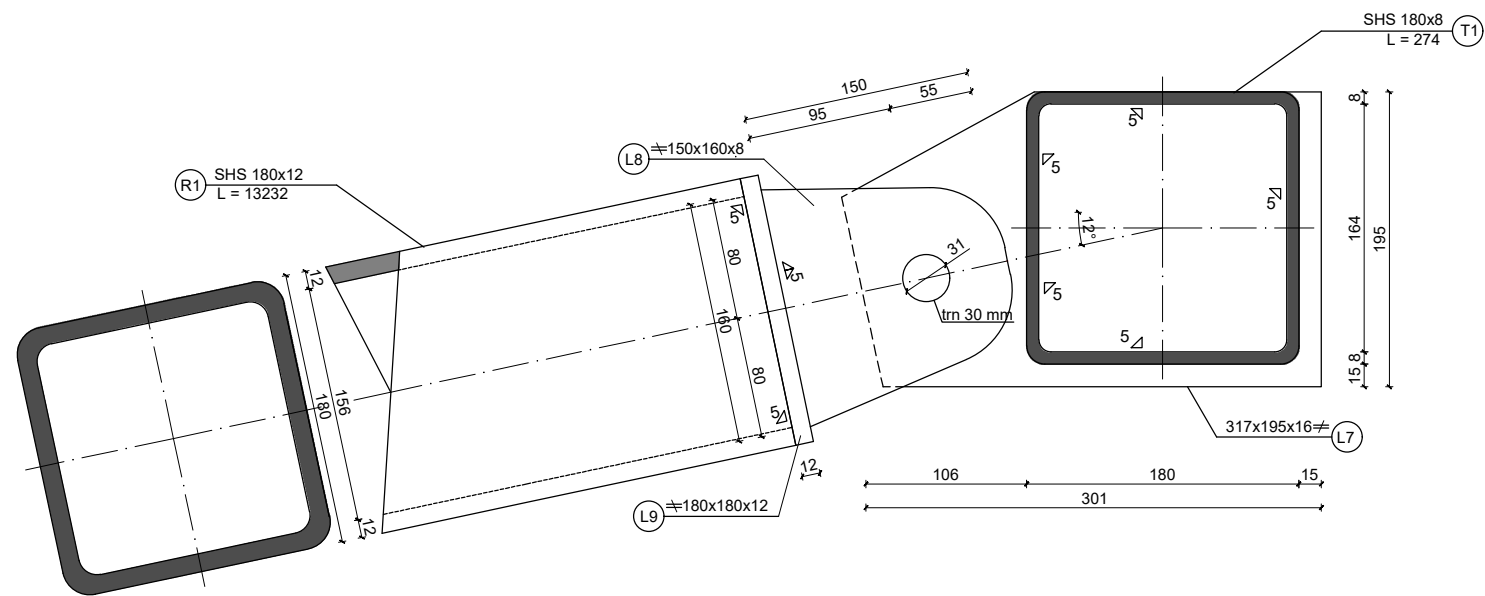
AKADEMSKA GODINA: 2023./24.

IZRADIO: TATJANA CIGULA

MJERILO:
1:5

SMJER: KONSTRUKCIJE

DETALJ C MJ 1:5



GF SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET	
SADRŽAJ NACRTA: IZVEDBENI NACRT DETALJ C, PRIKLJUČAK REBRA NA TLAČNI PRSTEN	
PREDMET: METALNE KONSTRUKCIJE 3	
RAZINA OBRADBE: IZVEDBENI PROJEKT	
MENTOR: prof.dr.sc. DAVOR SKEJIĆ	MJERILO: 1:5
DATUM: studeni, 2023.	
AKADEMSKA GODINA: 2023./24.	
IZRADIO: TATJANA CIGULA	SMJER: KONSTRUKCIJE