

Armirano betonski toranj

Jurak, Martina

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:741014>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-07**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Martina Jurak

ARMIRANO BETONSKI TORANJ

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Martina Jurak

ARMIRANO BETONSKI TORANJ

DIPLOMSKI RAD

Mentorica: Ana Mandić Ivanković

Komentor: Dominik Skokandić

Zagreb, 2024



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Martina Jurak

REINFORCED CONCRETE TOWER

MASTER THESIS

Supervisor: Ana Mandić Ivanković

Cosupervisor: Dominik Skokandić

Zagreb, 2024



TEMA DIPLOMSKOG RADA

Ime i prezime studenta: **Martina Jurak**

JMBAG: **0082057569**

Diplomski rad iz predmeta: **Specijalne inženjerska građevine**

Naslov teme
diplomskog rada:

HR	Armirano betonski toranj
ENG	Reinforced concrete tower

Opis teme diplomskog rada:

Općenito o ob tornjevima
Tehnički opis konstrukcije
Analiza svih opterećenja i mjerodavnih kombinacija
Proračun po teoriji 2. reda
Preliminarno dimenzioniranje
Proračun temelja
Nelinearni proračun
Konačno dimenzioniranje tijela tornja
Lokalni proračuni i dimenzioniranje
Pregled rada sa zaključkom

Datum: **14.04.2023.**

Komentor: **Dominik Skokandić**
(Ime i prezime komentora)

Mentor: **Ana Mandić Ivanković**
(Ime i prezime mentora)

(Potpis mentora)



Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Student/ica :

Martina Jurak

(Ime i prezime)

0082057569

(JMBAG)

zadovoljio/la je na pisanom dijelu diplomskog rada pod naslovom:

Armirano betonski toranj

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

Reinforced concrete tower

(Naslov teme diplomskog rada na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

-

(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

-

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum:

18.9.2024.

Mentor:

Ana Mandić Ivanković

Potpis mentora:

Ana Mandić Ivanković

Komentor:

Dominik Skokandić



OBRAZAC 4

IZVJEŠĆE MENTORA O PROVEDENOJ PROVJERI IZVORNOSTI
PISANOG DIJELA DIPLOMSKOGA RADA

Ime i prezime studenta:	Martina Jurak
JMBAG:	0082057569
Naslov teme diplomskog rada (HR):	Armirano betonski toranj
Ukupna podudarnost:	3%
Izvori s interneta:	2%
Publikacije:	1%
Studentski radovi:	1%

Ime i prezime mentora:

Ana Mandić Ivanković

Mišljenje mentora (rad (ne)zadovoljava uvjete izvornosti) s obrazloženjem:

Rad zadovoljava uvjete izvornosti jer je zadan kao individualni proračunski zadatak te su mentor i komentor pratili izradu rada i nacрта. Podudarnost formula i teksta koji prati provedbu proračuna je za očekivati jer se proračun provodi u skladu s propisima i normama po zadanim procedurama.

Datum:

18.9.2024.

Potpis mentora:

Ana Mandić Iv.

ZAHVALE

Najveće hvala mojim roditeljima koji su mi u svemu uvijek najveća podrška i oslonac. Hvala prijateljima koji su uvijek tu za mene i na koje uvijek mogu računati, a ponajviše hvala Luciji, Iris, Stipanu i Josipu s kojima sam tijekom ovih godina studiranja prolazila od suza pa do smijeha.

Također se želim zahvaliti svojoj mentorici prof. dr. sc. Ani Mandić Ivanković na iskazanom povjerenju, vodstvu i razumijevanju. Veliko hvala i komentoru doc. dr. sc. Dominiku Skokandiću koji je bio od velike pomoći pri pisanju rada i podrška.

SAŽETAK

Ovaj rad bavi se analizom proračuna i dimenzioniranja armiranobetonskog telekomunikacijskog tornja pod djelovanjem vjetrovnog i drugih opterećenja, s naglaskom na usporedbu njemačkih normi DIN i europskih normi EN 1991-1-4. Kroz konkretan primjer tornja na Sljemenu, prikazani su postupci proračuna vjetra, statičkih i dinamičkih sila te seizmičkih opterećenja. Rezultati su analizirani usporedbom tradicionalnog pristupa prema DIN-u i suvremenog nelinearnog proračuna prema EN-u. Kroz nelinearnu analizu dobivene su preciznije vrijednosti deformacija i naprezanja, osobito na višim dijelovima tornja, što je rezultiralo boljim uvidom u stvarno ponašanje konstrukcije. Na temelju rezultata, preporučeno je europski pristup zbog veće preciznosti u proračunu visokih konstrukcija izloženih promjenjivim uvjetima. Rad naglašava važnost pravilnog dimenzioniranja i proračuna za stabilnost i sigurnost konstrukcija u telekomunikacijskom sektoru.

Ključne riječi: armiranobetonski toranj, opterećenje vjetrom, DIN norme, EN 1991-1-4, nelinearni proračun, seizmičko opterećenje, stabilnost konstrukcije

SUMMARY

This paper deals with the analysis of calculation and dimensioning of a reinforced concrete telecommunications tower under the action of wind and other loads, with an emphasis on the comparison of the German standards DIN and the European standards EN 1991-1-4. Through the concrete example of the tower on Sljemen, the calculation procedures of wind, static and dynamic forces and seismic loads are presented. The results were analyzed by comparing the traditional approach according to DIN and the modern nonlinear calculation according to EN. Through non-linear analysis, more precise values of deformations and stresses were obtained, especially on the higher parts of the tower, which resulted in a better insight into the actual behavior of the structure. Based on the results, the European approach was recommended due to greater precision in the calculation of tall structures exposed to changing conditions. The paper emphasizes the importance of proper dimensioning and budgeting for the stability and safety of structures in the telecommunications sector.

Keywords: reinforced concrete tower, wind load, DIN standards, EN 1991-1-4, nonlinear calculation, seismic load, structural stability

SADRŽAJ

ZAHVALE	i
SAŽETAK	ii
SUMMARY	iii
SADRŽAJ	iv
1. UVOD	1
2. BETONSKI TELEKOMUNIKACIJSKI TORNJEVI	2
2.1. Važnost i razvoj telekomunikacijskih tornjeva.....	2
2.2. Osnovni dijelovi, temeljenje, proračun i dimenzioniranje	3
2.2.1. Osnovni dijelovi betonskog tornja	3
2.2.2. Temeljenje betonskih tornjeva	6
2.2.3. Proračun i dimenzioniranje betonskih tornjeva	7
2.3. Primjeri armiranobetonskih televizijskih tornjeva	9
2.3.1. Toranj u Stuttgartu	9
2.3.1.1. Koncipiranje	10
2.3.1.2. Projektiranje	11
2.3.1.3. Izgradnja.....	12
2.3.2. Tokyo Skytree.....	14
2.3.2.1. Koncipiranje	15
2.3.2.2. Projektiranje	16
2.3.2.3. Izgradnja Tokyo Skytreea.....	20
2.3.2.4. Utjecaj Tokyo Skytreea	22
3. KONCEPT KONSTRUKCIJE RADIOTELEVIZIJSKOG TORNJA SLJEME	23
3.1. Rekonstrukcija postojećeg tornja	23
3.2. Materijali.....	24
3.2.1. Beton.....	24
3.2.2. Armaturni čelik	24
4. ANALIZA OPTEREĆENJA	25
4.1. Stalno opterećenje.....	25
4.2. Dodatno stalno opterećenje.....	39
4.3. Korisno opterećenje.....	40
4.4. Opterećenje snijegom.....	41
4.5. Opterećenje vjetrom.....	44
4.5.1. Vjetar prema podacima o građevini iz postojeće dokumentacije.....	44
4.5.1.1. Određivanje ukupnog opterećenja od vjetra	44
4.5.2. Vjetar prema njemačkim normama DIN.....	48
4.5.2.1. Određivanje vjetrovne zone i djelovanja vjetra.....	48

4.5.2.2.	Određivanje statičkog pritiska vjetra.....	50
4.5.2.3.	Određivanje dinamičkog pritiska vjetra.....	51
4.5.2.4.	Određivanje ukupnog opterećenja od vjetra	56
4.5.2.5.	Osjetljivost na vibracije.....	59
4.5.3.	Vjetar prema europskim normama EN 1992-1-4	61
4.5.3.1.	Određivanje vršnog pritiska brzine vjetra	61
4.5.3.2.	Postupak određivanja koeficijenta sile c_f	63
4.5.3.3.	Određivanje faktora konstrukcije c_{scd} pojednostavljenim proračunom	66
4.5.3.4.	Određivanje ukupnog opterećenja od vjetra	70
4.5.4.	Rekapitulacija opterećenja vjetrom prema različitim normama.....	71
4.6.	Proračun na potres	73
4.6.1.	Modalna analiza.....	74
4.6.2.	Spektralna analiza	78
5.	PROCJENA MOMENATA SAVIJANJA PREMA TEORIJI DRUGOG REDA.....	79
5.1.	Određivanje učinaka drugog reda prema EN-u.....	79
5.2.	Određivanje učinaka drugog reda prema DIN-u.....	86
5.2.1.	Dimenzioniranje presjeka na dnu tornja	87
5.2.2.	Dimenzioniranje presjeka na sredini tornja.....	89
5.2.3.	Dimenzioniranje presjeka na gornjem djelu tornja	91
5.3.	Dimenzioniranje tornja na potresno opterećenje.....	93
5.3.1.	Dimenzioniranje presjeka na dnu tornja	93
5.3.2.	Dimenzioniranje presjeka na sredini tornja.....	96
5.3.3.	Dimenzioniranje presjeka na gornjem djelu tornja	97
6.	PRORAČUN TEMELJNE STOPE.....	100
7.	Ocjena NOSIVOSTI I UPORABLJIVOSTI KONSTRUKCIJE	102
7.1.	Ocjena GSN tornja – djelovanje vjetra prema europskim normama	104
7.2.	Ocjena GSU tornja – djelovanje vjetra prema europskim normama	107
8.	ZAKLJUČAK.....	112
	POPIS LITERATURE	113
	POPIS SLIKA	116
	POPIS TABLICA	117
	PRILOZI	118

1. UVOD

Telekomunikacijski tornjevi ključni su elementi moderne infrastrukture jer omogućuju prijenos informacija putem radijskih, televizijskih i digitalnih komunikacijskih mreža. Zbog njihove visine i izloženosti različitim vanjskim utjecajima, kao što su vjetar, potresi, snijeg i temperaturne promjene, od presudne je važnosti točno dimenzioniranje i proračun svih relevantnih sila koje djeluju na ove strukture kako bi se osigurala njihova stabilnost, dugovječnost i funkcionalnost. Provedi se proračun armiranobetonskog telekomunikacijskog tornja pod djelovanjem različitih vrsta opterećenja, s posebnim fokusom na vjetrovno i seizmičko opterećenje.

Cilj rada je usporediti pristupe proračunu prema njemačkim normama DIN i europskim normama EN te prikazati njihove specifičnosti i razlike u analizi djelovanja vjetra i drugih opterećenja. DIN norme, koje su kroz povijest bile široko primjenjivane u njemačkom i širem europskom građevinskom sektoru, daju velik naglasak na statičke pritiske vjetra uz dodatak dinamičkih utjecaja, dok su europske norme EN 1991-1-4 uvele sustavniji i detaljniji pristup uzimajući u obzir nelinearne efekte, što omogućuje preciznije dimenzioniranje i sigurnosne analize visokih konstrukcija u promjenjivim uvjetima.

Rad se konkretno oslanja na proračun armiranobetonskog tornja na Sljemenu, jednog od najvažnijih telekomunikacijskih objekata u Republici Hrvatskoj. Ovaj toranj se zbog svoje visine i pozicije na planinskom području nalazi u izrazito izloženom okruženju, gdje su ekstremni vjetrovi i seizmička aktivnost česti izazovi. U analizi su korišteni podaci iz postojećih studija te su izvršene usporedbe proračuna prema oba standarda, s posebnim naglaskom na metode proračuna opterećenja vjetrom, seizmičkog proračuna i njihov utjecaj na stabilnost konstrukcije.

Osim tehničkih aspekata, ovaj rad istražuje širu važnost pravilnog dimenzioniranja i proračuna telekomunikacijskih tornjeva. Ove strukture ne samo da imaju ključnu ulogu u osiguravanju neprekinutog prijenosa signala, već pridonose i gospodarskom rastu i povezivanju društava. Ispravna konstrukcija i stabilnost tornjeva presudni su za sprječavanje oštećenja uslijed prirodnih katastrofa, čime se izbjegavaju prekidi u telekomunikacijskim uslugama koji bi mogli imati dalekosežne posljedice za poslovni sektor i sigurnost građana.

Uvođenjem nelinearnog proračuna, europske norme donose značajne prednosti u preciznosti analize, posebno kada se radi o visokim i vitkim konstrukcijama. Razumijevanje razlika između proračunskih metoda i standarda važno je za inženjere koji se bave projektiranjem i održavanjem tornjeva, ali i za razvoj novih normi koje će još bolje odgovarati sve zahtjevnijim klimatskim i geološkim uvjetima.

Stoga ovaj rad ima širu relevantnost u inženjerskoj praksi jer prikazuje ne samo specifične metode proračuna već i pruža uvid u tehničke izazove i inovativna rješenja koja omogućuju povećanu otpornost i pouzdanost građevinskih konstrukcija.

2. BETONSKI TELEKOMUNIKACIJSKI TORNJEVI

2.1. Važnost i razvoj telekomunikacijskih tornjeva

TV tornjevi, također poznati kao tornjevi za emitiranje ili komunikaciju, bili su ključni u povijesti telekomunikacija i širenja informacija i zabave. Težnja za izgradnjom TV tornjeva započela je u ranim danima 20. stoljeća razvojem radijskog i televizijskog emitiranja. Unapređenjem radijske tehnologije, javila se potreba za višim strukturama za prijenos signala na veće udaljenosti, što je dovelo do razvoja ranih radio tornjeva koji su postavili temelje za TV tornjeve kakve danas vidimo.

U 1920-ima i 1930-ima, AM radio emitiranje je bilo u porastu te se pojavila težnja za dosezanjem što više slušatelja. Prvi radijski tornjevi bili su izrađeni od čelika te su prvenstveno služili kao podrška antenama za AM radio prijenos. Pojava televizije sredinom 20. stoljeća zahtijevala je još više i robusnije tornjeve. Prijelaz s crno-bijele televizije na televiziju u boji dodatno je povećao zahtjeve za infrastrukturu emitiranja [1].

TV tornjevi su postali sveprisutna komunikacija, odnosno okosnica zemaljskog emitiranja, omogućujući prijenos televizijskih i radijskih signala u domove, poslovne i javne prostore. Omogućuju bitan pristup vijestima, zabavi, obrazovanju i hitnim informacijama. Strateški su smješteni kako bi se postigla maksimalna pokrivenost signalom, osiguravajući da čak i udaljena područja s nedostatkom usluga mogu primati emitiranje. Njihov doseg proteže se preko golemih geografskih regija, povezujući ljude koji bi inače mogli biti izolirani. Projektirani su za isporuku visokokvalitetnih i pouzdanih signala gledateljima. Njihova visina i tehničke specifikacije minimiziraju smetnje signala i osiguravaju jasno i dosljedno iskustvo gledanja, doprinoseći zadovoljstvu publike i povjerenju u medij [2].

Prisutnost TV tornjeva potiče gospodarsku aktivnost promičući rast lokalne i nacionalne radio industrije. Oni pružaju platformu za oglašavanje, što je značajan izvor prihoda za nakladnike, pridonoseći tako gospodarskom krajoliku. TV tornjevi su se razvili u ikonske simbole gradova i regija, pridonoseći kulturnom identitetu i turizmu. Oni olakšavaju dijeljenje kulture, sporta i događaja sa širokom publikom, poboljšavajući kulturno i društveno tkivo zajednica. U sljedećim poglavljima obraditi će se neki od najpoznatijih radio-televizijskih tornjeva.

Oblikovanje i osnovni dijelovi betonskih tornjeva zahtijevaju pažljivo planiranje i projektiranje kako bi se osigurala njihova funkcionalnost, stabilnost i dugovječnost. Od temelja do vrha tornja, svaki element mora biti precizno dimenzioniran i izveden prema visokim standardima gradnje. Razumijevanje ovih elemenata ključno je za uspješno projektiranje i izgradnju betonskih tornjeva koji će izdržati sva opterećenja i pružiti pouzdanu uslugu u telekomunikacijskoj infrastrukturi. Ovo poglavlje detaljno razmatra sve aspekte dizajna,

temeljenja, proračuna i dimenzioniranja betonskih tornjeva, pružajući sveobuhvatan pregled potrebnih koraka i metodologija za uspješnu izgradnju ovih ključnih struktura.

2.2. Osnovni dijelovi, temeljenje, proračun i dimenzioniranje

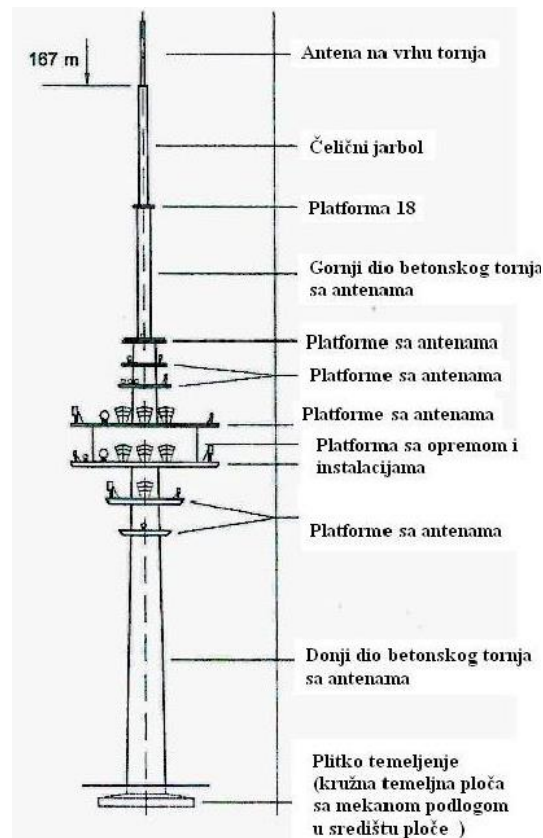
Na oblikovanje tornjeva utječu [3]:

- ekonomski zahtjevi
- konstrukcijski zahtjevi
- prirodni uvjeti
- zahtjevi uklapanja u okoliš
- zahtjevi na oblik

2.2.1. Osnovni dijelovi betonskog tornja

Osnovni dijelovi telekomunikacijskog betonskog tornja prikazani na Slici 1. su [3]:

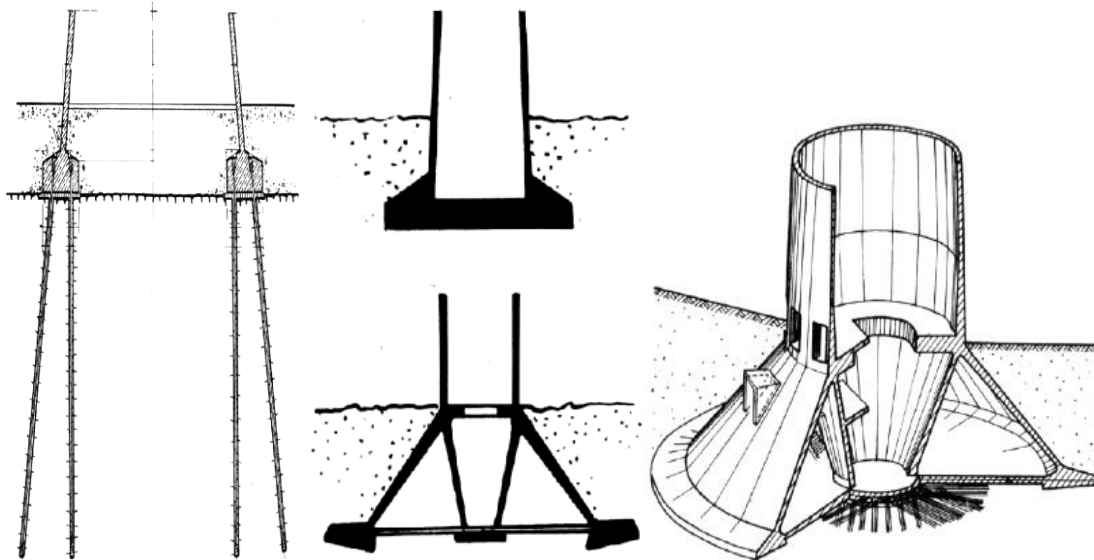
- temelji
- dijelovi tornja
- platforme tornja
- mjesta promjene promjera
- vrh tornja



Slika 1.: Osnovni dijelovi telekomunikacijskog tornja (Izvor: [3])

Temelji betonskog tornja osiguravaju stabilnost cijele strukture i prenose opterećenje na tlo. Postoji nekoliko vrsta temelja koji su prikazani na Slici 2., ovisno o geološkim uvjetima lokacije:

- **Temeljenje sa geotehničkim sidrima** - Koristi se u stjenovitom ili kamenom tlu, gdje sidra preuzimaju moment opterećenja. Ova vrsta temelja omogućava čvrstu vezu između tornja i tla, čime se osigurava stabilnost pod visokim opterećenjima vjetra i seizmičkih aktivnosti.
- **Kružne ili prstenaste ploče** - Primjenjuju se za ravnomjernu raspodjelu opterećenja na tlo. Ova vrsta temelja smanjuje koncentraciju naprezanja i pomaže u sprječavanju slijeganja tla.
- **Stožasti temelji** - Koriste se za koncentraciju opterećenja u središnjem dijelu temelja, čime se smanjuje naprezanje na rubovima i poboljšava stabilnost strukture.



Slika 2.: Temelji s geotehničkim sidrima, kružne ploče i stožasti temelji (Izvor: [3])

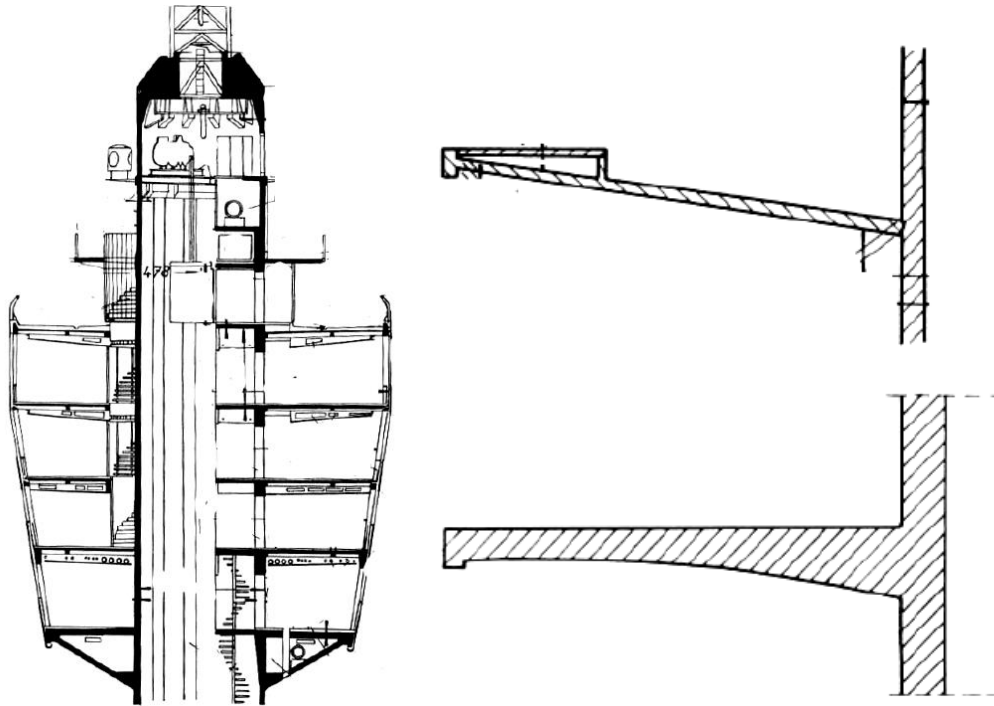
Temeljna ploča armiranobetonskog tornja obično sadrži podzemne prolaze za telekomunikacijske kabele, što može oslabiti dno tornja zbog otvora za prolaz kabela. Zbog toga je potrebno osigurati dodatne konstruktivne mjere za povećanje otpornosti na lokalna naprezanja [3].

Tijelo betonskog tornja može biti izvedeno u različitim oblicima, uključujući:

- **Zatvorene betonske cijevi** - Kružnog ili poligonalno poprečnog presjeka. Ova konstrukcija pruža odličnu otpornost na vjetar i druge horizontalne sile.
- **Penjajuće ili klizne konstrukcije** - Ove metode gradnje omogućuju jednostavniju i bržu izgradnju visokih tornjeva. Penjajuća konstrukcija se gradi segment po segment, dok klizna metoda koristi klizne oplate za kontinuirano betoniranje [3].

Platforme na tornjevima služe za smještaj telekomunikacijske opreme i omogućuju pristup tehničkom osoblju. Postoje dvije glavne vrste platformi te su prikazane na Slici 3.:

- **Ovješene platforme** - Plosnati konoidni oblik koristi se za manja opterećenja. Ove platforme pružaju jednostavan pristup i lakoću instalacije opreme.
- **Klasične konzolne platforme** - Konzolno podržane platforme koriste se za veća opterećenja. Veće platforme imaju kružni armiranobetonski prsten dvostruke debljine stijenke tornja, dok manje platforme imaju konstantnu debljinu tijela tornja i ostavljaju nastavke armature za sidrenje konzola [3].



Slika 3.: Ovješene i klasične konzolne platforme (Izvor: [3])

Vrh tornja često uključuje čelične rešetke ili cijevi usidrene u betonski dio tornja. Poprečni presjek vrha tornja obično je heksagonalnog oblika, što pruža optimalnu ravnotežu između stabilnosti i težine. Vrh tornja je dizajniran tako da minimalizira utjecaj vjetra i omogućuje sigurno postavljanje antena i druge opreme[3].

2.2.2. Temeljenje betonskih tornjeva

Temeljenje betonskih tornjeva zahtijeva pažljivo ispitivanje tla i primjenu adekvatnih metoda temeljenja. Geotehnički uvjeti lokacije igraju ključnu ulogu u odabiru vrste temelja. Postoje nekoliko ključnih aspekata temeljenja betonskih tornjeva:

1. Geotehnički uvjeti

Prije projektiranja temelja, potrebno je provesti detaljna geotehnička ispitivanja tla kako bi se odredila nosivost tla, razina podzemnih voda i druge relevantne karakteristike. Na osnovu tih ispitivanja, određuje se odgovarajuća vrsta temelja.

2. Vrste temelja

- **Plitki temelji** - Koriste se kada je nosivo tlo blizu površine. U ove temelje spadaju temeljne ploče i trake koje ravnomjerno raspodjeljuju opterećenje na tlo.
- **Duboki temelji** - Koriste se kada je nosivo tlo duboko ispod površine. Ovi temelji uključuju pilote i duboke temelje koji prenose opterećenje na dublje, čvršće slojeve tla [3].

3. Proračun temelja

Proračun temelja uključuje analizu opterećenja koja djeluju na temelj, uključujući vlastitu težinu tornja, opterećenja vjetrom i seizmička opterećenja. Temelj mora biti dimenzioniran tako da zadovolji sve sigurnosne i funkcionalne zahtjeve, ograničenje slijeganja i osiguranje stabilnosti pod različitim uvjetima [3].

2.2.3. Proračun i dimenzioniranje betonskih tornjeva

Opterećenje tornjeva [3]:

- vlastita težina
- djelovanje vjetra
- potresna opterećenja
- temperaturne promjene
- geometrijske imperfekcije građevine
- slijeganje temeljnog tla

Proračun i dimenzioniranje betonskih tornjeva zahtijevaju precizne inženjerske proračune kako bi se osigurala stabilnost i sigurnost strukture. Proces uključuje nekoliko ključnih koraka:

1. Analiza opterećenja

Analiza opterećenja obuhvaća identifikaciju svih sila koje djeluju na toranj, uključujući:

- **Vlastitu težinu tornja** - Težina betonske strukture i opreme instalirane na tornju.
- **Opterećenja vjetrom** - Horizontalne sile uzrokovane djelovanjem vjetra na toranj. Potrebno je uzeti u obzir različite brzine i smjerove vjetra kako bi se osigurala stabilnost konstrukcije.

- **Seizmička opterećenja** - Dinamičke sile koje djeluju na toranj tijekom potresa. Proračun seizmičkih opterećenja temelji se na lokalnim seizmičkim uslovima i odgovarajućim normama [3].

2. Proračun armature

Armatura u betonskom tornju mora biti projektirana tako da izdrži sva opterećenja koja djeluju na strukturu. To uključuje:

- **Vertikalnu armaturu:** Šipke koje preuzimaju vertikalna opterećenja i osiguravaju stabilnost tornja. Proračun vertikalne armature uključuje određivanje potrebne količine i rasporeda šipki kako bi se zadovoljili svi sigurnosni zahtjevi.
- **Prstenastu armaturu:** Šipke koje preuzimaju radijalne sile i osiguravaju stabilnost strukture pod horizontalnim opterećenjima. Proračun prstenaste armature uključuje određivanje potrebne količine i rasporeda šipki kako bi se osigurala otpornost na horizontalna opterećenja [3].

3. Dimenzioniranje tornja

Dimenzioniranje tornja podrazumijeva određivanje dimenzija svih dijelova tornja, kao što su temelji, tijelo tornja, platforme i vrh tornja. Proces uključuje:

- **Određivanje promjera i debljine zidova tornja:** Ove dimenzije moraju biti dovoljno velike da izdrže sva opterećenja koja djeluju na strukturu.
- **Projektiranje platformi i vrha tornja:** Dimenzije platformi i vrha tornja moraju omogućiti sigurno postavljanje opreme i pristup tehničkom osoblju [3].

4. Sigurnosni faktori

Sigurnosni faktori su ključni u proračunu i dimenzioniranju betonskih tornjeva. Oni obuhvaćaju dodatne mjere sigurnosti kako bi se osiguralo da struktura može izdržati nepredviđene situacije, poput ekstremnih vremenskih uvjeta ili nepredviđenih opterećenja.

2.3. Primjeri armiranobetonskih televizijskih tornjeva

2.3.1. Toranj u Stuttgartu

Stuttgart Tower, poznat i kao Fernsehturm Stuttgart, jedan je od najpoznatijih simbola grada Stuttgarta u Njemačkoj. Dizajniran od strane arhitekta Fritza Leonhardta, toranj je otvoren 1956. godine i predstavljao je inovaciju u izgradnji visokih objekata. Međutim, proces koncipiranja, projektiranja i izgradnje tornja bio je pun izazova i problema koje je trebalo riješiti kako bi se osigurala njegova funkcionalnost, stabilnost i sigurnost. Vizura samog tornja prikazana je na Slici 4.



Slika 4.: Stuttgartski televizijski toranj (Izvor: [4])

2.3.1.1. Koncipiranje

Kada je rešetkasti toranj od 210 metara planiran za brda iznad Stuttgarta, Leonhardt je smatrao da nema estetskih vrijednosti. Stoga je predložio alternativu od armiranog betona, odnosno vitku cijev čija bi bočna krutost u potpunosti ovisila o vlastitoj krutosti, više poput trske koja strši iz tla. Uz arhitektonske savjete za dizajn interijera Erwina Heinlea, predvidio je objekte zatvorene u četverokatnoj kapsuli 160 metara iznad zemlje. Osovina bi se nastavljala kroz kapsulu, a na njen bi vrh bio pričvršćen čelični prijenosni jarbol visok 51 metar [5].

Koncipiranje takve strukture predstavljalo je radikalan odmak od dotadašnjih praksi u gradnji visokih tornjeva. Glavni izazov bio je uvjeriti investitore i javnost da je betonska struktura jednako sigurna, ako ne i sigurnija, od tradicionalnih čeličnih rešetkastih tornjeva. Leonhardt je morao prezentirati detaljne studije o strukturnoj stabilnosti, otpornosti na vjetar i seizmičkim aktivnostima kako bi dokazao da je njegova ideja izvediva i pouzdana [5].

Toranj se sastoji od temeljnog tijela ispod zemlje, jednokatne ulazne zgrade, okna tornja tzv. korb (glava ili koš) i antene na vrhu. Gornja platforma za gledanje na četverokatnoj jarbolnoj košari je na 150 m visine; ukupna visina uključujući jarbol odašiljača je 217 m. Promjer osovine je 10,80 m u podnožju tornja i 5,04 m ispod glave tornja. Promjer platforma je 15,10 m. Na gornjem kraju okna postavljen je čelični antenski stup visok 51 m. Jednokatnica, tipska stambena zgrada kao primjer arhitekture 1950-ih, podijeljena je na ulazni prostor s pristupom dizalima, uslužnu zgradu i mali restoran [6].

Do glave kule se dolazi pomoću dva dizala i stubišta u oknu. Dizala putuju brzinom od 5/m sekundi, što rezultira vremenom putovanja od cca. 36 sekundi. Stepenice su u početku spiralne do visine od 75m a zatim jednokračno stubište. Unutar okna tornja bili su, osim stepenica i dizala, cjelokupni opskrbni vodovi za tehnički rad restorana i uslužnih objekata [6].

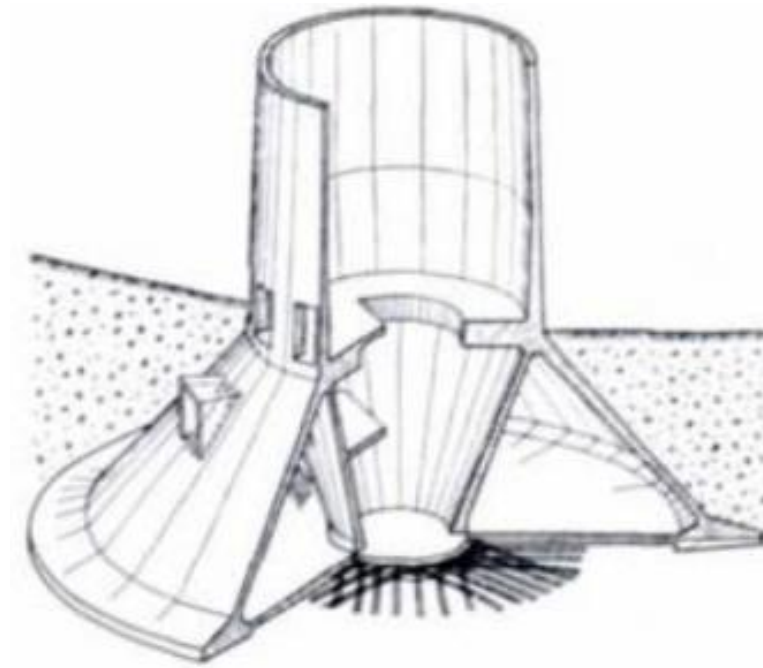
2.3.1.2. Projektiranje

Projektiranje tornja uključivalo je niz izazova, posebno u odnosu na strukturalna i dinamička opterećenja. Jedan od značajnih problema tijekom projektiranja bio je postavljanje armaturnih šipki koje su trebale stršiti iz osovine i formirati vezu s platformama. Konvencionalna praksa bila je savijanje šipki uz okomitu površinu kako bi se omogućio prolazak penjajuće oplata, ili prekidanje procesa penjanja i ponovno sastavljanje oplata iznad razine platforme. Ovaj izazov zahtijevao je inovativne pristupe i prilagodbe tijekom gradnje [5].

Dinamička otpornost i stabilnost

Jedan od ključnih aspekata projektiranja bio je osiguravanje dinamičke otpornosti i stabilnosti tornja. Budući da je toranj predviđen za emitiranje radio i televizijskih signala, bilo je od ključne važnosti minimizirati vibracije koje bi mogle utjecati na opremu za prijenos. Leonhardt i njegov tim koristili su najnovije metode analize vibracija i simulacije opterećenja vjetrom kako bi osigurali da će toranj ostati stabilan čak i u najtežim uvjetima [6].

Uz to, projektiranje temelja tornja predstavljalo je poseban izazov. S obzirom na visinu i vitkost tornja, bilo je potrebno osigurati dovoljnu stabilnost kroz adekvatno projektirane temelje. Temelji su morali izdržati ne samo vertikalna opterećenja, već i horizontalne sile uzrokovane vjetrom i potencijalnim seizmičkim aktivnostima. Kroz detaljne geotehničke studije i testiranja, tim je uspio razviti temelje koji su osigurali potrebnu stabilnost. Leonhardt je shvatio da bi temelj u obliku prstena sigurnije raspodijelio pritiske i smanjio rizik različitog slijeganja jedne strane temelja u odnosu na drugu [6]. Temelj, koji je potpuno pod zemljom, sastoji se od dva krnja stošca izrađena od armiranog betona postavljena jedna naspram drugog. Oni se oslanjaju na prednapetu armiranobetonsku ploču vanjskog promjera 27 m. Ova se konstrukcija pojavljuje, prema opisu Fritza Leonhardta, "poput prostornog okvira velike krutosti". Temelj završava armiranobetonskom pločom debljine jednog metra. Ovakav temelj tornja, prikazan na Slici 5. može se smatrati posebnom inženjerskom inovacijom [6].



Slika 5.: Temelj Stuttgartskog TV tornja (Izvor: [5])

2.3.1.3. Izgradnja

Materijali i tehnologija izgradnje

Izgradnja Stuttgartskog tornja zahtijevala je korištenje najnaprednijih materijala i tehnologija tog vremena. Armirani beton korišten za izgradnju tornja morao je biti izuzetno visoke kvalitete kako bi osigurao dugovječnost i otpornost na vremenske uvjete. Beton je morao zadovoljiti stroge standarde za otpornost na smrzavanje, vlažnost i koroziju, što je zahtijevalo upotrebu specijalnih aditiva i kontroliranih uvjeta lijevanja [5].

Proces izgradnje tornja trajao je 14 mjeseci, s početkom 10. lipnja 1954. i završetkom 5. veljače 1956. godine. Tijekom izgradnje korištena je tehnologija penjajuće oplata, koja se postupno pomicala prema gore dok se beton ulijevao i stvrdnjavao unutar nje. Ova metoda omogućila je efikasnu i ekonomičnu izgradnju visokih betonskih struktura. Međutim, susreli su se s neugodnim problemima prilikom postavljanja armaturnih šipki, što je zahtijevalo prilagodbe i inovacije tijekom samog procesa izgradnje [6].

Sigurnosni aspekti i izazovi

Jedan od ključnih aspekata izgradnje bilo je osiguranje sigurnosti radnika i budućih korisnika tornja. Zbog visine tornja, radnici su morali raditi na velikim visinama, što je povećavalo rizik od nesreća. Stroge mjere sigurnosti su implementirane kako bi se minimizirao rizik, uključujući korištenje sigurnosnih pojaseva, mreža i skela [5].

Uz sigurnost radnika, veliki fokus bio je stavljen i na sigurnost strukture tijekom njenih operativnih godina. Toranj je morao izdržati ekstremne vremenske uvjete, poput jakih vjetrova, snijega i leda. Posebni testovi i simulacije su provedeni kako bi se osiguralo da toranj može izdržati takve uvjete bez oštećenja [5].

Ekološki i socijalni aspekti

Gradnja Stuttgartskog tornja također je imala značajan ekološki i socijalni utjecaj. S obzirom na svoju visinu i lokaciju, toranj je postao dominantna vizualna točka u Stuttgartu, mijenjajući izgled grada. Ovaj projekt izazvao je različite reakcije među stanovnicima; dok su neki bili ponosni na inovativni dizajn i tehnički podvig, drugi su izražavali zabrinutost zbog utjecaja na okoliš i vizualnu dominaciju strukture [5].

Ekološki aspekti projekta također su bili pažljivo razmotreni. Korištenje betona kao glavnog materijala imalo je svoj ekološki otisak, uključujući emisije CO₂ tijekom proizvodnje cementa. Međutim, dugovječnost i minimalno održavanje betonske strukture smanjili su dugoročne ekološke troškove. Također, toranj je dizajniran tako da bude energetske efikasan, s minimalnom potrošnjom energije za održavanje unutarnje klime i osvjetljenja [5].

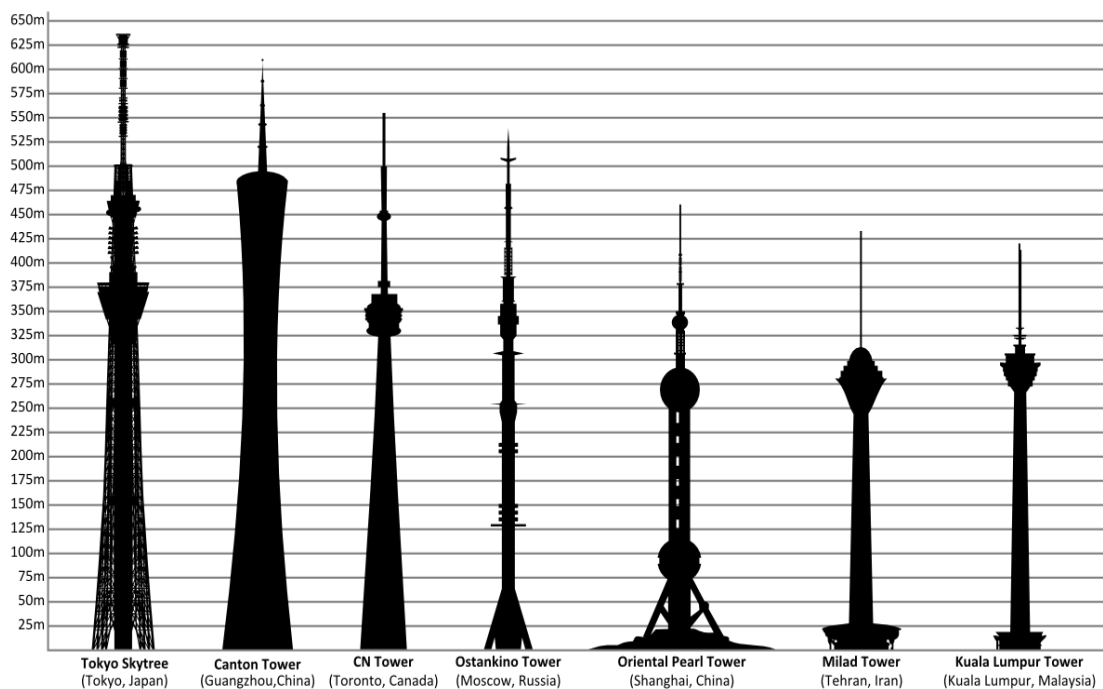
Izgradnja Stuttgartskog televizijskog tornja bila je juniorski pothvat koji je suočio projektante i graditelje s mnogim izazovima. Kroz inovativne metode koncipiranja, pažljivo projektiranje i prilagodbe tijekom izgradnje, ovi problemi su uspješno prevladani, što je rezultiralo jednim od najpoznatijih tornjeva na svijetu. Ovaj toranj ne samo da je služio svojoj osnovnoj funkciji, već je postao i simbol arhitektonske inovacije i inženjerske izvrsnosti.

Stuttgartski televizijski toranj ostaje primjer kako se hrabrost u dizajnu i inovacija u tehnici mogu spojiti u cilju stvaranja strukture koja traje i inspirira generacije. Njegova izgradnja nije samo priča o tehnološkom napretku, već i o viziji, hrabrosti i upornosti inženjera i arhitekata koji su vjerovali u svoje ideje i pretvorili ih u stvarnost.

2.3.2. Tokyo Skytree

Tokyo Skytree, s visinom od 634 metra, predstavlja najviši toranj u Japanu i jedan od najviših građevinskih objekata na svijetu odnosno druga je najveća građevina na svijetu koju je napravio čovjek, na čijem je samom vrhu Burj Khalifa u Dubaiju (830 m), a slijede ga Canton Tower (600 m), CN Tower (553 m) i Ostankino Tower (504 m). Ostali poznati tornjevi kao što su Sears Tower (527 m), Taipei 101 (508 m) i Petronas Towers (452 m) znatno su manji. Unatoč tome što je izgrađen u seizmički vrlo aktivnom području gdje se izmjeri 60-70 vidljivih potresa godišnje, toranj je jedna od najsigurnijih zgrada ikada izgrađenih. To je omogućeno fuzijom najsuvremenijeg konstrukcijskog dizajna, napredne tehnologije prigušivača i visokokvalitetne tehnologije konstrukcije. Osim toga, nakon dvogodišnje faze projektiranja, toranj je bio dovršen za manje od 3,5 godine (srpanj 2008. – prosinac 2011.). Za usporedbu: izgradnja minhenskog Olympia tornja visokog svega 150 metara trajala je više od tri godine, a izgradnja Burj Khalife čak više od šest godina [7]. Sama usporedba najviših tornjeva na svijetu prikazana je na Slici 6.

Izgradnja ovog tornja, koji je otvoren za javnost 2012. godine, nije bila samo tehnički izazov, već je zahtijevala detaljno promišljanje i planiranje na svakom koraku, od koncepta do konačne izgradnje. Ovo poglavlje će istražiti problematiku koncipiranja, projektiranja i izgradnje Tokyo Skytreea, uključujući tehničke izazove, ekološke aspekte i ekonomske implikacije.



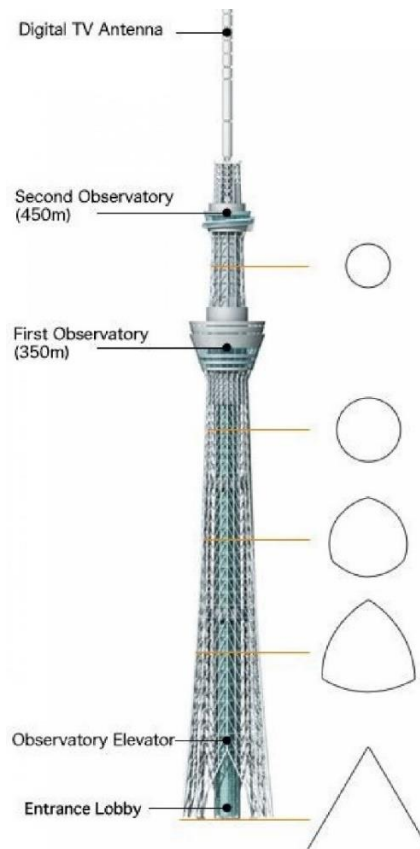
Slika 6.: Usporedba najviših TV tornjeva na svijetu (Izvor: [8])

2.3.2.1. Koncipiranje

Koncept za Tokyo Skytree potekao je iz potrebe za nadogradnjom postojeće komunikacijske infrastrukture u Tokiju. Rapidna urbanizacija i tehnološki napredak doveli su do potrebe za modernim telekomunikacijskim tornjem koji bi mogao pružiti bolju pokrivenost digitalnog signala, posebno zbog prijelaza s analogne na digitalnu televiziju.

Prvi izazov u fazi koncipiranja bio je odabir odgovarajuće lokacije. Toranj je smješten u okrugu Sumida, sjeveroistočno od centra Tokija, gdje je mogao optimalno zadovoljiti tehničke i funkcionalne zahtjeve. Također, lokacija je odabrana kako bi se toranj uklopio u urbani pejzaž i postao nova turistička atrakcija koja bi privlačila posjetitelje. Samo mjesto tornja je bivša željeznička ranžirna stanica, s osobitošću da je dugačka u smjeru istok-zapad, a samo oko 80 m u smjeru sjever-jug. Kako bi se izgradila zgrada viša od 600 m u teškim prirodnim uvjetima Japana, teško je osigurati tlocrtni oblik u podnožju koji će sigurno izdržati horizontalne sile, kada širina nije nužno dovoljna [9].

Oblik tornja rezultat je preklapanja nekoliko zahtjeva koji se tiču stabilnosti, uporabe, proizvodnje i izgleda. To je dovelo do složenog skupa dizajnerskih parametara koji su morali biti usklađeni. Od podnožja do vrha kula nekoliko puta mijenja svoj oblik što je vidljivo na Slici 7., te je unatoč toj promijeni oblika dobro dizajnirana cjelina. Do otprilike 50 metara, toranj se oslanja na konstrukciju nalik tronošću koja omogućuje induciranje sila konstrukcije na koncentriran i optimiziran način u temelje. Od 50 do oko 200 metara, trokutasta struktura jamči stabilnost tornja protiv horizontalnih sila koje djeluju na toranj. Iznad 200 metara trokutasta struktura neprimjetno se mijenja u okruglu strukturu smanjujući utjecaj horizontalnih sila vjetera na toranj. Na visini od 350 metara i 450 metara oko tanje konstrukcije tornja elegantno su položeni stožasti prstenovi. Ne samo da sadrže funkcije restorana i zvjezdarnice, već također povećavaju stabilnost i ravnotežu tornjeva [7].



Slika 7.: Oblici dijelova tornja (Izvor: [10])

2.3.2.2. Projektiranje

Projektiranje Tokyo Skytreea bio je izazovan proces koji je uključivao brojne aspekte arhitekture, građevinarstva i urbanog planiranja. Ključni ciljevi projektiranja bili su osigurati stabilnost i sigurnost tornja u seizmički aktivnoj zoni, postići aerodinamičku učinkovitost i stvoriti atraktivan estetski izgled koji bi privlačio posjetitelje iz cijelog svijeta. S obzirom na to da se Japan nalazi na jednoj od najaktivnijih seizmičkih zona na svijetu, jedan od najvećih izazova bio je dizajniranje strukture koja bi mogla izdržati snažne potrese i vjetar.

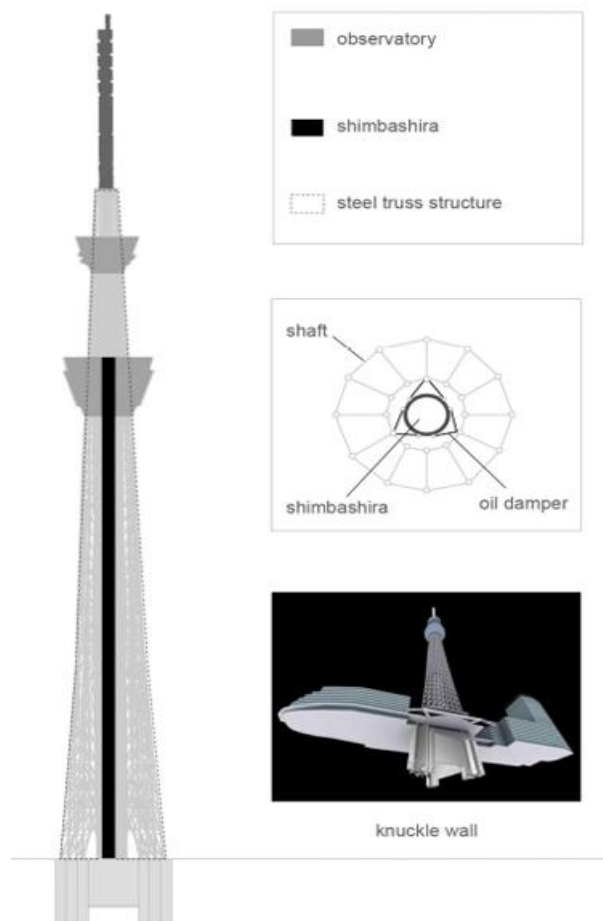
Seizmička otpornost

Jedan od glavnih izazova u projektiranju Tokyo Skytreea bila je njegova seizmička otpornost. Japan je poznat po svojoj visokim seizmičkoj aktivnosti, što znači da su projektanti morali osigurati da toranj može izdržati potrese velikih magnituda.

Tokyo Skytree nije samo imitacija principa pagoda shimbashira, već složena nova interpretacija koja je kombinirana s mnoštvom najsuvremenijih tehnika prigušivača čija je kombinacija prikazana na Slici 8. Općenito, to je višesegmentni sustav koji omogućuje pojedinačnim

segmentima da različito reagiraju na vibracije. U različitim dijelovima zgrade potrebna je različita reakcija na potrese.

Dakle, unutarnja betonska jezgra (armirani beton) odvojena je od vanjske čelične konstrukcije, a antenski stup na vrhu je odvojen od unutarnje betonske jezgre ispod. Tako se u osnovi mogu identificirati tri neovisna dijela. Vrsta i čvrstoća veze između unutarnje betonske jezgre i vanjske čelične konstrukcije mijenja se s visinom tornja. Od 0 do 125 metara obje su strukture čvrsto povezane i tvore stabilnu podlogu, koja je inovativnim sustavom temeljenja pričvršćena na tlo. Raspršene, zidne ploče zabijene su u zemlju poput korijenja stabla. Zid je posvuda zašiljen čime se osigurava sigurno prianjanje temelja, također u slučaju ekstremnih sila vjetra koji bi mogli utjecati na 634 metra visuku strukturu tornja. Od 125 m do 375 m metara, unutarnja betonska jezgra i vanjska čelična konstrukcija povezani su uljnim prigušivačima. Kada bi se svi dijelovi tornja međusobno pričvrstili, podrhtavanja bi se pojačala po visini zgrade. Dio iznad 375 metara može fleksibilno reagirati na sile vjetra i suprotstaviti se vibracijama s tla. Zbog primijenjene strategije odvajanja, količina seizmičke energije koja djeluje na zgradu u slučaju potresa može se smanjiti za 40% [7].



Slika 8.: Kombinacija shimbashire i najsuvremenijih prigušivača (Izvor: [9])

Aerodinamička učinkovitost

S obzirom na visinu Tokyo Skytreea, projektanti su morali osigurati da toranj bude otporan na snažan vjetar. Aerodinamički dizajn, zajedno s pažljivo odabranim materijalima, omogućio je da toranj može izdržati vjetar brzine do 83 metara u sekundi za 10 minuta srednje vrijednosti. Vanjska struktura tornja sastoji se od čeličnih greda i stupova koji formiraju trokutaste module, a sam trokutasti oblik smanjuje turbulenciju i omogućuje stabilniji prolazak vjetra kroz toranj. Projektanti su koristili lagane, ali čvrste materijale kako bi smanjili težinu tornja i površinu izloženu vjetru što pridonosi smanjenju snage koju stvara vjetar, bez ugrožavanja njegove stabilnosti. Čelične grede korištene u konstrukciji posebno su tretirane kako bi izdržale koroziju i ekstremne vremenske uvjete, što dodatno povećava dugovječnost tornja [11].

Estetski Dizajn

Estetski dizajn Tokyo Skytreea također je bio ključan aspekt projektiranja. Projektanti su željeli stvoriti strukturu koja bi bila prepoznatljiva i simbolična za Tokio. Vanjska obloga tornja izrađena je od stakla i aluminijskih panela koji reflektiraju svjetlost na različite načine, stvarajući vizualno atraktivne efekte. Ova obloga ne samo da doprinosi estetskom izgledu, već također štiti strukturu od vanjskih utjecaja. Od početka projekta, boja i osvjetljenje tornja također su bili relevantni elementi u dizajnu kako bi se ojačala simbolika njegove japanske suštine i originalnosti osobito noću kao što je vidljivo na Slici 9. Odlučeno je da njegova struktura ima "izvornu boju temeljenu na 'aijiro', najsvjetlijoj nijansi japanske tradicionalne indigo plave". Za ovu nijansu, nazvanu "Skytree white", rečeno je da predstavlja tradicionalnu obrtničku kulturu Eda koja je još uvijek prisutna u području Sumida/Taito. S druge strane, za osvjetljenje je odlučeno da ima dva osnovna uzorka. Jedan od njih je Miyavi, Edo-ljubičasta i zlatna kombinacija, za koju se kaže da simbolizira Edov tradicionalni estetski osjećaj, te drugi odabrani uzorak je Iki, plavo-srebrni aranžman, koji predstavlja snažan duh i raspoloženje Edoovih stanovnika. Od samog početka, vlasnici, dizajneri, arhitekti i inženjeri koji stoje iza ovog projekta namjeravali su stvoriti vezu između tornja i ljudi Tokija i Japana. Cilj im je bio da se obični građani Japana osjećaju bliskim i predstavljenim novim obilježjem i bili su prilično uspješni [12].



Slika 9.: Tokyo Skytree noću (Izvor: [13])

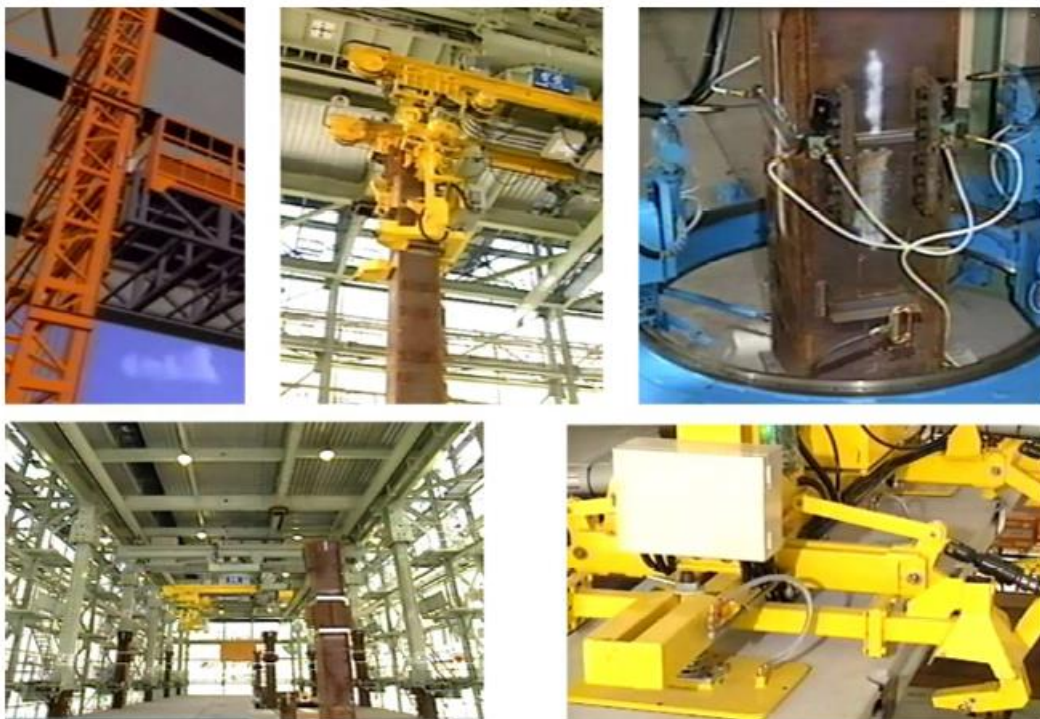
Unutarnji prostori i funkcionalnost

Unutarnji prostori tornja projektirani su s naglaskom na funkcionalnost i korisničko iskustvo. Tokyo Skytree sadrži brojne sadržaje koji privlače posjetitelje. Tokyo Skytree ima dva glavna observatorija, jedan na visini od 350 metara, a drugi na visini od 450 metara. Ovi observatoriji nude panoramski pogled na Tokio i okolne regije pa čak za vrijeme vedrog dana se vidi i sama planina Fiji koja je na udaljenosti od 106 km. Projektiranje observatorija uključivalo je postavljanje velikih staklenih panela koji pružaju neometan pogled i stvaraju osjećaj lebdenja iznad grada. U sklopu tornja nalaze se brojne trgovine i restorani koji posjetiteljima nude raznoliku ponudu. Ovi prostori su pažljivo projektirani kako bi pružili ugodan ambijent i omogućili posjetiteljima da uživaju u jedinstvenom iskustvu. Dizajn unutarnjih prostora uključuje moderne elemente s naglaskom na japansku estetiku [14].

2.3.2.3. Izgradnja Tokyo Skytreea

Izgradnja Tokyo Skytreea započela je 14. srpnja 2008. godine, kada je postavljen temeljni kamen. Pripremna faza uključivala je obimne geotehničke studije kako bi se osigurala stabilnost temelja. Zbog mekane podloge i visoke seizmičke aktivnosti u regiji, temelj tornja morao je biti posebno dizajniran kako bi izdržao eventualne potrese. Prvi korak bio je iskopavanje temelja do dubine od oko 50 metara, gdje su postavljeni piloti izrađeni od visokokvalitetnog betona. Ovi piloti, koji su se protezali duboko u zemlju, osiguravali su čvrstu osnovu za toranj. Nakon toga, temelj je ojačan čeličnom armaturom i betonom kako bi se postigla maksimalna stabilnost [15].

Obayashi je konstruirao Tokyo Skytree koristeći tehnike i komponente svog automatiziranog sustava izgradnje zgrada (ABCS) koji je prikazan na Slici 10. ABCS je razvijen od 1980-ih kako bi se do visokog stupnja automatizirala montaža na licu mjesta s automatiziranom logistikom, automatiziranim pozicioniranjem stupova i greda, automatiziranim zavarivanjem i kontrolom procesa u stvarnom vremenu. ABCS Super Construction Factory (SCF) nalazi se na vrhu konstrukcije i pomiče se prema gore s napretkom izgradnje. Središnji element SCF-a je paralelni sustav isporuke koji osigurava da se materijali isporučuju prema gore od tla na automatiziran način s jedne strane na desnom podu (okomiti PDS), a s druge strane na pravu poziciju. Kako ABCS prilagođava mnoge procese, potrebna je visoka preciznost konstrukcije od samog početka. Zbog toga se kontinuirano kontroliralo ispravno pozicioniranje svih sklopljenih građevinskih dijelova pomoću sustava laserskog skeniranja [7].



Slika 10.: Tokyo Skytree noću (Izvor: [9])

Vanjska struktura Tokyo Skytreea, poznata kao toranjska mreža, izgrađena je oko jezgre kao što je prikazano na Slici 11. Ova mreža sastoji se od čeličnih greda i stupova koji su povezani na način da formiraju trokutaste module. Trokutasti moduli su ključni za otpornost tornja na vjetrove i seizmičke sile, jer raspoređuju opterećenje ravnomjerno po cijeloj strukturi. Čelični elementi s najvećom standardnom čvrstoćom bili su čelični elementi od 630 MPa za bazu tornja pojačanja, koji su imali standardnu čvrstoću dvostruko veću od čelika koji se koristi u običnoj zgradi. Elementi s najvećim poprečnim presjekom bile su čelične cijevi promjera 2,3 m korištene u grebenima tornja na najnižoj razini, a maksimalna debljina čeličnih cijevi bila je 10 cm. Izgradnja vanjske strukture bila je jedan od najzahtjevnijih aspekata projekta. Svaki segment čelične mreže morao je biti precizno izrađen i postavljen. Timovi radnika radili su na velikim visinama, koristeći specijalizirane dizalice i skelu. Korištene su napredne metode zavarivanja kako bi se osigurala čvrstoća spojeva [9].



Slika 11.: Postavljanje čelične mreže oko jezgre (Izvor: [16])

2.3.2.4. Utjecaj Tokyo Skytreea

Tokyo Skytree je službeno otvoren 22. svibnja 2012. godine. Otvaranje je obilježeno svečanom ceremonijom kojoj su prisustvovali brojni uglednici i mediji. Od tada, toranj je postao jedna od najposjećenijih turističkih atrakcija u Japanu, privlačeći milijune posjetitelja svake godine [14].

Jedan od najimpresivnijih aspekata Tokyo Skytreea je upotreba naprednih tehničkih inovacija u izgradnji. Na primjer, sustav za amortizaciju seizmičkih valova (damping system) instaliran je unutar tornja, omogućujući mu da apsorbira i neutralizira energiju potresa. Ovaj sustav je ključan za održavanje stabilnosti tornja tijekom seizmičkih aktivnosti, što je od vitalne važnosti za sigurnost Tokija, jednog od najnaseljenijih gradova na svijetu [17].

Izgradnja Tokyo Skytreea imala je značajan ekonomski utjecaj na područje Sumida i šire. Procjenjuje se da je ukupna cijena projekta iznosila oko 65 milijardi jena. Toranj je postao magnet za turiste, privlačeći milijune posjetitelja svake godine, što je značajno povećalo prihode lokalne ekonomije [18].

Izgradnja Tokyo Skytreea predstavlja izvanredan primjer moderne inženjerske izvrsnosti, koja kombinira tehničku inovaciju, estetski dizajn i ekološku osviještenost. Koncipiranje, projektiranje i izgradnja ovog monumentalnog tornja zahtijevali su koordinaciju i suradnju između brojnih stručnjaka iz različitih područja, od arhitekture do ekologije. Unatoč brojnim izazovima, Tokyo Skytree je postao simbol modernog Japana i svjedočanstvo ljudske sposobnosti da se suoči s i prevlada inženjerske izazove.

3. KONCEPT KONSTRUKCIJE RADIOTELEVIZIJSKOG TORNJA SLJEME

3.1. Rekonstrukcija postojećeg tornja

Radiotelevizijski toranj Sljeme, ili skraćeno TV toranj Sljeme, smješten je na vrhu planine Medvednice, Sljemenu. Radovi na tornju započeli su 1973. godine, a dovršen je 1976., na obljetnicu 50 godina radija i 20 godina televizije. U vlasništvu je OiV-a i T-HT-a, koji preko tornja pružaju usluge stanovnicima Zagreba i šire okolice. OiV vrši uslugu odašiljanja radija i televizije, dok T-HT koristi toranj za telekomunikacijske usluge.

Tijekom Domovinskog rata, 16. rujna 1991., toranj je više puta napadnut od strane zrakoplovstva JNA, u namjeri da Zagreb ostane bez programa HTV-a. Toranj je gađan projektilima, pri čemu je oštećena HTV-ova oprema, što je izazvalo prekid emitiranja. Međutim, toranj je nakon toga popravljen i ponovno osposobljen za rad.

Toranj je ukupne visine 170 metara, s betonskim dijelom visokim 92 m i čeličnom antenom visokom 78 m. Betonski dio, kružnog tlocrta, sastoji se od tri segmenta različitih visina, s vanjskim promjerima od 6,9 m, 6,6 m i 6,5 m te debljinama stjenki od 0,65 m, 0,35 m i 0,25 m. Unutrašnjost tornja uključuje stubište, okna za veliko turističko i malo službeno dizalo, kao i za kablove i vodovod. Čelični dio tornja, koji započinje na koti +90,87 m, sastoji se od tri sekcije. Prva sekcija odozgo je duljine 14,40 m, vanjskog promjera 1,6 m, te se preko konične ljuske nastavlja na drugu sekciju, vanjskog promjera 1,15 m i duljine 20 m. Preko konične ljuske visine 1,75 m izvršen je prijelaz na treću sekciju, vanjskog promjera 2,30 m i visine 38,24 m.

Trup tornja je izgrađen od betona C 30/37 (MB 40) i armiran rebrastom armaturom RA 400/500. Ispod temelja, radijusa 20 m, postavljen podložni beton debljine 10 cm radi smanjenja naprezanja na tlo.

Na razini od 75 m nalazi se prostor predviđen za restoran, koji je bio nakratko otvoren 1983. godine te je ponovno otvoren 2023. za posjetitelje. Njegova prepoznatljivost doprinosi identitetu Zagreba, jer je toranj jedna od prvih građevina koje se vide pri ulasku u grad.

Strukturna analiza tornja provedena je prema DIN normama i europskim standardima, uključujući izračunavanje momenta savijanja prema teoriji drugog reda, proračun armature i opterećenja vjetrom te proračun na potres. Softverska analiza obavljena je u programskom paketu SOFiSTiK 2023.

3.2. Materijali

3.2.1. Beton

Razred betona: C 30/37 (MB 40)

Proračunska tlačna čvrstoća betona: $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_M} = \frac{30}{1,5} = 20,0 \frac{N}{mm^2} = 2,0 \frac{kN}{cm^2}$

Modul elastičnosti betona: $E_{cm} = 33000 \frac{N}{mm^2} = 3300 \frac{kN}{cm^2}$

3.2.2. Armaturni čelik

Kvaliteta čelika: RA 400/500

Proračunska granica popuštanja čelika:

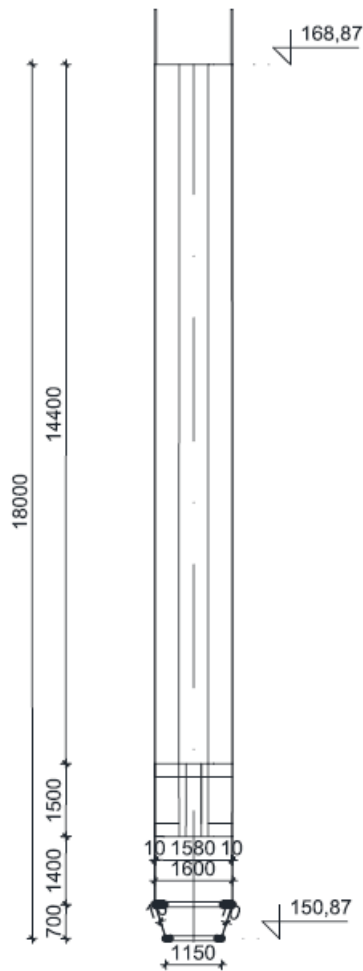
$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_S} = \frac{400}{1,15} = 347,83 \frac{N}{mm^2} = 34,783 \frac{kN}{cm^2}$$

Modul elastičnosti čelika: $E_S = 200000 \frac{N}{mm^2} = 20000 \frac{kN}{cm^2}$

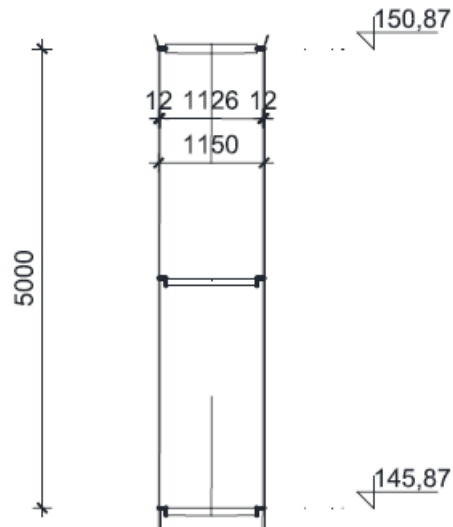
4. ANALIZA OPTEREĆENJA

4.1. Stalno opterećenje

- Težina čelične antene

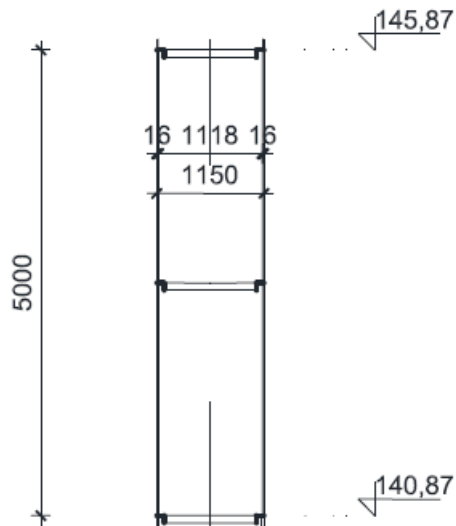


$$\begin{aligned}
 G_{k,ant,1} &= \gamma_s \cdot h_{ant} \cdot A_{ant} = \gamma_s \cdot h_{ant} \cdot \frac{\pi \cdot (d_{e,ant}^2 - d_{i,ant}^2)}{4} \\
 &= 78,5 \cdot 17,3 \cdot \frac{\pi \cdot (1,6^2 - 1,58^2)}{4} + 78,5 \cdot 0,7 \cdot \frac{(1,6^2 - 1,58^2) + (1,15^2 - 1,13^2)}{2} \cdot \frac{\pi}{4} \\
 &= 70,19 \text{ kN}
 \end{aligned}$$



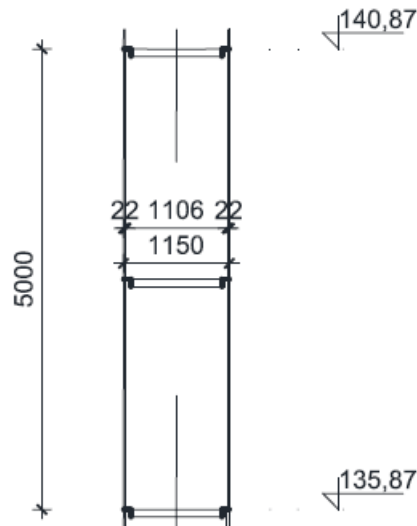
$$G_{k,ant,2} = \gamma_s \cdot h_{ant} \cdot A_{ant} = \gamma_s \cdot h_{ant} \cdot \frac{\pi \cdot (d_{e,ant}^2 - d_{i,ant}^2)}{4}$$

$$= 78,5 \cdot 5,0 \cdot \frac{\pi \cdot (1,15^2 - 1,126^2)}{4} = 16,84 \text{ kN}$$



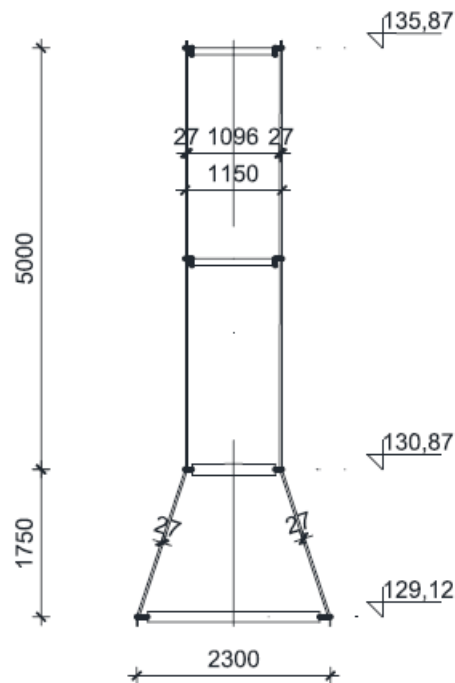
$$G_{k,ant,3} = \gamma_s \cdot h_{ant} \cdot A_{ant} = \gamma_s \cdot h_{ant} \cdot \frac{\pi \cdot (d_{e,ant}^2 - d_{i,ant}^2)}{4}$$

$$= 78,5 \cdot 5,0 \cdot \frac{\pi \cdot (1,15^2 - 1,118^2)}{4} = 22,37 \text{ kN}$$



$$G_{k,ant,4} = \gamma_s \cdot h_{ant} \cdot A_{ant} = \gamma_s \cdot h_{ant} \cdot \frac{\pi \cdot (d_{e,ant}^2 - d_{i,ant}^2)}{4}$$

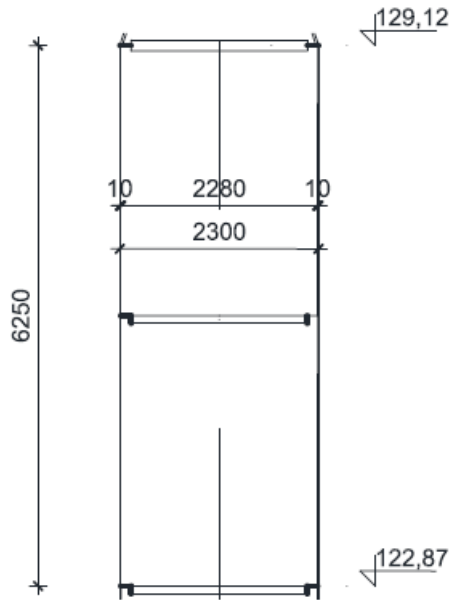
$$= 78,5 \cdot 5,0 \cdot \frac{\pi \cdot (1,15^2 - 1,106^2)}{4} = 30,60 \text{ kN}$$



$$G_{k,ant,5} = \gamma_s \cdot h_{ant} \cdot A_{ant} = \gamma_s \cdot h_{ant} \cdot \frac{\pi \cdot (d_{e,ant}^2 - d_{i,ant}^2)}{4}$$

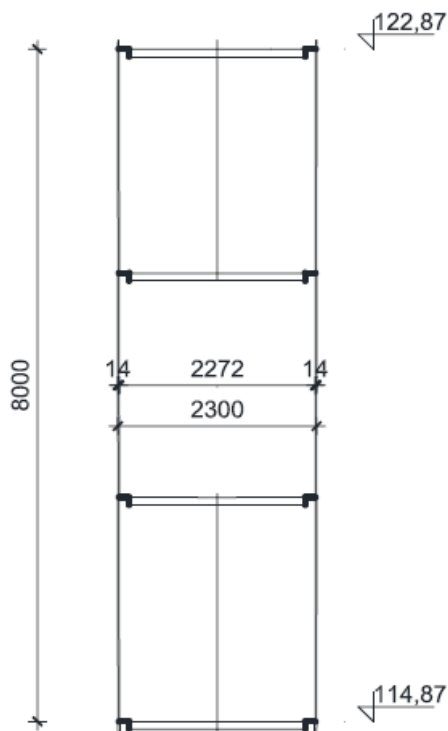
$$= 78,5 \cdot 5,0 \cdot \frac{\pi \cdot (1,15^2 - 1,096^2)}{4} + 78,5 \cdot 1,75 \cdot \frac{(1,15^2 - 1,096^2) + (2,3^2 - 2,246^2)}{2} \cdot \frac{\pi}{4}$$

$$= 57,17 \text{ kN}$$



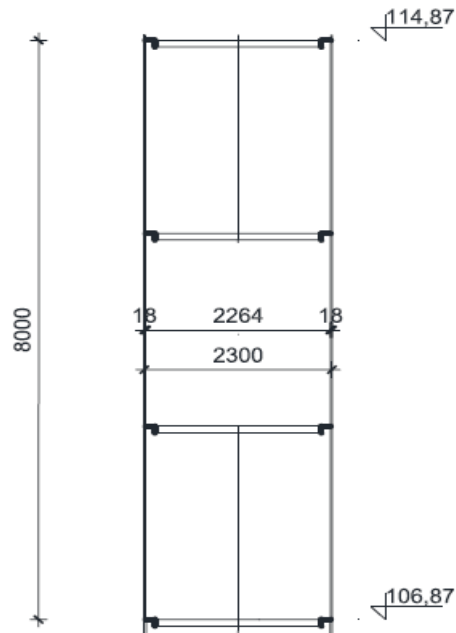
$$G_{k,ant,6} = \gamma_s \cdot h_{ant} \cdot A_{ant} = \gamma_s \cdot h_{ant} \cdot \frac{\pi \cdot (d_{e,ant}^2 - d_{i,ant}^2)}{4}$$

$$= 78,5 \cdot 6,25 \cdot \frac{\pi \cdot (2,3^2 - 2,28^2)}{4} = 35,30 \text{ kN}$$



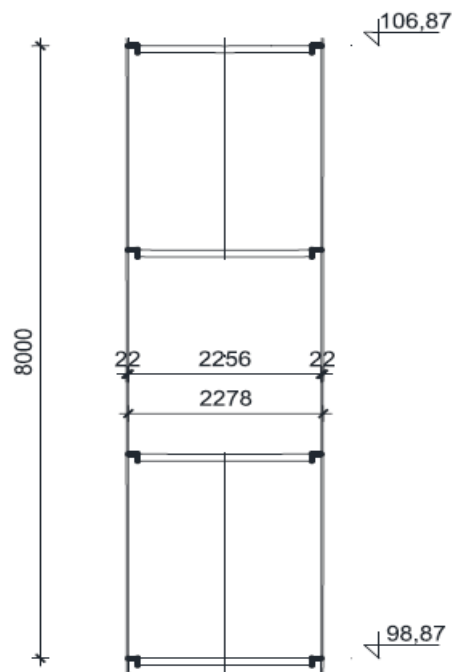
$$G_{k,ant,7} = \gamma_s \cdot h_{ant} \cdot A_{ant} = \gamma_s \cdot h_{ant} \cdot \frac{\pi \cdot (d_{e,ant}^2 - d_{i,ant}^2)}{4}$$

$$= 78,5 \cdot 8,0 \cdot \frac{\pi \cdot (2,3^2 - 2,272^2)}{4} = 63,14 \text{ kN}$$



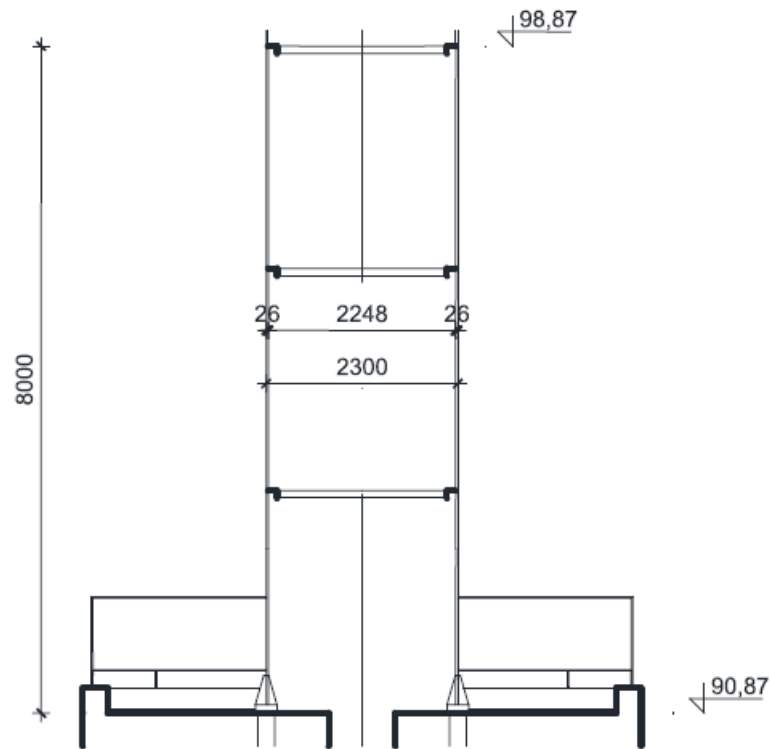
$$G_{k,ant,8} = \gamma_s \cdot h_{ant} \cdot A_{ant} = \gamma_s \cdot h_{ant} \cdot \frac{\pi \cdot (d_{e,ant}^2 - d_{i,ant}^2)}{4}$$

$$= 78,5 \cdot 8,0 \cdot \frac{\pi \cdot (2,3^2 - 2,264^2)}{4} = 81,04 \text{ kN}$$



$$G_{k,ant,9} = \gamma_s \cdot h_{ant} \cdot A_{ant} = \gamma_s \cdot h_{ant} \cdot \frac{\pi \cdot (d_{e,ant}^2 - d_{i,ant}^2)}{4}$$

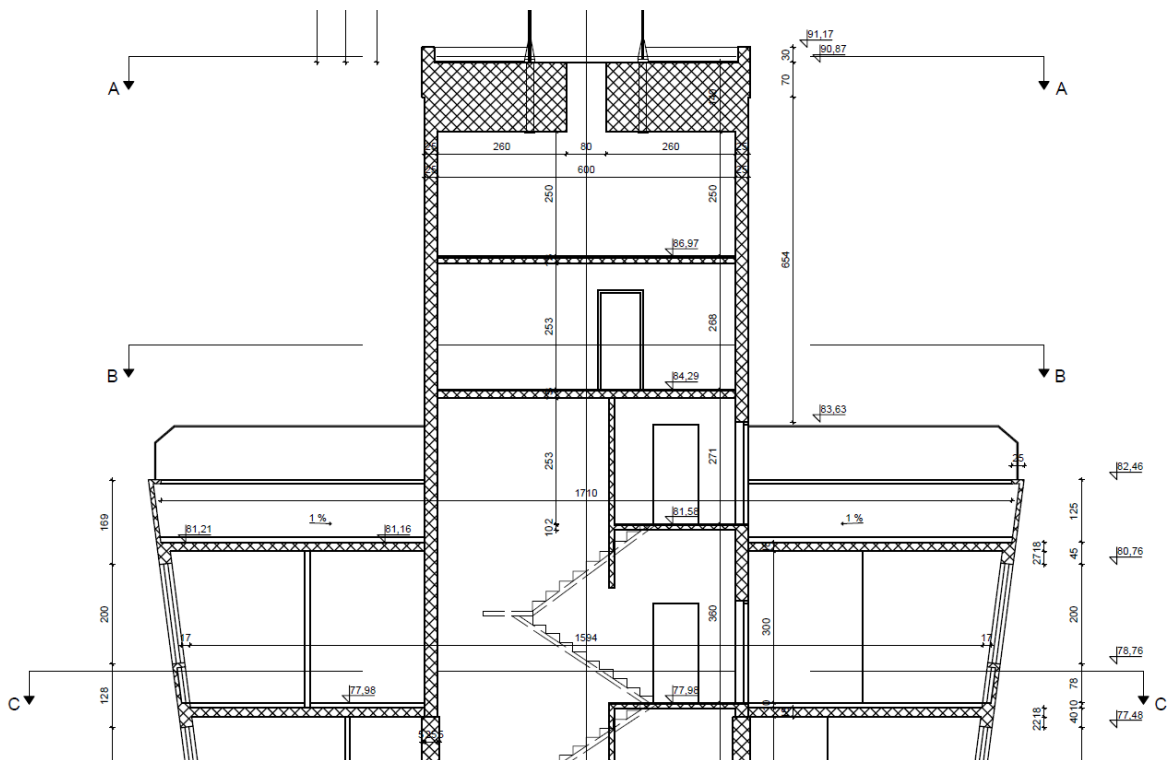
$$= 78,5 \cdot 8,0 \cdot \frac{\pi \cdot (2,3^2 - 2,256^2)}{4} = 98,87 \text{ kN}$$



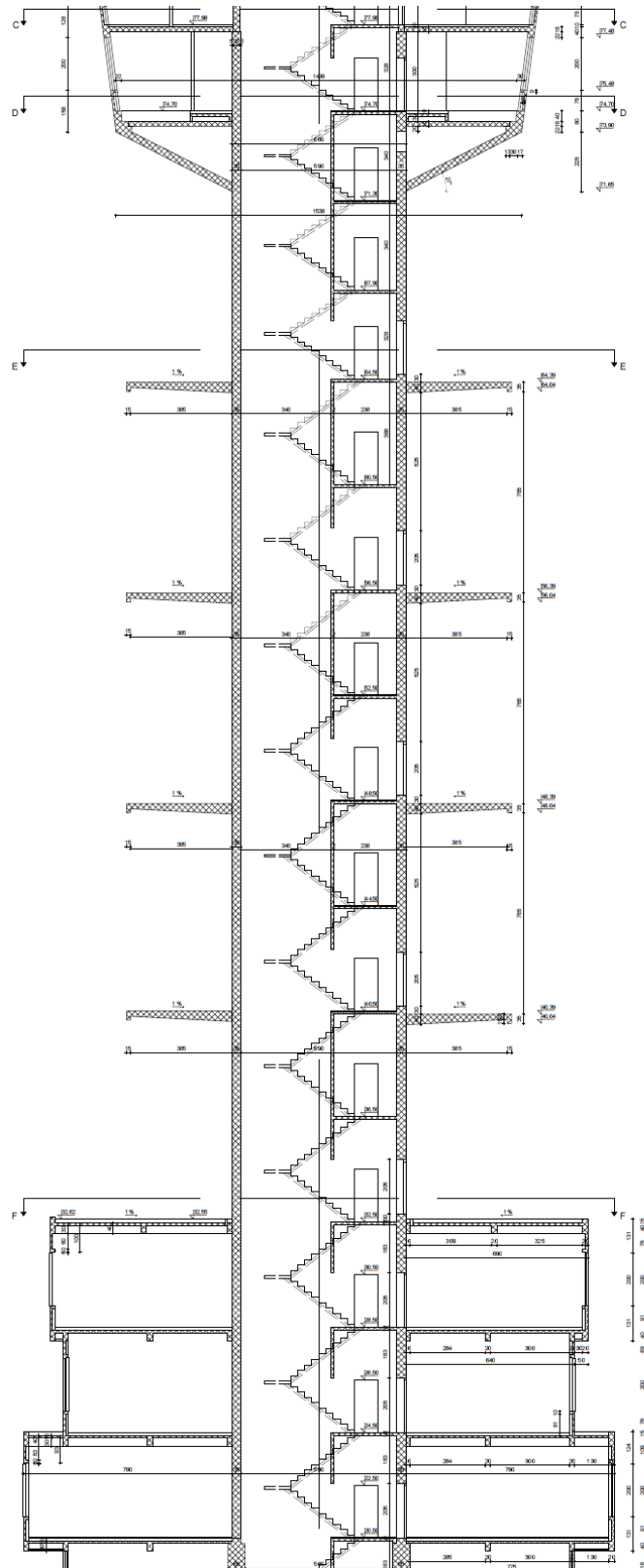
$$G_{k,ant,10} = \gamma_s \cdot h_{ant} \cdot A_{ant} = \gamma_s \cdot h_{ant} \cdot \frac{\pi \cdot (d_{e,ant}^2 - d_{i,ant}^2)}{4}$$

$$= 78,5 \cdot 8,0 \cdot \frac{\pi \cdot (2,3^2 - 2,248^2)}{4} = 116,65 \text{ kN}$$

- Vlastita težina tornja

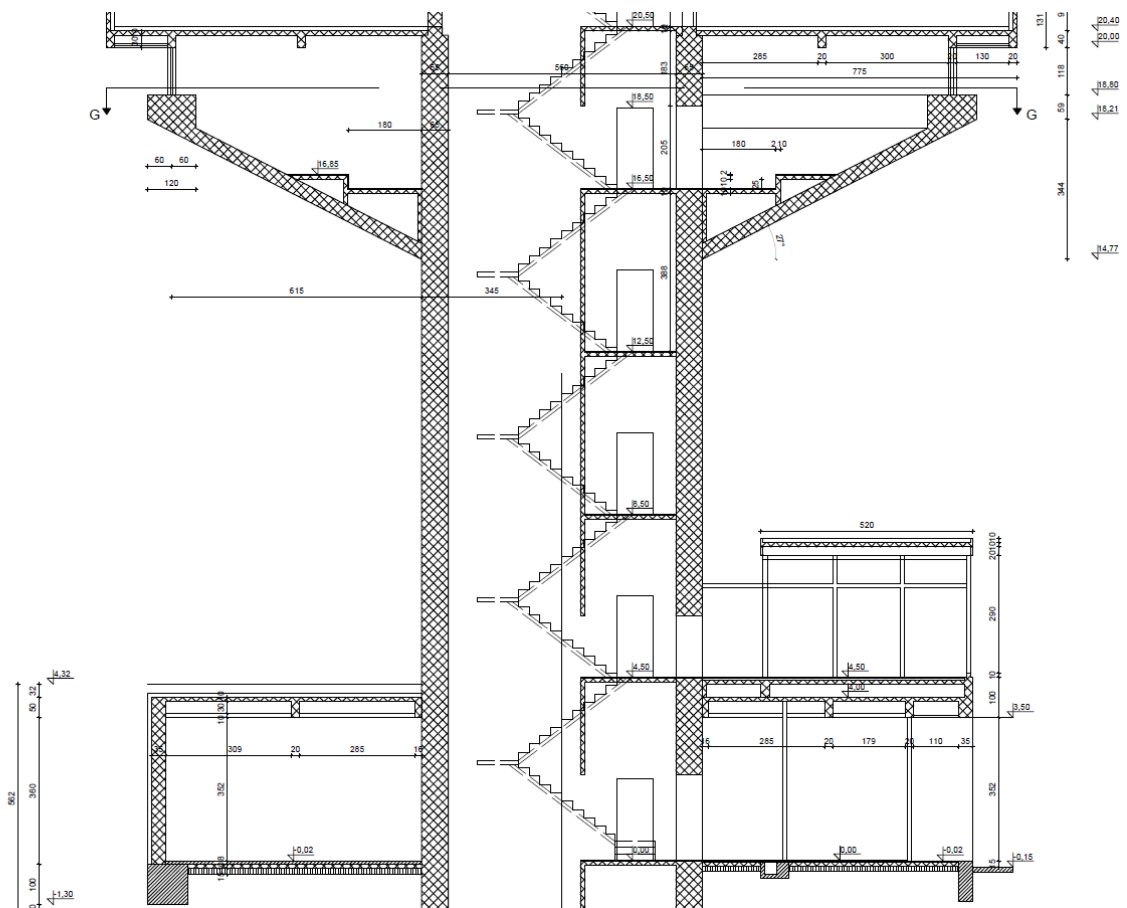


$$\begin{aligned}
 G_{k,t,1} &= \gamma_c \cdot h_t \cdot A_t = \gamma_c \cdot h_t \cdot \frac{\pi \cdot (d_{e,t}^2 - d_{i,t}^2)}{4} \\
 &= 25 \cdot 0,3 \cdot \frac{\pi \cdot (6,7^2 - 6,1^2)}{4} + 25 \cdot 0,7 \cdot \frac{\pi \cdot (6,7^2 - 0,8^2)}{4} + 25 \cdot 0,7 \cdot \frac{\pi \cdot (6,5^2 - 0,8^2)}{4} \\
 &\quad + 25 \cdot 0,12 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 6,0^2 + 25 \cdot 0,15 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 6,0^2 + 25 \cdot 11,77 \cdot \frac{\pi \cdot (6,5^2 - 6,0^2)}{4} \\
 &= 45,24 + 608,19 + 571,91 + 84,82 + 106,03 + 1444,40 = 2860,59 \text{ kN}
 \end{aligned}$$



$$G_{k,t,2} = \gamma_c \cdot h_t \cdot A_t = \gamma_c \cdot h_t \cdot \frac{\pi \cdot (d_{e,t}^2 - d_{i,t}^2)}{4}$$

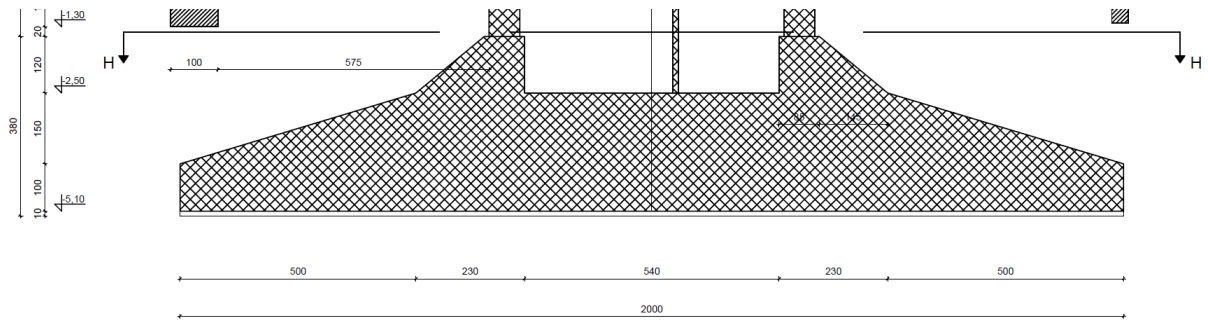
$$= 25 \cdot 57,4 \cdot \frac{\pi \cdot (6,6^2 - 5,9^2)}{4} - 25 \cdot 2,05 \cdot \frac{\pi \cdot (6,6^2 - 5,9^2)}{4} = 9509,45 \text{ kN}$$



$$G_{k,t,3} = \gamma_c \cdot h_t \cdot A_t = \gamma_c \cdot h_t \cdot \frac{\pi \cdot (d_{e,t}^2 - d_{i,t}^2)}{4} = 25 \cdot (20,3 + 1,3) \cdot \frac{\pi \cdot (6,9^2 - 5,6^2)}{4} = 6891,87 \text{ kN}$$

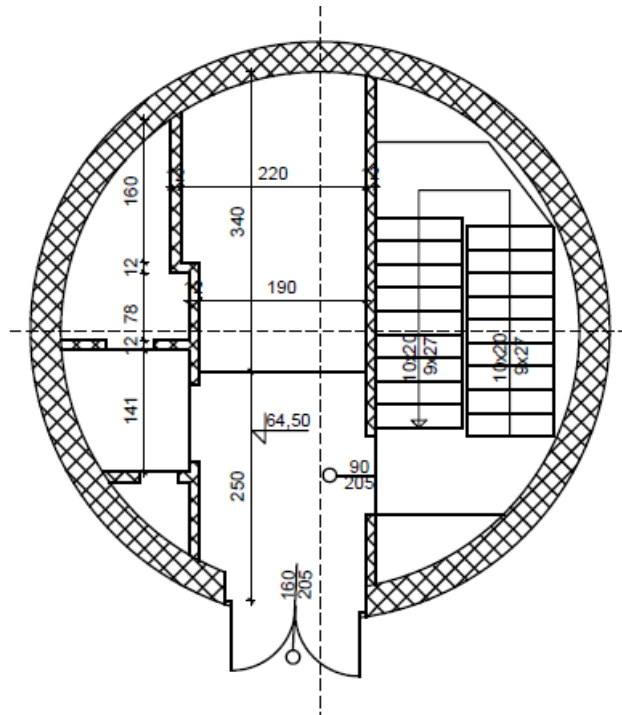
$$\begin{aligned}
G_{k,1,C} &= \gamma_c \cdot h_{pl,C} \cdot \frac{\pi \cdot (d_c^2 - d_{c,t}^2)}{4} \\
&= 25 \cdot 0,1 \cdot \frac{\pi \cdot (20^2 - 6,6^2)}{4} \cdot 2 + 25 \cdot 4,62 \cdot \frac{\pi \cdot (20,4^2 - 20^2)}{4} \cdot \frac{2}{3} + 25 \cdot 0,3 \\
&\cdot \frac{\pi \cdot (13,5^2 - 13,1^2)}{4} + 25 \cdot 0,3 \cdot \frac{\pi \cdot (6,92^2 - 6,6^2)}{4} \cdot 3 + 25 \cdot 0,3 \cdot \frac{\pi \cdot (13^2 - 12,6^2)}{4} \cdot 3 \\
&\quad + 25 \cdot 5,7 \cdot \frac{\pi \cdot (19,4^2 - 19^2)}{4} \cdot \frac{2}{3} + 25 \cdot 0,1 \cdot \frac{\pi \cdot (22^2 - 6,6^2)}{4} \cdot 2 + 25 \cdot 4,55 \\
&\cdot \frac{\pi \cdot (22,4^2 - 22^2)}{4} \cdot \frac{2}{3} + 25 \cdot 0,05 \cdot \frac{\pi \cdot (22^2 - 19,4^2)}{4} + 25 \cdot 0,1 \cdot \frac{\pi \cdot (13,3^2 - 6,9^2)}{4} + 25 \\
&\cdot 0,65 \cdot \frac{\pi \cdot (10,74^2 - 10,54^2)}{4} + 25 \cdot 1,2 \cdot \frac{\pi \cdot (7,1^2 - 6,9^2)}{4} + 25 \cdot 0,7 \cdot \frac{\pi \cdot (20,4^2 - 18^2)}{4} \\
&\quad + 25 \cdot 0,35 \cdot \frac{\pi \cdot (19,36^2 - 6,9^2)}{4} \\
&= 1399,74 + 977,29 + 62,67 + 76,45 + 180,96 + 1146,05 + 1729,60 + 1057,77 \\
&\quad + 105,68 + 253,84 + 54,32 + 65,97 + 1266,69 + 2248,59 = 10625,62 \text{ kN}
\end{aligned}$$

- Vlastita težina temelja



$$\begin{aligned}
G_{k,tem} &= \gamma_c \cdot h_{tem} \cdot A_{tem} \\
&= 25 \cdot 1,75 \cdot \frac{\pi \cdot (20^2 - 10^2)}{4} + 25 \cdot 2,5 \cdot \frac{\pi \cdot 5,4^2}{4} + 25 \cdot 1,2 \cdot \frac{\pi \cdot (7,1^2 - 5,4^2)}{4} + 25 \cdot 0,6 \\
&\cdot \frac{\pi \cdot (10^2 - 7,1^2)}{4} = 10308,35 + 1431,39 + 500,69 + 584,22 = 12824,65 \text{ kN}
\end{aligned}$$

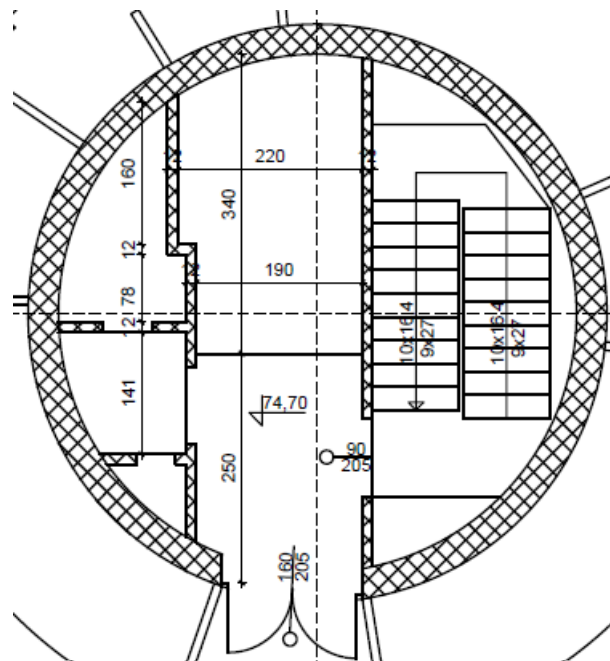
$$g_{k, \text{lifta}, 1} = \frac{G_{k, \text{lifta}, 1}}{h} = \frac{216,34}{6,41} = 33,75 \text{ kN/m}$$



$$G_{k, \text{lifta}, 2} = \gamma_c \cdot H_{\text{lifta}} \cdot A_{\text{lifta}} = 25 \cdot (77,7 - 20,3) \cdot 1,33 = 25 \cdot 57,4 \cdot 1,33$$

$$= 1908,55 \text{ kN}$$

$$g_{k, \text{lifta}, 2} = \frac{G_{k, \text{lifta}, 2}}{h} = \frac{1908,55}{57,4} = 33,25 \text{ kN/m}$$



$$\begin{aligned}
 G_{k, \text{lifta}, 3} &= \gamma_c \cdot H_{\text{lifta}} \cdot A_{\text{lifta}} = 25 \cdot (20,3 - (-2,5)) \cdot 1,23 = 25 \cdot 22,8 \cdot 1,23 \\
 &= 701,1 \text{ kN} \\
 g_{k, \text{lifta}, 3} &= \frac{G_{k, \text{lifta}, 3}}{h} = \frac{701,1}{22,8} = 30,75 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

4.2. Dodatno stalno opterećenje

- Dodatno stalno opterećenje na turističkoj platformi A

$$\begin{aligned}
 G_{k, 2, A} &= g_{k, \text{dod}} \cdot \pi \cdot A_A \\
 &= 2,5 \cdot \pi \cdot \frac{(17,5^2 - 6,5^2)}{4} + 2,5 \cdot \pi \cdot \frac{(16,44^2 - 6,5^2)}{4} + 2,5 \cdot \pi \cdot \frac{(15,6^2 - 6,6^2)}{4} \\
 &= 1358,39 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

- Dodatno stalno opterećenje na platformi za antene B

$$G_{k, 2, B} = g_{k, \text{dod}} \cdot \pi \cdot A_B = 2,5 \cdot \pi \cdot \frac{(14,6^2 - 6,6^2)}{4} = 333,01 \text{ kN}$$

- Dodatno stalno opterećenje na pogonskoj platformi C

$$\begin{aligned}
 G_{k, 2, C} &= 2 \cdot g_{k, \text{dod}} \cdot \pi \cdot A_C = 2 \cdot 2,5 \cdot \pi \cdot \frac{(20,4^2 - 6,6^2)}{4} + 2 \cdot 2,5 \cdot \pi \cdot \frac{(22,4^2 - 6,6^2)}{4} \\
 &= 3262,54 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

4.3. Korisno opterećenje

- Korisno opterećenje na turističkoj platformi A

$$\begin{aligned} Q_{k,A} &= q_k \cdot \pi \cdot A_A \\ &= 3,0 \cdot \pi \cdot \frac{(17,5^2 - 6,5^2)}{4} + 3,0 \cdot \pi \cdot \frac{(16,44^2 - 6,5^2)}{4} + 3,0 \cdot \pi \cdot \frac{(15,6^2 - 6,6^2)}{4} \\ &= 1630,07 \text{ kN} \end{aligned}$$

- Korisno opterećenje na platformi za antene B

$$Q_{k,B} = q_k \cdot \pi \cdot A_B = 3,0 \cdot \pi \cdot \frac{(14,6^2 - 6,6^2)}{4} = 399,61 \text{ kN}$$

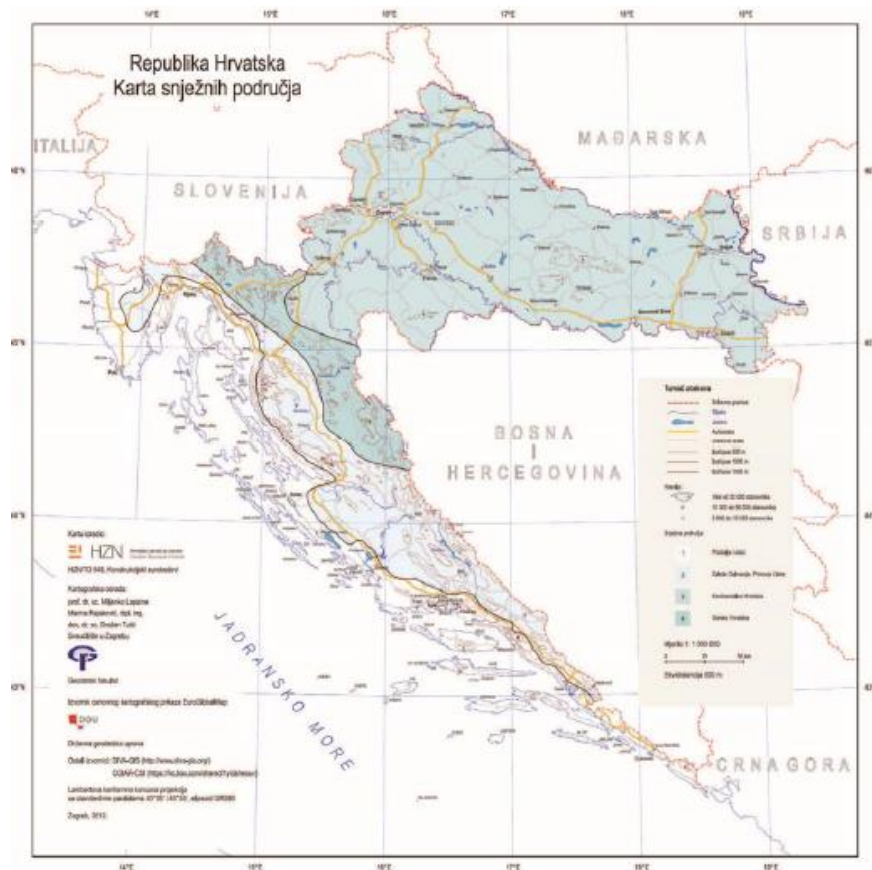
- Korisno opterećenje na pogonskoj platformi C

$$\begin{aligned} Q_{k,C} &= 2 \cdot q_k \cdot \pi \cdot A_C = 2 \cdot 3,0 \cdot \pi \cdot \frac{(20,4^2 - 6,6^2)}{4} + 2 \cdot 3,0 \cdot \pi \cdot \frac{(22,4^2 - 6,6^2)}{4} \\ &= 3915,05 \text{ kN} \end{aligned}$$

4.4. Opterećenje snijegom

Lokacija građevine: Zagreb → 1026 m.n.v.

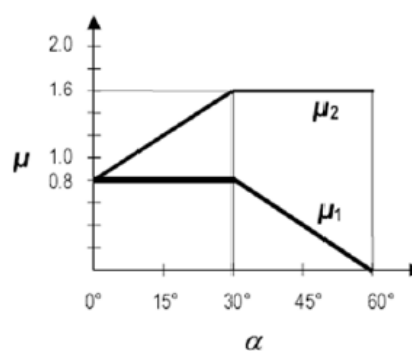
Visina tornja: H=168,87 m



Slika 12.: Karta opterećenja snijegom u Hrvatskoj (Izvor: [19])

Tablica 1.: Karakteristične vrijednosti opterećenja snijegom s_k na različitim nadmorskim visinama u pojedinim zonama (Izvor: [19])

Nadmorska visina do [m]	1. područje – priobalje i otoci [kN/m ²]	2. područje – zaleđe Dalmacije, Primorja i Istre [kN/m ²]	3. područje – kontinentalna Hrvatska [kN/m ²]	4. područje – gorska Hrvatska [kN/m ²]
100	0,50	0,75	1,00	1,25
200	0,50	0,75	1,25	1,50
300	0,50	0,75	1,50	1,75
400	0,50	1,00	1,75	2,00
500	0,50	1,25	2,00	2,50
600	0,50	1,50	2,25	3,00
700	0,50	2,00	2,50	3,50
800	0,50	2,50	2,75	4,00
900	1,00	3,00	3,00	4,50
1000	2,00	4,00	3,50	5,00
1100	3,00	5,00	4,00	5,50
1200	4,00	6,00	4,50	6,00
1300	5,00	7,00		7,00
1400	6,00	8,00		8,00
1500		9,00		9,00
1600		10,00		10,00
1700		11,00		11,00
1800		12,00		



Slika 13.: Koeficijenti oblika opterećenja od snijega (Izvor: [19])

Za zadanu lokaciju građevine prema **HRN ENV 1991-djelovanje** određene su sljedeće vrijednosti:

- zona: III
- karakteristično opterećenje snijegom na tlu: $s_k = 3,74 \text{ kN/m}^2$
- koef. oblika opterećenja snijegom na krovu: $\mu_i = 0,80$
- koef. izloženosti: $C_e = 1,00$
- temperaturni koef.: $C_t = 1,00$

Opterećenje snijegom na krov: $s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k$

$$s = 0,80 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 3,74 = 2,99 \text{ kN/m}^2$$

- Opterećenje snijegom na turističkoj platformi A

Promjer platforme A: 17,6 m

Promjer tornja u razini platforme A: 6,5 m

Površina platforme A:

$$A_A = \frac{(17,5^2 - 6,5^2)}{4} \cdot \pi = 210,1 \text{ m}^2$$

$$s_{k,A} = s \cdot A_A = 2,99 \cdot 210,1 = 628,2 \text{ kN}$$

- Opterećenje snijegom na platformi za antene B

Promjer platforme B: 14,6 m

Promjer tornja u razini platforme B: 6,6 m

Površina platforme B:

$$A_B = \frac{(14,6^2 - 6,6^2)}{4} \cdot \pi = 133,2 \text{ m}^2$$

$$s_{k,B} = s \cdot A_B = 2,99 \cdot 133,2 = 398,27 \text{ kN}$$

- Opterećenje snijegom na pogonskoj platformi C

Promjer platforme C: 22,4 m

Promjer tornja u razini platforme C: 6,6 m

Površina platforme C:

$$A_C = \frac{(22,4^2 - 6,6^2)}{4} \cdot \pi = 359,87 \text{ m}^2$$

$$s_{k,C} = s \cdot A_C = 2,99 \cdot 359,87 = 1076,01 \text{ kN}$$

4.5. Opterećenje vjetrom

4.5.1. Vjetar prema podacima o građevini iz postojeće dokumentacije

4.5.1.1. Određivanje ukupnog opterećenja od vjetra

Kako su u vrijeme projektiranja tornja naši propisi o vjetru bili prilično zastarjeli, naročito u odnosu prema visokim građevinama, odlučeno je da se pri proračunu betonskog dijela tornja koriste *“Richtlinien für Berechnung u. Bemessung hoher dünnwandiger Türme aus Stahlbeton”* (DDR), dok su za čelični dio korišteni propisi DIN 4131.

Prema tome, za toranj je usvojen statički dio pritiska sa $q_s = 0,7 \text{ kN/m}^2$ (70 kp/m²), a dinamički sa $q_p = 0,5 \text{ kN/m}^2$ (50 kp/m²). Proračun dinamičkog faktora izvršen je prema Rauschu, Schlaichu i poljskim propisima, pošto je prethodno izračunana vlastita frekvencija tornja po energetske metodi i po iterativnoj metodi “Stodole”. Dobivena je srednja vrijednost $\varphi_b = 1,5$. Za čelični dio tornja dinamički je faktor izračunan prema DIN 4131 i iznosi $\varphi_c = 1,55$. Koeficijenti oblika c_{fi} za gornju čeličnu sekciju I iznose 1,2, za sekcije II i III iznose 0,7, za pogonsku i turističku gondolu 0,71, za dio stupa sa zrcalnim antenama 1,5, a na ostatku betonskog dijela tornja iznose 1,0.

U nastavku ovog podpoglavlja se nastojalo rekonstruirati vjetrovno opterećenje koje je korišteno u proračunu tornja Sljeme prema raspoloživim podacima u članku iz Građevinar (GRAĐEVINAR 53 (2001) 6, 379-385).

Rezultirajuće opterećenje vjetrom po metru (visine) na poprečni presjek tornja:

$$w_i = c_{f,i} \cdot q_{i,uk} \cdot d_i = c_{f,i} \cdot (q_s + \varphi \cdot q_p) \cdot d_i$$

$$q_s = 0,7 \text{ kN/m}^2, \quad q_p = 0,5 \text{ kN/m}^2, \quad \varphi_b = 1,5 \quad \varphi_{\zeta} = 1,55$$

$$w_0 = c_{f,i} \cdot q_{0,uk} \cdot d_{a,t} = 1 \cdot 0,7 \cdot 6,90 = 4,83 \text{ kN/m}$$

$$w_{14,77,d} = w_0 = 4,83 \text{ kN/m}$$

$$w_{14,77,g} = c_{f,i} \cdot q_{0,uk} \cdot d_{a,t} = 0,71 \cdot 0,7 \cdot 6,90 = 3,429 \text{ kN/m}$$

$$w_{18,80,d} = c_{f,i} \cdot q_{18,80,uk} \cdot d_{a,t} = 0,71 \cdot 0,7 \cdot 20,40 = 10,139 \text{ kN/m}$$

$$w_{18,80,g} = c_{f,i} \cdot q_{18,80,uk} \cdot d_{a,t} = 0,71 \cdot 0,7 \cdot 19,40 = 9,642 \text{ kN/m}$$

$$w_{20,00,d} = w_{18,80,g} = 10,139 \text{ kN/m}$$

$$w_{20,00,g} = c_{f,i} \cdot q_{20,00,uk} \cdot d_{a,t} = 0,71 \cdot 0,7 \cdot 22,40 = 11,133 \text{ kN/m}$$

$$w_{20,87,d} = w_{20,00,g} = 11,133 \text{ kN/m}$$

$$w_{20,87,g} = c_{f,i} \cdot q_{20,87,uk} \cdot d_{a,t} = 0,71 \cdot (0,7 + 1,5 \cdot 0,5) \cdot 22,40 = 23,061 \text{ kN/m}$$

$$w_{24,55,d} = w_{20,87,g} = 23,061 \text{ kN/m}$$

$$w_{24,55,g} = c_{f,i} \cdot q_{24,55,uk} \cdot d_{a,t} = 0,71 \cdot (0,7 + 1,5 \cdot 0,5) \cdot 19,40 = 19,972 \text{ kN/m}$$

$$w_{28,00,d} = w_{24,55,g} = 19,972 \text{ kN/m}$$

$$w_{28,00,g} = c_{f,i} \cdot q_{28,00,uk} \cdot d_{a,t} = 0,71 \cdot (0,7 + 1,5 \cdot 0,5) \cdot 20,40 = 21,002 \text{ kN/m}$$

$$w_{32,62,d} = w_{28,00,g} = 21,002 \text{ kN/m}$$

$$w_{32,62,g} = c_{f,i} \cdot q_{32,62,uk} \cdot d_{a,t} = 1 \cdot (0,7 + 1,5 \cdot 0,5) \cdot 6,60 = 9,57 \text{ kN/m}$$

$$w_{39,95,d} = w_{32,62,g} = 9,57 \text{ kN/m}$$

$$w_{39,95,g} = c_{f,i} \cdot q_{39,95,uk} \cdot d_{a,t} = 1,5 \cdot (0,7 + 1,5 \cdot 0,5) \cdot 14,60 = 31,755 \text{ kN/m}$$

$$w_{40,39,d} = w_{39,95,g} = 31,755 \text{ kN/m}$$

$$w_{40,39,g} = c_{f,i} \cdot q_{40,39,uk} \cdot d_{a,t} = 1 \cdot (0,7 + 1,5 \cdot 0,5) \cdot 6,60 = 9,57 \text{ kN/m}$$

$$w_{47,95,d} = w_{40,39,g} = 9,57 \text{ kN/m}$$

$$w_{47,95,g} = c_{f,i} \cdot q_{47,95,uk} \cdot d_{a,t} = 1,5 \cdot (0,7 + 1,5 \cdot 0,5) \cdot 14,60 = 31,755 \text{ kN/m}$$

$$w_{48,39,d} = w_{47,95,g} = 31,755 \text{ kN/m}$$

$$w_{48,39,g} = c_{f,i} \cdot q_{48,39,uk} \cdot d_{a,t} = 1 \cdot (0,7 + 1,5 \cdot 0,5) \cdot 6,60 = 9,57 \text{ kN/m}$$

$$w_{55,2,d} = w_{48,39,g} = 9,57 \text{ kN/m}$$

$$w_{55,2,g} = c_{f,i} \cdot q_{55,2,uk} \cdot d_{a,t} = 1,5 \cdot (0,7 + 1,5 \cdot 0,5) \cdot 14,60 = 31,755 \text{ kN/m}$$

$$w_{56,39,d} = w_{55,2,g} = 31,755 \text{ kN/m}$$

$$w_{56,39,g} = c_{f,i} \cdot q_{56,39,uk} \cdot d_{a,t} = 1 \cdot (0,7 + 1,5 \cdot 0,5) \cdot 6,60 = 9,57 \text{ kN/m}$$

$$w_{63,95,d} = w_{56,39,g} = 9,57 \text{ kN/m}$$

$$w_{63,95,g} = c_{f,i} \cdot q_{63,95,uk} \cdot d_{a,t} = 1,5 \cdot (0,7 + 1,5 \cdot 0,5) \cdot 14,60 = 31,755 \text{ kN/m}$$

$$w_{64,39,d} = w_{63,95,g} = 31,755 \text{ kN/m}$$

$$w_{64,39,g} = c_{f,i} \cdot q_{64,39,uk} \cdot d_{a,t} = 1 \cdot (0,7 + 1,5 \cdot 0,5) \cdot 6,60 = 9,57 \text{ kN/m}$$

$$w_{71,65,d} = w_{64,39,g} = 9,57 \text{ kN/m}$$

$$w_{71,65,g} = c_{f,i} \cdot q_{71,65,uk} \cdot d_{a,t} = 0,71 \cdot (0,7 + 1,5 \cdot 0,5) \cdot 6,60 = 6,795 \text{ kN/m}$$

$$w_{73,90} = c_{f,i} \cdot q_{73,90,uk} \cdot d_{a,t} = 0,71 \cdot (0,7 + 1,5 \cdot 0,5) \cdot 15,38 = 15,834 \text{ kN/m}$$

$$w_{83,63,d} = c_{f,i} \cdot q_{83,63,uk} \cdot d_{a,t} = 0,71 \cdot (0,7 + 1,5 \cdot 0,5) \cdot 17,60 = 18,119 \text{ kN/m}$$

$$w_{83,63,g} = c_{f,i} \cdot q_{83,63,uk} \cdot d_{a,t} = 1 \cdot (0,7 + 1,5 \cdot 0,5) \cdot 6,50 = 9,425 \text{ kN/m}$$

$$w_{90,87,d} = w_{83,63,g} = 9,425 \text{ kN/m}$$

$$w_{90,87,g} = c_{f,i} \cdot q_{90,87,uk} \cdot d_{a,t} = 0,7 \cdot (0,7 + 1,55 \cdot 0,5) \cdot 2,30 = 2,375 \text{ kN/m}$$

$$w_{130,87,d} = w_{90,87,g} = 2,375 \text{ kN/m}$$

$$w_{130,87,g} = c_{f,i} \cdot q_{130,87,uk} \cdot d_{a,t} = 0,7 \cdot (0,7 + 1,55 \cdot 0,5) \cdot 1,15 = 1,187 \text{ kN/m}$$

$$w_{150,87,d} = w_{130,87,g} = 1,187 \text{ kN/m}$$

$$w_{150,87,g} = c_{f,i} \cdot q_{150,87,uk} \cdot d_{a,t} = 1,2 \cdot (0,7 + 1,55 \cdot 0,5) \cdot 1,6 = 2,832 \text{ kN/m}$$

$$w_{168,87} = w_{150,87,g} = 2,832 \text{ kN/m}$$

Rezultirajuće koncentrirano opterećenje vjetrom na poprečni presjek tornja:

$$W_i = c_{f,i} \cdot q_{i,uk} \cdot A_i = c_{f,i} \cdot (q_s + \varphi \cdot q_p) \cdot d_i \cdot h_i = w_i \cdot h_i$$

$$W_{0-14,77} = \frac{w_0 + w_{14,77,d}}{2} \cdot h_{0-14,77} = \frac{4,83 + 4,83}{2} \cdot 14,77 = 71,34 \text{ kN}$$

$$W_{14,77-18,80} = \frac{w_{14,77,g} + w_{18,80,d}}{2} \cdot h_{14,77-18,80} = \frac{3,429 + 10,139}{2} \cdot 4,03 = 27,34 \text{ kN}$$

$$W_{18,80-20,00} = \frac{w_{18,80,g} + w_{20,00,d}}{2} \cdot h_{18,80-20,00} = \frac{9,642 + 9,642}{2} \cdot 1,20 = 11,57 \text{ kN}$$

$$W_{20,00-20,87} = \frac{w_{20,00,g} + w_{20,87,d}}{2} \cdot h_{20,00-20,87} = \frac{11,133 + 11,133}{2} \cdot 0,87 = 9,69 \text{ kN}$$

$$W_{20,87-24,55} = \frac{w_{20,87,g} + w_{24,55,d}}{2} \cdot h_{20,87-24,55} = \frac{23,061 + 23,061}{2} \cdot 3,68 = 84,86 \text{ kN}$$

$$W_{24,55-28,00} = \frac{W_{24,55,g} + W_{28,00,d}}{2} \cdot h_{24,55-28,00} = \frac{19,972 + 19,972}{2} \cdot 3,55 = 70,90 \text{ kN}$$

$$W_{28,00-32,62} = \frac{W_{28,00,g} + W_{32,62,d}}{2} \cdot h_{28,00-32,62} = \frac{21,002 + 21,002}{2} \cdot 4,62 = 97,03 \text{ kN}$$

$$W_{32,62-39,95} = \frac{W_{32,62,g} + W_{39,95,d}}{2} \cdot h_{32,62-39,95} = \frac{9,57 + 9,57}{2} \cdot 7,33 = 70,15 \text{ kN}$$

$$W_{39,95-40,39} = \frac{W_{39,95,g} + W_{40,39,d}}{2} \cdot h_{39,95-40,39} = \frac{31,755 + 31,755}{2} \cdot 0,44 = 13,97 \text{ kN}$$

$$W_{40,39-47,95} = \frac{W_{40,39,g} + W_{47,95,d}}{2} \cdot h_{40,39-47,95} = \frac{9,57 + 9,57}{2} \cdot 7,56 = 72,35 \text{ kN}$$

$$W_{47,95-48,39} = \frac{W_{47,95,g} + W_{48,39,d}}{2} \cdot h_{47,95-48,39} = \frac{31,755 - 31,755}{2} \cdot 0,44 = 13,97 \text{ kN}$$

$$W_{48,39-55,2} = \frac{W_{48,39,g} + W_{55,2,d}}{2} \cdot h_{48,39-55,2} = \frac{9,57 + 9,57}{2} \cdot 7,56 = 72,35 \text{ kN}$$

$$W_{55,2-56,39} = \frac{W_{55,2,g} + W_{56,39,d}}{2} \cdot h_{55,2-56,39} = \frac{31,755 - 31,755}{2} \cdot 0,44 = 13,97 \text{ kN}$$

$$W_{56,39-63,95} = \frac{W_{56,39,g} + W_{63,95,d}}{2} \cdot h_{56,39-63,95} = \frac{9,57 + 9,57}{2} \cdot 7,56 = 72,35 \text{ kN}$$

$$W_{63,95-64,39} = \frac{W_{63,95,g} + W_{64,39,d}}{2} \cdot h_{63,95-64,39} = \frac{31,755 - 31,755}{2} \cdot 0,44 = 13,97 \text{ kN}$$

$$W_{64,39-71,65} = \frac{W_{64,39,g} + W_{71,65,d}}{2} \cdot h_{64,39-71,65} = \frac{9,57 + 9,57}{2} \cdot 7,26 = 69,48 \text{ kN}$$

$$W_{71,65-73,90} = \frac{W_{71,65,g} + W_{73,90,d}}{2} \cdot h_{71,65-73,90} = \frac{6,795 + 15,834}{2} \cdot 2,25 = 25,46 \text{ kN}$$

$$W_{73,90-83,63} = \frac{W_{73,90,g} + W_{83,63,d}}{2} \cdot h_{73,90-83,63} = \frac{15,834 + 18,119}{2} \cdot 9,73 = 165,18 \text{ kN}$$

$$W_{83,63-90,87} = \frac{W_{83,63,g} + W_{90,87,d}}{2} \cdot h_{83,63-90,87} = \frac{9,425 + 9,425}{2} \cdot 7,24 = 68,24 \text{ kN}$$

$$W_{90,87-130,87} = \frac{W_{90,87,g} + W_{130,87,d}}{2} \cdot h_{90,87-130,87} = \frac{2,375 + 2,375}{2} \cdot 40,0 = 95,0 \text{ kN}$$

$$W_{130,87-150,87} = \frac{W_{130,87,g} + W_{150,87,d}}{2} \cdot h_{130,87-150,87} = \frac{1,187 + 1,187}{2} \cdot 20,0 = 23,74 \text{ kN}$$

$$W_{150,87-168,87} = \frac{W_{150,87,g} + W_{168,87,d}}{2} \cdot h_{150,87-168,87} = \frac{2,832 + 2,832}{2} \cdot 18,0 = 50,98 \text{ kN}$$

Rezultati proračuna pokazuju kako različiti dijelovi tornja preuzimaju opterećenje vjetrom ovisno o obliku, visini i dijelu konstrukcije (betonski ili čelični dio). Formula za opterećenje vjetra po metru visine tornja koristi statičko opterećenje $q_s=0.7 \text{ kN/m}^2$ i dinamičko opterećenje $q_p=0.5 \text{ kN/m}^2$ s odgovarajućim dinamičkim faktorima za različite dijelove tornja. Opterećenje je proračunato za različite sekcije tornja pomoću koeficijenata oblika $c_{f,i}$, koji uzimaju u obzir kako vjetar djeluje na oblik tornja. Ovi koeficijenti variraju ovisno o dijelu tornja, npr. za čeličnu sekciju $c_{f,i}=1.2$, dok za betonske dijelove varira od 0.7 do 1.5. Za određenu visinu $h=20.87 \text{ m}$, rezultirajuće opterećenje iznosi 23.061 kN/m , dok je za visinu $h=47.95 \text{ m}$ opterećenje 31.755 kN/m . Ove vrijednosti pokazuju kako se opterećenje povećava s visinom zbog pojačanog djelovanja vjetra. Koncentrirano opterećenje vjetrom zbrajaju opterećenje vjetra po visinskim segmentima tornja kako bi se odredila ukupna sila koju vjetar djeluje na određenu sekciju. Na primjer, za segment od visine 0 m do 14.77 m, koncentrirano opterećenje je 71.34 kN . Za visinske intervale od 28 m do 32.62 m, opterećenje je 97.03 kN . Veće koncentrirane vrijednosti znače da su određeni dijelovi tornja izloženi većim opterećenjima zbog svoje geometrije i visine. Ukupno gledano, opterećenje vjetrom raste kako se ide prema vrhu tornja, što je logično jer je vjetar obično snažniji na višim nadmorskim visinama i oblik tornja (posebno njegov čelični dio) utječe na koncentraciju opterećenja.

4.5.2. Vjetar prema njemačkim normama DIN

4.5.2.1. Određivanje vjetrovne zone i djelovanja vjetra

Od Republičkog hidrometeorološkog zavoda SR Hrvatske dobiveni su podaci o vjetru na Sljemenu, tj. ruža vjetrova i brzina koja iznosi 33 m u sekundi. Međutim, budući da anemografi nisu bili optimalno postavljeni, može se dogoditi da su stvarne najveće brzine vjetrova i znatno više.

Pritisak vjetra na tornjeve do 200 m visine računa se prema:

$$q_i = q_0 + q' \cdot z_i$$

te za vjetrovnu zonu 5 prema njemačkim normama vrijedi:

$$q_i = 1,80 + 0,004 \cdot z_i$$

Vjetrovna zona WZ	I	II	III	IV	V
v_{ref} [m/s]	22,5	25,0	27,5	30,0	32,5
vjetrovna zona 1:	$q_i = 0,80 + 0,003 \cdot z_i$ [kPa]				
vjetrovna zona 2:	$q_i = 1,05 + 0,003 \cdot z_i$ [kPa]				
vjetrovna zona 3:	$q_i = 1,25 + 0,004 \cdot z_i$ [kPa]				
vjetrovna zona 4:	$q_i = 1,50 + 0,005 \cdot z_i$ [kPa]				
vjetrovna zona 5:	$q_i = 1,80 + 0,004 \cdot z_i$ [kPa]				

Slika 14.: Vjetrovne zone prema njemačkim normama (Izvor: [3])

gdje je

q_0 – pritisak vjetra na površini terena [kPa]

z_i – visina poprečnog presjeka tornja iznad površine tla [m]

q_i – povećanje pritiska vjetra

Tablica 2.: Tlak vjetra na karakterističnim visinama

z [m]	h [m]	di [m]	q_i [kN/m ²]
0	0	6,9	1,800
14,77	14,77	6,9	1,859
18,8	4,03	20,4	1,875
20	1,2	19,4	1,880
20,87	0,87	22,4	1,883
24,55	3,68	22,4	1,898
28	3,45	19,4	1,912
32,62	4,62	20,4	1,930
39,95	7,33	6,6	1,960
40,39	0,44	14,6	1,962
47,95	7,56	6,6	1,992
48,39	0,44	14,6	1,994
55,2	6,81	6,6	2,021
56,39	1,19	14,6	2,026
63,95	7,56	6,6	2,056
64,39	0,44	14,6	2,058
71,65	7,26	6,6	2,087
73,9	2,25	15,38	2,096
83,63	9,73	17,6	2,135

90,87	7,24	6,7	2,163
130,87	40	2,3	2,323
150,87	20	1,15	2,403
168,87	18	1,6	2,475

4.5.2.2. Određivanje statičkog pritiska vjetra

Statički dio sile vjetra (pritisak) određen je kao srednja vrijednost deset minutne brzine vjetra:

$$q_{i,stat} = \left[0,40 + 0,2 \cdot \frac{z_i - 15}{185} \right] \cdot q_i \geq 0,40 \cdot q_i$$

Tablica 3.: Statički tlak vjetra na karakterističnim visinama

z [m]	h [m]	d _i [m]	q _i [kN/m ²]	q _{i,stat} [kN/m ²]
0	0	6,9	1,800	0,720
14,77	14,77	6,9	1,859	0,744
18,8	4,03	20,4	1,875	0,758
20	1,2	19,4	1,880	0,762
20,87	0,87	22,4	1,883	0,765
24,55	3,68	22,4	1,898	0,779
28	3,45	19,4	1,912	0,792
32,62	4,62	20,4	1,930	0,809
39,95	7,33	6,6	1,960	0,837
40,39	0,44	14,6	1,962	0,838
47,95	7,56	6,6	1,992	0,868
48,39	0,44	14,6	1,994	0,869
55,2	6,81	6,6	2,021	0,896
56,39	1,19	14,6	2,026	0,901
63,95	7,56	6,6	2,056	0,931
64,39	0,44	14,6	2,058	0,933
71,65	7,26	6,6	2,087	0,962
73,9	2,25	15,38	2,096	0,972
83,63	9,73	17,6	2,135	1,012
90,87	7,24	6,7	2,163	1,043
130,87	40	2,3	2,323	1,220
150,87	20	1,15	2,403	1,314
168,87	18	1,6	2,475	1,402

4.5.2.3. Određivanje dinamičkog pritiska vjetra

Osnovni period oscilacija prema DIN 4131 određuje se prema:

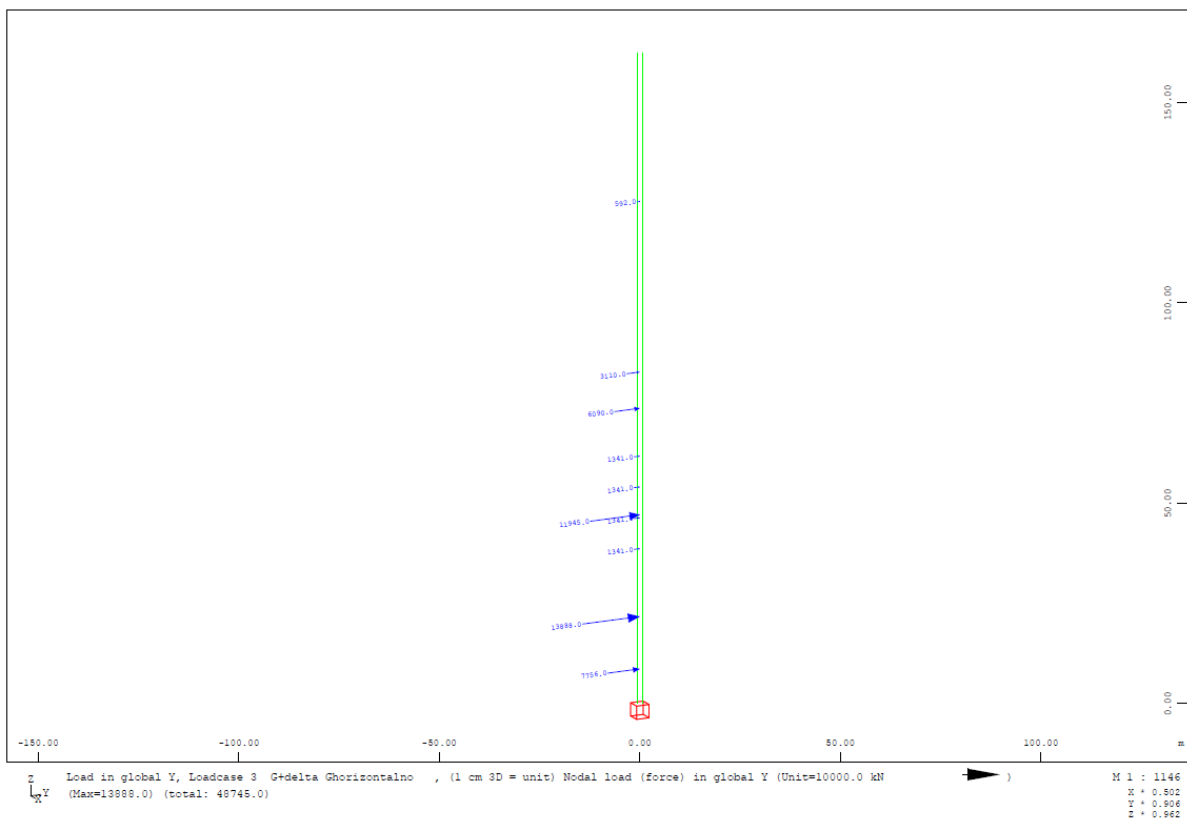
$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\sum_i G_i \cdot y_i^2}{g \cdot \sum_i G_i \cdot y_i}}$$

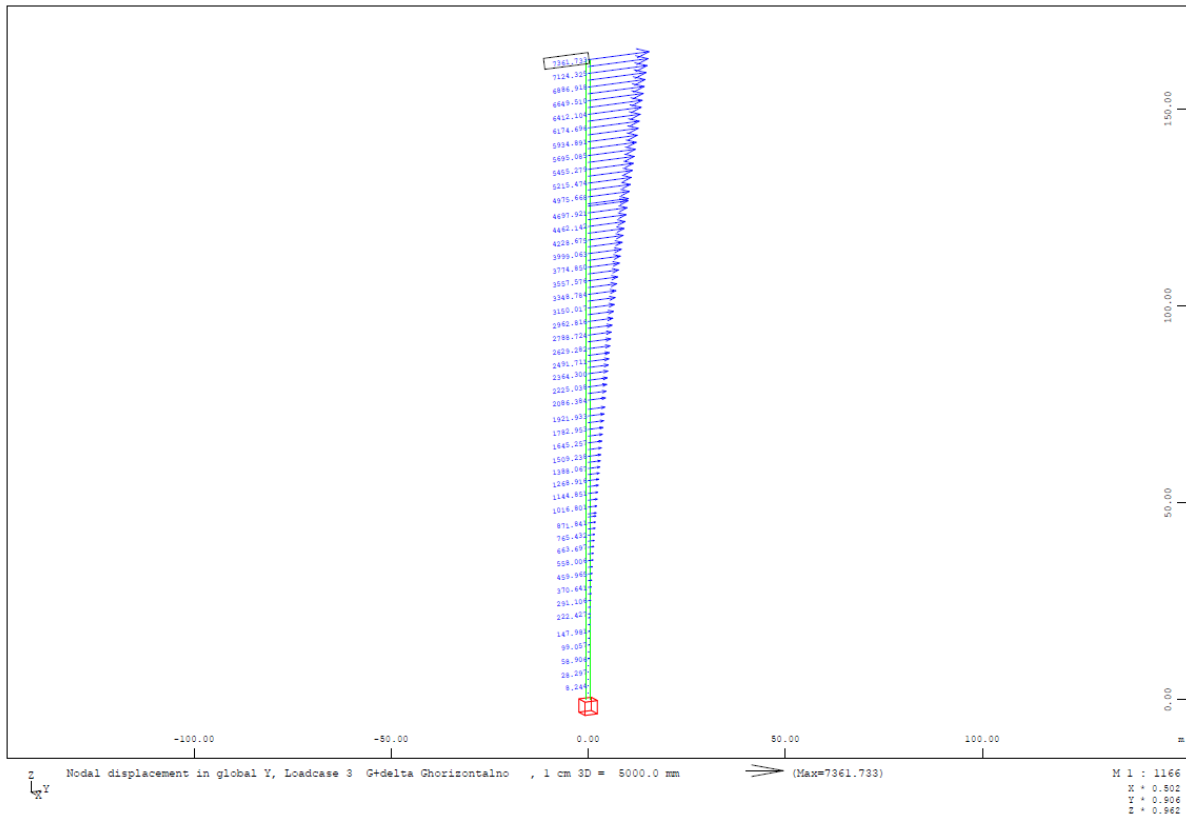
pri čemu je:

G_i - težina materijalne točke na tornju na udaljenosti z_i od temelja

y_i – pomak točke na udaljenosti z_i od temelja

Proračun je izvršen u računalnom programu *Sofistik* za model opterećen horizontalno težinama materijalnih točaka.





Slika 15.: Model tornja i rezultirajući horizontalni pomaci iz Sofistika

$$\begin{aligned}
 G_{ant} &= G_{k,ant,1} + G_{k,ant,2} + G_{k,ant,3} + G_{k,ant,4} + G_{k,ant,5} + G_{k,ant,6} + G_{k,ant,7} + G_{k,ant,8} \\
 &\quad + G_{k,ant,9} + G_{k,ant,10} \\
 &= 70,19 + 16,84 + 22,37 + 30,60 + 57,17 + 35,30 + 63,14 + 81,04 \\
 &\quad + 98,87 + 116,65 = 592,17 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$G_{(t+stub+lift)1} = G_{k,t,1} + G_{k,stub,1} + G_{k,lifta,1} = 2860,59 + 33,55 + 216,34 = 3110,48 \text{ kN}$$

$$G_A = G_{k,1,A} + G_{k,2,A} = 4731,28 + 1358,39 = 6089,67 \text{ kN}$$

$$G_B = G_{k,1,B} + G_{k,2,B} = 1007,54 + 333,01 = 1340,55 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
 G_{(t+stub+lift)2} &= G_{k,t,2} + G_{k,stub,2} + G_{k,lifta,2} = 9509,45 + 527,18 + 1908,55 \\
 &= 11945,18 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$G_C = G_{k,1,C} + G_{k,2,C} = 10625,62 + 3262,54 = 13888,16 \text{ kN}$$

$$G_{(t+stub+lift)3} = G_{k,t,3} + G_{k,stub,3} + G_{k,lifta,3} = 6891,87 + 163,25 + 701,1 = 7756,22 \text{ kN}$$

Osnovni period oscilacija:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{G_{ant} \cdot y_{ant}^2 + G_{(t+stub+lift)1} \cdot y_{t1}^2 + G_A \cdot y_A^2 + G_B \cdot y_{B1}^2 + G_B \cdot y_{B2}^2 + G_{(t+stub+lift)2} \cdot y_{t2}^2 + G_B \cdot y_{B3}^2 + G_B \cdot y_{B4}^2 + G_C \cdot y_C^2 + G_{(t+stub+lift)3} \cdot y_{t3}^2}{g \cdot [G_{ant} \cdot y_{ant} + G_{(t+stub+lift)1} \cdot y_{t1} + G_A \cdot y_A + G_B \cdot y_{B1} + G_B \cdot y_{B2} + G_{(t+stub+lift)2} \cdot y_{t2} + G_B \cdot y_{B3} + G_B \cdot y_{B4} + G_C \cdot y_C + G_{(t+stub+lift)3} \cdot y_{t3}]}}$$

$$G_{ant} = 592,17 \text{ kN}$$

$$y_{ant} = 4,82 \text{ m}$$

$$G_{(t+strib+lift)_1} = 3110,48 \text{ kN}$$

$$y_{t1} = 2,36 \text{ m}$$

$$G_A = 6089,67 \text{ kN}$$

$$y_A = 1,99 \text{ m}$$

$$G_B = 1340,55 \text{ kN}$$

$$y_{B1} = 1,51 \text{ m} \quad y_{B2} = 1,21 \text{ m}$$

$$y_{B3} = 0,93 \text{ m} \quad y_{B4} = 0,66 \text{ m}$$

$$G_{(t+strib+lift)_2} = 11945,18 \text{ kN}$$

$$y_{t2} = 0,95 \text{ m}$$

$$G_C = 13888,16 \text{ kN}$$

$$y_C = 0,22 \text{ m}$$

$$G_{(t+strib+lift)_3} = 7756,22 \text{ kN}$$

$$y_{t3} = 0,042 \text{ m}$$

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{73426,43}{420066,98}} = 2,63 \text{ s}$$

Provjera rezultata napravljena je modalnom analizom računalnim programom Sofistik.

Eigenfrequencies

Using Vectoriteration

Iterationsvectors

12

Iterations

24

Rayleighfactor A

0.00000

Rayleighfactor B

0.00000

Modal Damping

0.05000

No	LC	Eigenvalue [1/Sec2]	Relativ error	frequency [Hertz]	Period [sec]	modal damping
1	10001	7.23218E+00	2.46E-16	0.428	2.336390	0.05000
2	10002	7.23218E+00	6.14E-16	0.428	2.336390	0.05000
3	10003	1.71910E+01	8.27E-16	0.660	1.515408	0.05000
4	10004	1.71910E+01	2.07E-16	0.660	1.515407	0.05000
5	10005	1.13247E+02	0.00E+00	1.694	0.590427	0.05000
6	10006	1.13247E+02	3.76E-16	1.694	0.590427	0.05000
7	10007	4.05344E+02	2.80E-16	3.204	0.312081	0.05000
8	10008	4.05345E+02	2.80E-16	3.204	0.312081	0.05000
9	10009	1.04807E+03	4.18E-08	5.152	0.194082	0.05000
10	10010	1.04807E+03	4.46E-07	5.152	0.194081	0.05000
11		2.13302E+03	1.88E-04	7.351	0.136045	
12		2.19523E+03	4.19E-09	7.457	0.134103	

Slika 16.: Izlazni podaci programa Sofistik

Usporedbom rezultata možemo vidjeti da se periodi podudaraju (odstupanje je zanemarivo).
U daljnjem proračunu koristit će se period dobiven prema Sofistiku koji iznosi $T=2,34$ s.

Logaritamski dekrement prigušenja δ :

- za armirani beton i granično stanje uporabljivosti: $\delta = 0,04$

Osnovna vrijednost faktora udara vjetra:

$$\begin{aligned}\varphi_{B0} &= 1 + (0,042 \cdot T - 0,0018 \cdot T^2) \cdot \delta^{-0,63} \\ &= 1 + (0,042 \cdot 2,34 - 0,0018 \cdot 2,34^2) \cdot 0,04^{-0,63} \\ &= 1,67\end{aligned}$$

Popravni faktor koji ovisi o visini:

$$\begin{aligned}\eta &= 1,05 - \frac{H_t}{1000} \geq 1,0 \\ \eta &= 1,05 - \frac{168,87}{1000} = 0,881 < 1,0 \\ \eta &= 1,0\end{aligned}$$

Faktor udara vjetra φ_B prema DIN 1056:

$$\varphi_B = \varphi_{B0} \cdot \eta = 1,67 \cdot 1,0 = 1,67$$

Dinamički dio pritiska vjetra množi se faktorom udara vjetra:

- opterećenje se nanosi na posljednjih 70 m visine betonskog dijela tornja

$$q_{i,din} = \varphi_B \cdot (q_i - q_{i,stat})$$

Tablica 4.: Dinamički tlak vjetra na karakterističnim visinama

z [m]	h [m]	d _i [m]	q _i [kN/m ²]	q _{i,stat} [kN/m ²]	q _{i,din} [kN/m ²]
0	0	6,9	1,800	0,720	
14,77	14,77	6,9	1,859	0,744	
18,8	4,03	20,4	1,875	0,758	
18,8	4,03	19,4	1,875	0,758	
20	1,2	19,4	1,880	0,762	
20	1,2	22,4	1,880	0,762	
20,87	0,87	22,4	1,883	0,765	1,867
20,87	0,87	22,4	1,883	0,765	1,867
24,55	3,68	22,4	1,898	0,779	1,869
24,55	3,68	19,4	1,898	0,779	1,869
28	3,45	19,4	1,912	0,792	1,871
28	3,45	20,4	1,912	0,792	1,871
32,62	4,62	20,4	1,930	0,809	1,873
32,62	4,62	6,6	1,930	0,809	1,873
39,95	7,33	6,6	1,960	0,837	1,875
39,95	7,33	14,6	1,960	0,837	1,875
40,39	0,44	14,6	1,962	0,838	1,876
40,39	0,44	6,6	1,962	0,838	1,876
47,95	7,56	6,6	1,992	0,868	1,877
47,95	7,56	14,6	1,992	0,868	1,877
48,39	0,44	14,6	1,994	0,869	1,877
48,39	0,44	6,6	1,994	0,869	1,877
55,2	6,81	6,6	2,021	0,896	1,878
55,2	6,81	14,6	2,021	0,896	1,878
56,39	1,19	14,6	2,026	0,901	1,878
56,39	1,19	6,6	2,026	0,901	1,878
63,95	7,56	6,6	2,056	0,931	1,878
63,95	7,56	14,6	2,056	0,931	1,878
64,39	0,44	14,6	2,058	0,933	1,878
64,39	0,44	6,6	2,058	0,933	1,878
71,65	7,26	6,6	2,087	0,962	1,877
73,9	2,25	15,38	2,096	0,972	1,877
83,63	9,73	17,6	2,135	1,012	1,874
83,63	9,73	6,7	2,135	1,012	1,874
90,87	7,24	6,7	2,163	1,043	1,871
90,87	7,24	2,3	2,163	1,043	1,871
130,87	40	2,3	2,323	1,220	
130,87	40	1,15	2,323	1,220	
150,87	20	1,15	2,403	1,314	
150,87	20	1,6	2,403	1,314	
168,87	18	1,6	2,475	1,402	

4.5.2.4. Određivanje ukupnog opterećenja od vjetra

$$q_{i,uk} = q_{i,stat} + q_{i,din}$$

Tablica 5.: Ukupan tlak vjetra na karakterističnim visinama

z [m]	h [m]	di [m]	qi [kN/m ²]	qi,stat [kN/m ²]	qi,din [kN/m ²]	qi,uk [kN/m ²]
0	0	6,9	1,800	0,720		0,720
14,77	14,77	6,9	1,859	0,744		0,744
18,8	4,03	20,4	1,875	0,758		0,758
18,8	4,03	19,4	1,875	0,758		0,758
20	1,2	19,4	1,880	0,762		0,762
20	1,2	22,4	1,880	0,762		0,762
20,87	0,87	22,4	1,883	0,765	1,867	2,633
20,87	0,87	22,4	1,883	0,765	1,867	2,633
24,55	3,68	22,4	1,898	0,779	1,869	2,648
24,55	3,68	19,4	1,898	0,779	1,869	2,648
28	3,45	19,4	1,912	0,792	1,871	2,663
28	3,45	20,4	1,912	0,792	1,871	2,663
32,62	4,62	20,4	1,930	0,809	1,873	2,682
32,62	4,62	6,6	1,930	0,809	1,873	2,682
39,95	7,33	6,6	1,960	0,837	1,875	2,712
39,95	7,33	14,6	1,960	0,837	1,875	2,712
40,39	0,44	14,6	1,962	0,838	1,876	2,714
40,39	0,44	6,6	1,962	0,838	1,876	2,714
47,95	7,56	6,6	1,992	0,868	1,877	2,745
47,95	7,56	14,6	1,992	0,868	1,877	2,745
48,39	0,44	14,6	1,994	0,869	1,877	2,747
48,39	0,44	6,6	1,994	0,869	1,877	2,747
55,2	6,81	6,6	2,021	0,896	1,878	2,774
55,2	6,81	14,6	2,021	0,896	1,878	2,774
56,39	1,19	14,6	2,026	0,901	1,878	2,779
56,39	1,19	6,6	2,026	0,901	1,878	2,779
63,95	7,56	6,6	2,056	0,931	1,878	2,809
63,95	7,56	14,6	2,056	0,931	1,878	2,809
64,39	0,44	14,6	2,058	0,933	1,878	2,811
64,39	0,44	6,6	2,058	0,933	1,878	2,811
71,65	7,26	6,6	2,087	0,962	1,877	2,840
73,9	2,25	15,38	2,096	0,972	1,877	2,849
83,63	9,73	17,6	2,135	1,012	1,874	2,886
83,63	9,73	6,7	2,135	1,012	1,874	2,886
90,87	7,24	6,7	2,163	1,043	1,871	2,914
90,87	7,24	2,3	2,163	1,043	1,871	2,914
130,87	40	2,3	2,323	1,220		1,220
130,87	40	1,15	2,323	1,220		1,220
150,87	20	1,15	2,403	1,314		1,314

150,87	20	1,6	2,403	1,314		1,314
168,87	18	1,6	2,475	1,402		1,402

Faktor umanjenja:

$$\psi = 0,65 + 0,0035 \cdot \frac{h}{d}$$

pri čemu je:

h – visina betonskog dijela tornja

d – vanjski promjer na polovici visine

$$\psi = 0,65 + 0,0035 \cdot \frac{90,87}{6,6} = 0,698$$

Osnovna vrijednost za kružni armiranobetonski poprečni presjek:

$$c_{f0,i} = 0,95$$

Aerodinamički faktor prema DIN 1056, A. 1.3. :

$$c_{f,i} = \psi \cdot c_{f0,i}$$

$$c_{f,i} = 0,698 \cdot 0,95 = 0,663$$

Pripadna površina na odsječku i :

$$A_i = d_{A,i} \cdot \Delta h_i$$

Rezultirajuće opterećenje vjetrom po metru (visine) na poprečni presjek tornja:

$$w_i = c_{f,i} \cdot \varphi_B \cdot q_i \cdot d_i = c_{f,i} \cdot q_{i,uk} \cdot d_i$$

Rezultirajuće koncentrirano opterećenje vjetrom na poprečni presjek tornja:

$$W_i = c_{f,i} \cdot \varphi_B \cdot q_i \cdot A_i = c_{f,i} \cdot q_{i,uk} \cdot A_i$$

Tablica 6.: Opterećenje vjetra prema DIN-u na karakterističnim visinama

z [m]	h [m]	d _i [m]	q _i [kN/m ²]	q _{i,stat} [kN/m ²]	q _{i,din} [kN/m ²]	q _{i,uk} [kN/m ²]	w _i [kN/m]	W _i [kN]
0	0	6,9	1,800	0,720		0,720	3,294	0,00
14,77	14,77	6,9	1,859	0,744		0,744	3,402	49,45
18,8	4,03	20,4	1,875	0,758		0,758	10,249	27,38
18,8	4,03	19,4	1,875	0,758		0,758	9,747	
20	1,2	19,4	1,880	0,762		0,762	9,803	11,73
20	1,2	22,4	1,880	0,762		0,762	11,319	
20,87	0,87	22,4	1,883	0,765	1,867	2,633	39,098	21,93
20,87	0,87	22,4	1,883	0,765	1,867	2,633	39,098	
24,55	3,68	22,4	1,898	0,779	1,869	2,648	39,328	144,30
24,55	3,68	19,4	1,898	0,779	1,869	2,648	34,061	
28	3,45	19,4	1,912	0,792	1,871	2,663	34,247	117,83
28	3,45	20,4	1,912	0,792	1,871	2,663	36,012	
32,62	4,62	20,4	1,930	0,809	1,873	2,682	36,273	166,98
32,62	4,62	6,6	1,930	0,809	1,873	2,682	11,735	
39,95	7,33	6,6	1,960	0,837	1,875	2,712	11,868	86,51
39,95	7,33	14,6	1,960	0,837	1,875	2,712	26,254	
40,39	0,44	14,6	1,962	0,838	1,876	2,714	26,271	11,56
40,39	0,44	6,6	1,962	0,838	1,876	2,714	11,876	
47,95	7,56	6,6	1,992	0,868	1,877	2,745	12,011	90,29
47,95	7,56	14,6	1,992	0,868	1,877	2,745	26,571	
48,39	0,44	14,6	1,994	0,869	1,877	2,747	26,588	11,69
48,39	0,44	6,6	1,994	0,869	1,877	2,747	12,019	
55,2	6,81	6,6	2,021	0,896	1,878	2,774	12,140	82,26
55,2	6,81	14,6	2,021	0,896	1,878	2,774	26,855	
56,39	1,19	14,6	2,026	0,901	1,878	2,779	26,901	31,98
56,39	1,19	6,6	2,026	0,901	1,878	2,779	12,161	
63,95	7,56	6,6	2,056	0,931	1,878	2,809	12,293	92,44
63,95	7,56	14,6	2,056	0,931	1,878	2,809	27,194	
64,39	0,44	14,6	2,058	0,933	1,878	2,811	27,211	11,97
64,39	0,44	6,6	2,058	0,933	1,878	2,811	12,301	
71,65	7,26	6,6	2,087	0,962	1,877	2,840	12,426	89,76
73,9	2,25	15,38	2,096	0,972	1,877	2,849	29,047	46,63
83,63	9,73	17,6	2,135	1,012	1,874	2,886	33,682	305,04
83,63	9,73	6,7	2,135	1,012	1,874	2,886	12,822	
90,87	7,24	6,7	2,163	1,043	1,871	2,914	12,946	93,28
90,87	7,24	2,3	2,163	1,043	1,871	2,914	4,444	
130,87	40	2,3	2,323	1,220		1,220	1,861	126,10
130,87	40	1,15	2,323	1,220		1,220	0,931	
150,87	20	1,15	2,403	1,314		1,314	1,002	19,33
150,87	20	1,6	2,403	1,314		1,314	1,394	
168,87	18	1,6	2,475	1,402		1,402	1,487	25,93

Glavni dijelovi proračuna prema DIN-u uključuju određivanje statičkog i dinamičkog pritiska vjetra, te ukupno opterećenje vjetra na toranj. Statički pritisak vjetra se računa kao srednja vrijednost brzine vjetra tokom deset minuta. U njemu z_i predstavlja visinu presjeka tornja iznad tla, a q_i pritisak vjetra. Statički pritisak vjetra opada sa visinom, ali za veće visine dolazi do povećanja. Dinamički pritisak se računa prema faktoru udara vjetra. Ovaj faktor se dobiva pomoću formule za oscilaciju tornja, gdje se računa osnovni period oscilacija. U proračunu se koristi i logaritamski dekrement prigušenja. Dinamički dio pritiska vjetra računa se množenjem osnovnog pritiska sa faktorom udara. Faktor udara φ_B izračunat je prema normama i iznosi 1,67 za ovaj slučaj. Ukupno opterećenje vjetra na toranj dobiva se zbrajanjem statičkog i dinamičkog pritiska. Na visinama iznad 20 metara, dinamički pritisak značajno doprinosi ukupnom opterećenju. U tablicama su prikazani rezultati za različite visine tornja, pri čemu se pritisak vjetra i opterećenje po metru visine povećavaju sa visinom. Najveći pritisci i opterećenja se javljaju na visinama većim od 25 metara, gdje ukupni tlak vjetra može doseći i više od 39,328 kN/m². Ovaj proračun je ključan za procjenu stabilnosti i sigurnosti tornja pod utjecajem vjetra, te omogućava precizno dimenzioniranje konstrukcije kako bi izdržala različite vremenske uvjete.

4.5.2.5. Osjetljivost na vibracije

Kritična brzina vjetra iznosi:

$$v_{crit} = \frac{d \cdot f}{S}$$

gdje je:

f – vlastita frekvencija konstrukcije

S – Strouhalov broj ($S=0,2$ za kružni cilindar)

d – vanjski promjer tornja u području odvajanja vrtloga

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{3,41} = 0,293 \text{ Hz}$$

$$v_{crit} = \frac{d \cdot f}{S} = \frac{6,6 \cdot 0,293}{0,2} = 9,67 \text{ m/s}$$

Reynoldsov broj:

$$R_e = \frac{d \cdot v_{crit}}{\nu} = \frac{6,6 \cdot 9,67}{1,5 \cdot 10^{-5}} = 4254800$$

gdje je ν kinematička viskoznost zraka koja iznosi $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

Sila pobude djeluje na duljini $L_j \leq 12 \cdot d$, mjereno od vrha tornja i računa se prema formuli:

$$\begin{aligned} p_{lat} &= c_{lat} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{crit}^2 \cdot d \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ &= 0,45 \cdot \frac{1,25}{2} \cdot 9,67^2 \cdot 6,6 \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ &= 173,58 \text{ N/m} \cdot \sin(\omega \cdot t) \end{aligned}$$

gdje je:

c_{lat} – koeficijent pobude koji iznosi $c_{lat} = 0,45$

ρ – gustoća zraka koja iznosi $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$

ω – kružna frekvencija koju računamo prema izrazu $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

Povećanje zbog rezonancije:

$$C = \frac{\pi}{\delta} = \frac{\pi}{0,04} = 78,54$$

Duljina na kojoj djeluje sila pobude:

$$L_j \leq 12 \cdot d = 12 \cdot 6,6 = 79,2 \text{ m}$$

Moment od vibracija na spoju tornja s temeljem:

$$\begin{aligned} M_\omega &= \pm C \cdot p_{lat} \cdot L_j \cdot \left(h_f - \frac{L_j}{2} \right) \\ &= \pm 78,54 \cdot 173,58 \cdot 10^{-3} \cdot 79,2 \cdot \left(90,87 - \frac{79,2}{2} \right) \\ &= \pm 55357,83 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Dokaz promjene naprezanja na spoju tornja s temeljem:

$$W = \frac{\pi}{64} \cdot \frac{6,9^4 - 5,6^4}{\frac{6,9}{2}} = 18,26 \text{ m}^3$$

Naprezanje u betonu:

$$\Delta\sigma_{c,\omega} = \frac{\pm 55,36}{18,26} = 3,03 \text{ MPa} < 20,0 \text{ MPa}$$

Naprezanje u armaturi:

$$\Delta\sigma_{s,\omega} = 4,79 \cdot \frac{200}{33} = 29,03 \text{ MPa} < 347,83 \text{ MPa}$$

Zaključak: Naprezanja u betonu i armaturi manja su od dozvoljenih.

4.5.3. Vjetar prema europskim normama EN 1992-1-4

4.5.3.1. Određivanje vršnog pritiska brzine vjetra

Toranj Sljeme se nalazi na zemljištu III. Kategorije.

Osnovna brzina vjetra $V_b = 33 \text{ m/s}$

Osnovni tlak brzine vjetra: $q_b = \frac{\rho \cdot V_b^2}{2} = \frac{(1,25/1000) \cdot 33^2}{2} = 0,68 \text{ kN/m}^2$

Faktor zemljišta:

$z_0 = 0,3$ i $z_{0,II} = 0,05$

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} = 0,19 \cdot \left(\frac{0,3}{0,05} \right)^{0,07} = 0,22$$

	z_0 (m)	z_{\min} (m)
kategorija 0: more ili obalno područje uz otvoreno more	0,003	1
kategorija I: jezera ili ravan teren bez prepreka	0,01	1
kategorija II: površine s niskom vegetacijom, povremene prepreke kao što su drveće ili zgrade na razmacima 20 puta većim od visine prepreke (poljoprivredno zemljište)	0,05	2
kategorija III: površine s uobičajenom vegetacijom ili zgradama ili preprekama na razmacima do 20 puta većim od visine prepreke (industrijske zone i šume)	0,3	5
kategorija IV: područja s najmanje 15% površine prekrivene zgradama srednje visina najmanje 15 m (gradska područja)	1,0	10

Slika 17.: Kategorija zemljišta (Izvor: [3])

Koeficijent hrapavosti za referentnu visinu z :

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

Koeficijent izloženosti:

- za referentnu visinu z
- uz preporučenu vrijednost faktora turbulencije $k_I = 1,0$
- uz vrijednost faktora topografije $c_0(z) = 1,0$ kada je nagib zemljišta u smjeru vjetra $< 0,05$

$$c_e(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot c_r(z)^2 \cdot c_0(z)^2 = \left[1 + 7 \cdot \frac{k_I}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \right] \cdot c_r(z)^2 \cdot c_0(z)^2$$

Vršni pritisak brzine vjetra:

$$q_p(z) = c_e(z) \cdot q_b$$

Tablica 7.: Vršni pritisak brzine vjetra

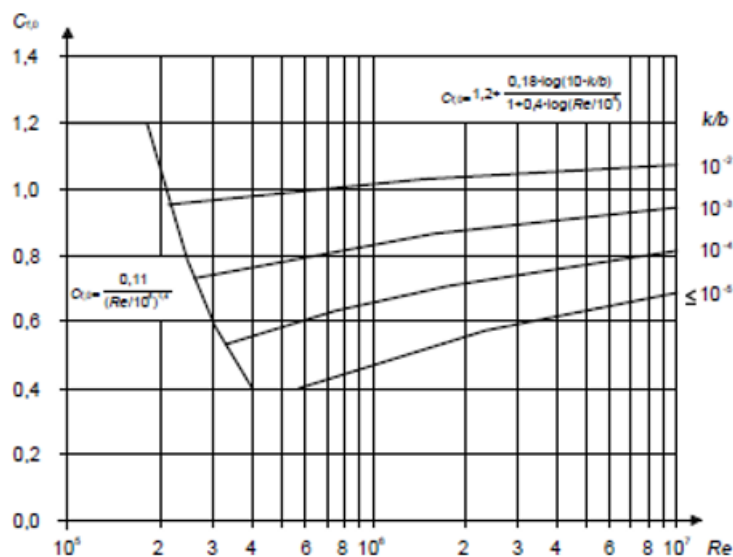
z [m]	zs [m]	h [m]	b [m]	cr(z)	ce(z)	cr(zs)	ce(zs)	qp(z)
14,77	8,862	14,77	6,9	0,857	2,055	0,745	1,702	1,397
18,8	17,188	4,03	20,4	0,910	2,231	0,891	2,165	1,517
18,8	17,188	4,03	19,4	0,910	2,231	0,891	2,165	1,517
20	19,520	1,2	19,4	0,924	2,277	0,919	2,258	1,548
20	19,520	1,2	22,4	0,924	2,277	0,919	2,258	1,548
20,87	20,522	0,87	22,4	0,933	2,308	0,930	2,296	1,570
20,87	20,522	0,87	22,4	0,933	2,308	0,930	2,296	1,570
24,55	23,078	3,68	22,4	0,969	2,431	0,955	2,384	1,653
24,55	23,078	3,68	19,4	0,969	2,431	0,955	2,384	1,653
28	26,620	3,45	19,4	0,998	2,533	0,987	2,494	1,722
28	26,620	3,45	20,4	0,998	2,533	0,987	2,494	1,722
32,62	30,772	4,62	20,4	1,032	2,653	1,019	2,607	1,804
32,62	30,772	4,62	6,6	1,032	2,653	1,019	2,607	1,804
39,95	37,018	7,33	6,6	1,076	2,815	1,059	2,754	1,914
39,95	37,018	7,33	14,6	1,076	2,815	1,059	2,754	1,914
40,39	40,214	0,44	14,6	1,079	2,824	1,078	2,821	1,921
40,39	40,214	0,44	6,6	1,079	2,824	1,078	2,821	1,921
47,95	44,926	7,56	6,6	1,116	2,965	1,102	2,911	2,016
47,95	44,926	7,56	14,6	1,116	2,965	1,102	2,911	2,016
48,39	48,214	0,44	14,6	1,118	2,973	1,118	2,970	2,022

48,39	48,214	0,44	6,6	1,118	2,973	1,118	2,970	2,022
55,2	52,476	6,81	6,6	1,147	3,083	1,136	3,041	2,096
55,2	52,476	6,81	14,6	1,147	3,083	1,136	3,041	2,096
56,39	55,914	1,19	14,6	1,152	3,101	1,150	3,094	2,109
56,39	55,914	1,19	6,6	1,152	3,101	1,150	3,094	2,109
63,95	60,926	7,56	6,6	1,180	3,208	1,169	3,167	2,182
63,95	60,926	7,56	14,6	1,180	3,208	1,169	3,167	2,182
64,39	64,214	0,44	14,6	1,181	3,214	1,181	3,212	2,186
64,39	64,214	0,44	6,6	1,181	3,214	1,181	3,212	2,186
71,65	68,746	7,26	6,6	1,205	3,306	1,196	3,271	2,248
73,9	73,000	2,25	15,38	1,211	3,333	1,209	3,323	2,267
83,63	79,738	9,73	17,6	1,239	3,442	1,228	3,400	2,340
83,63	79,738	9,73	6,7	1,239	3,442	1,228	3,400	2,340
90,87	87,974	7,24	6,7	1,257	3,516	1,250	3,487	2,391
90,87	87,974	7,24	2,3	1,257	3,516	1,250	3,487	2,391
130,87	114,870	40	2,3	1,337	3,847	1,309	3,727	2,616
130,87	114,870	40	1,15	1,337	3,847	1,309	3,727	2,616
150,87	142,870	20	1,15	1,368	3,980	1,356	3,929	2,707
150,87	142,870	20	1,6	1,368	3,980	1,356	3,929	2,707
168,87	161,670	18	1,6	1,393	4,087	1,384	4,046	2,779

4.5.3.2. Postupak određivanja koeficijenta sile c_f

Za kružni poprečni presjek koeficijent sile dan je izrazom:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda$$



Slika 18.: Osnovni koeficijent sile (Izvor: [20])

Osnovni koeficijent sile, $c_{f,0}$, očitava se sa gornje slike na temelju vrijednosti Reynoldsova broja (Re) i odnosa k/b . Pri tome se b odnosi na širinu konstrukcije, a k na hrapavost površine.

$$R_e = \frac{b \cdot v(z_e)}{\nu} \quad \text{gdje je } \nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$v(z_e) = \sqrt{\frac{2 \cdot q_p(z)}{\rho}}$$

Za betonski dio tornja hrapavost površine $k = 0,2 \text{ mm}$, a za čelični dio $k = 0,02 \text{ mm}$ prema EN 1991-1-4)

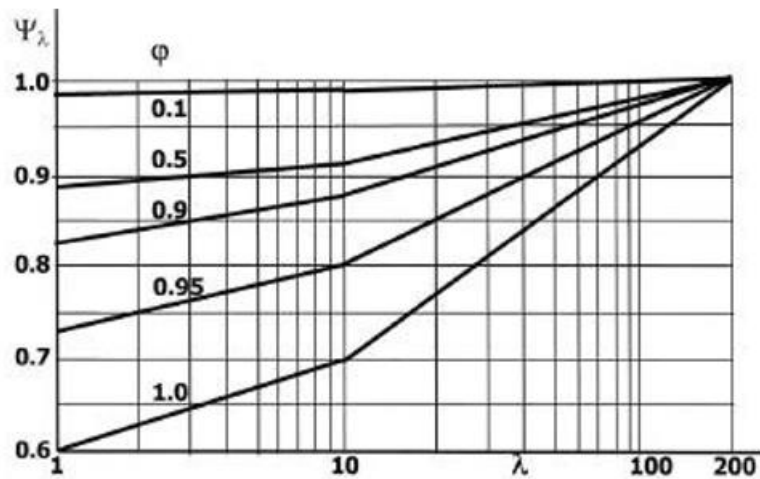
Položaj konstrukcije, vjetar okomito na ravninu stranice	Proračunska vitkost λ
	$\lambda = (l/b)(2/c_{t,0})$ $\lambda = (2l/b)(2/c_{t,0})$ $\lambda = \infty$

Slika 19.: Proračunska vitkost (Izvor: [20])

Za toranj obrađen u radu usvaja se vrijednost proračunske vitkosti prema sljedećem izrazu:

$$\lambda = \frac{2l}{b} \cdot \frac{2}{c_{f,0}} = \frac{2 \cdot 92}{6,8} \cdot \frac{2}{0,795} = 68,07$$

Za naš primjer tornja koeficijent punoće se uzima $\varphi = 1,0$.



Slika 20.: Koeficijent redukcije uslijed vitkosti (Izvor: [20])

Koeficijent redukcije ψ_λ očitava se sa gornje slike na temelju vitkosti λ i koeficijent punoće φ .

$$\psi_\lambda = 0,9$$

Tablica 8.: Koeficijent sile c_f

v(ze)	Re	$c_{f,0}$	ψ_λ	c_f
47,28	21751097,55	0,79	0,90	0,71
49,26	66998121,77	0,78	0,90	0,70
49,26	63713900,12	0,78	0,90	0,70
49,77	64366558,51	0,78	0,90	0,71
49,77	74320150,04	0,78	0,90	0,70
50,11	74837822,20	0,78	0,90	0,71
50,11	74837822,20	0,78	0,90	0,71
51,43	76805609,41	0,78	0,90	0,71
51,43	66519143,86	0,78	0,90	0,71
52,49	67892776,85	0,79	0,90	0,71
52,49	71392404,52	0,79	0,90	0,71
53,72	73063124,41	0,79	0,90	0,71
53,72	23638069,66	0,79	0,90	0,71
55,35	24352049,16	0,79	0,90	0,71
55,35	53869684,51	0,79	0,90	0,71
55,43	53954797,03	0,79	0,90	0,71
55,43	24390524,68	0,79	0,90	0,71
56,80	24991862,41	0,79	0,90	0,71
56,80	55285028,96	0,79	0,90	0,71
56,87	55355695,35	0,79	0,90	0,71
56,87	25023807,49	0,79	0,90	0,71
57,92	25483547,21	0,79	0,90	0,72
57,92	56372695,35	0,79	0,90	0,71
58,09	56537154,88	0,79	0,90	0,71
58,09	25557891,93	0,79	0,90	0,72

59,08	25995722,68	0,80	0,90	0,72
59,08	57505689,58	0,79	0,90	0,71
59,14	57558402,04	0,79	0,90	0,71
59,14	26019551,61	0,80	0,90	0,72
59,98	26390392,73	0,80	0,90	0,72
60,22	61747369,89	0,79	0,90	0,71
61,19	71801799,16	0,79	0,90	0,71
61,19	27333639,45	0,80	0,90	0,72
61,85	27624790,48	0,80	0,90	0,72
61,85	9483137,03	0,80	0,90	0,72
64,70	9920509,93	0,81	0,90	0,73
64,70	4960254,97	0,81	0,90	0,73
65,81	5045157,39	0,81	0,90	0,73
65,81	7019349,42	0,81	0,90	0,73
66,68	7112785,20	0,81	0,90	0,73

4.5.3.3. Određivanje faktora konstrukcije $c_s c_d$ pojednostavljenim proračunom

Prema HRN EN 1991-1-4; 2012/NA, Dodatak A

$$c_s c_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)}$$

Poredbena visina $z_s = 0,6 \cdot h \geq z_{min} = 5 \text{ m}$

$$z_s = 0,6 \cdot 92 = 55,2 \geq z_{min} = 5 \text{ m}$$

Duljina uzburkanosti:

$$L(z_s) = L_t \cdot \left(\frac{z_s}{z_t}\right)^\alpha \quad z \geq z_{min} \quad L_t = 300 \text{ m} \text{ i } z_t = 200 \text{ m}$$

$$\alpha = 0,67 + 0,05 \ln(z_0) = 0,67 + 0,05 \ln(0,3) = 0,61$$

$$L(z_s) = 300 \cdot \left(\frac{55,2}{200}\right)^{0,61} = 136,8$$

Intenzitet uzburkanosti:

$$I_v(z_s) = \frac{k_I}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z_s}{z_0}\right)} = \frac{1}{1 \cdot \ln\left(\frac{55,2}{0,3}\right)} = 0,192$$

Izraz za B udio odziva zaleđa:

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \left(\frac{b+h}{L(z_s)}\right)^{0,63}} = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \left(\frac{6,8 + 92}{136,8}\right)^{0,63}} = 0,577$$

U gornjim izrazima z predstavlja referentnu visinu na kojoj se nalazi promatrana točka, h predstavlja visinu betonskog dijela tornja, b predstavlja srednju širinu tornja a z_s predstavlja poredbenu visinu tornja.

Izraz za R rezonantni udio odziva:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z_s, n_{1,x}) \cdot R_h(\eta_h) \cdot R_b(\eta_b)$$

Bezdimenzionalna funkcija spektralne gustoće:

$$S_L(z, n) = \frac{6,8 \cdot f_L(z, n)}{(1 + 10,2 \cdot f_L(z, n))^{5/3}}$$

Bezdimenzionalna frekvencija $f_L(z, n)$ dobiva se izrazom:

$$f_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{\eta_{1,x} \cdot L(z_s)}{v_m(z_s)} \quad \text{gdje je:}$$

$$\eta_{1,x} = \frac{\sqrt{d}}{0,1 \cdot h} = \frac{\sqrt{6,8}}{0,1 \cdot 92} = 0,283 [Hz]$$

Dobivenu vrijednost je potrebno usporediti sa frekvencijom prvog tona iz sofistika

$$v_m(z_s) = c_r(z_s) \cdot v_b = 1,136 \cdot 33 = 37,49 [m/s]$$

$$f_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{0,283 \cdot 136,8}{37,49} = 1,033$$

$$S_L(z, n) = \frac{6,8 \cdot 1,033}{(1 + 10,2 \cdot 1,033)^{5/3}} = 0,119$$

Aerodinamične prijenosne funkcije za osnovni oblik titranja iznose:

$$\eta_h = \frac{4,6 \cdot h}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{4,6 \cdot 92}{136,8} \cdot 1,033 = 3,196$$

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} (1 - e^{-2\eta_h}) = \frac{1}{3,196} - \frac{1}{2 \cdot 3,196^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot 3,196}) = 0,26$$

$$\eta_b = \frac{4,6 \cdot b}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{4,6 \cdot 6,8}{136,8} \cdot 1,033 = 0,236$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b^2} (1 - e^{-2\eta_b}) = \frac{1}{0,236} - \frac{1}{2 \cdot 0,236^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot 0,236}) = 0,86$$

Logaritamski dekrement prigušenja:

$\delta = \delta_s + \delta_a$ pri čemu je:

$\delta_s = 0,03$ za betonski dio tornja

$\delta_s = 0,05$ za čelični dio tornja

Logaritamski dekrement aerodinamičkog prigušenja:

$$\delta_a = \frac{c_f \cdot \rho \cdot b \cdot v_m(z_s)}{2 \cdot n_1 \cdot m_e}$$

Aerodinamički koeficijent sile uzet na vrijednosti poredbene visine.

Ekvivalentnu masu po jedinici dužine tornja uzeti sa približnom vrijednošću:

$$m_e = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} m_i \cdot \Phi_i^2}{\sum \Phi_i^2}$$

Gdje je bezdimenzionalna vrijednost:

$$\Phi_i = \left(\frac{z_i}{h}\right)^\zeta$$

Za tornjeve $\zeta = 2,0$

Tablica 9.: Ekvivalentne mase po segmentima tornja

	$m_i = G_i + \Delta G_i$ [kN]	z_i [m]	$\Phi^2(s)_i$	$m_i \cdot \Phi^2(s)_i$
Donji dio tornja	7756,22	9,00000	0,00001	0,06
Srednji dio tornja	11945,18	49,00000	0,00709	84,68
Gornji dio tornja	3110,48	86,00000	0,06726	209,22
Antena	592,17	130,20000	0,35337	209,26
Platforma A	6089,67	76,60000	0,04234	257,81
Platforma B1	1340,55	64,20000	0,02089	28,00
Platforma B2	1340,55	56,20000	0,01227	16,44
Platforma B3	1340,55	48,20000	0,00664	8,90
Platforma B4	1340,55	40,20000	0,00321	4,31
Platforma C	13888,16	22,60000	0,00032	4,46
$\Sigma m_i \cdot \Phi^2(s)_i$	823,14			
$\Sigma \Phi(s)_i$	0,51340			
$\Sigma m_i \cdot \Phi^2(s)_i / \Sigma \Phi(s)_i$	1603,32			

$$\delta_a = \frac{c_f \cdot \rho \cdot b \cdot v_m(z_s)}{2 \cdot n_1 \cdot m_e} = \frac{0,72 \cdot 1,25 \cdot 6,6 \cdot 37,49}{2 \cdot 0,283 \cdot 1603,32 \cdot 100} = 0,0025$$

$$\delta = \delta_s + \delta_a = 0,03 + 0,0025 = 0,0325$$

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot 0,0325} \cdot 0,119 \cdot 0,26 \cdot 0,86 = 4,04$$

Očekivana frekvencija v :

$$v = n_{1,x} \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} \quad v \geq 0,08 \text{ Hz}$$

$$v = 0,283 \cdot \sqrt{\frac{4,04}{0,577 + 4,04}} = 0,265$$

Vršni faktor (udarni koeficijent) k_p dobiva se sljedećim izrazom:

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)}} \quad \text{ili} \quad k_p = 3 \quad \text{mjerodavna je veća vrijednost}$$

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(0,265 \cdot 600)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(0,265 \cdot 600)}} = 3,372$$

Odsječak vremena za srednju brzinu uzima se $T=600$ s

$$c_s c_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)} = \frac{1 + 2 \cdot 3,372 \cdot 0,192 \cdot \sqrt{0,577 + 4,04}}{1 + 7 \cdot 0,192} = 1,61$$

4.5.3.4. Određivanje ukupnog opterećenja od vjetra

Rezultirajuće opterećenje vjetrom po metru (visine) na poprečni presjek tornja:

$$w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z) \cdot d$$

$$w_0 = 0$$

Rezultirajuće koncentrirano opterećenje vjetrom na poprečni presjek tornja:

$$W = F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z) \cdot A = w \cdot h$$

Tablica 10.: Opterećenje vjetra prema EN-u na karakterističnim visinama

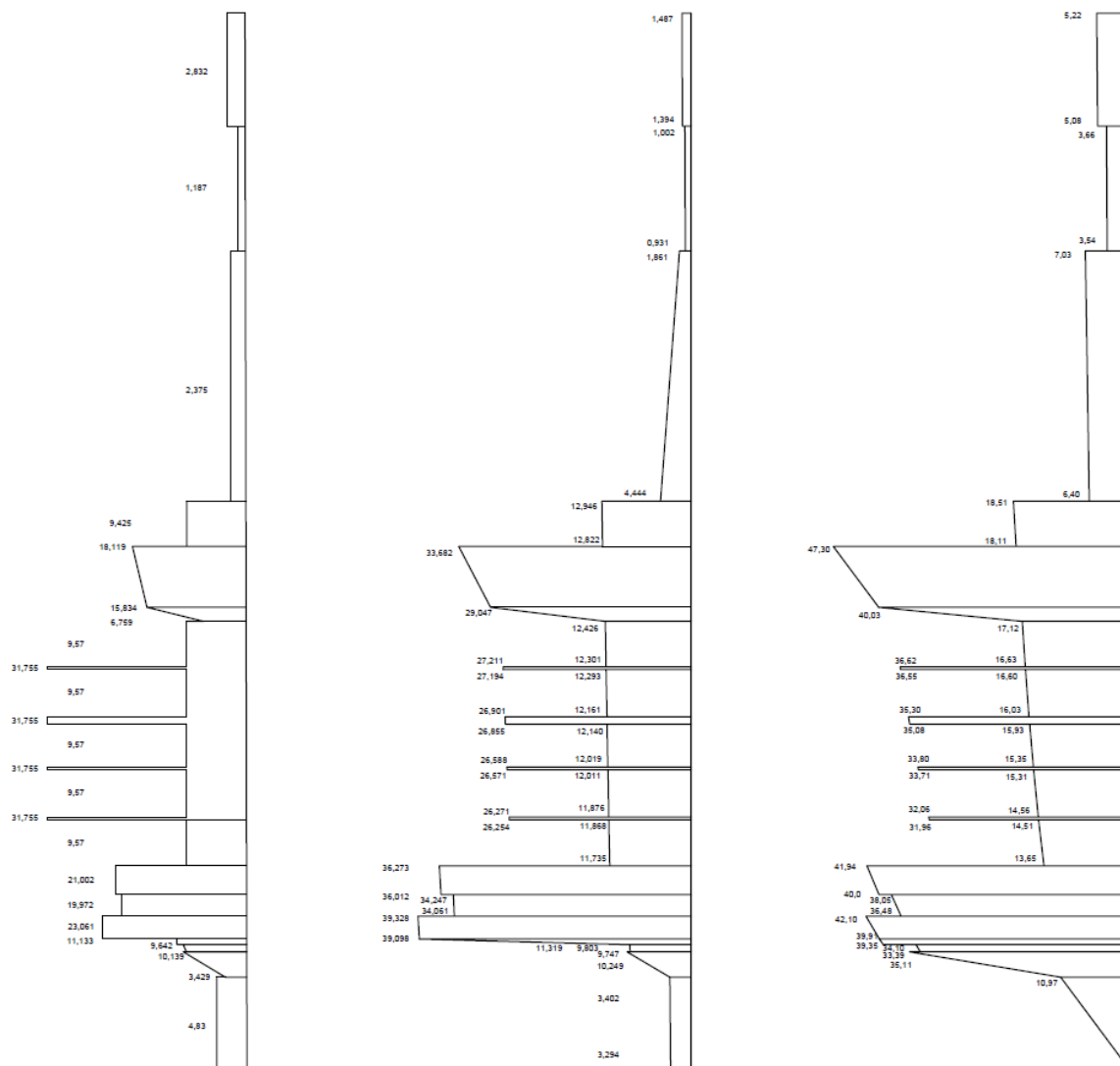
z [m]	z _s [m]	h [m]	b [m]	c _{f,0}	ψ _λ	c _f	q _w	F _w
14,77	8,862	14,77	6,9	0,79	0,90	0,71	10,97	162,02
18,8	17,188	4,03	20,4	0,78	0,90	0,70	35,11	141,48
18,8	17,188	4,03	19,4	0,78	0,90	0,70	33,39	
20	19,520	1,2	19,4	0,78	0,90	0,71	34,10	40,92
20	19,520	1,2	22,4	0,78	0,90	0,70	39,35	
20,87	20,522	0,87	22,4	0,78	0,90	0,71	39,91	34,72
20,87	20,522	0,87	22,4	0,78	0,90	0,71	39,91	
24,55	23,078	3,68	22,4	0,78	0,90	0,71	42,10	154,92
24,55	23,078	3,68	19,4	0,78	0,90	0,71	36,48	
28	26,620	3,45	19,4	0,79	0,90	0,71	38,05	131,26
28	26,620	3,45	20,4	0,79	0,90	0,71	40,00	
32,62	30,772	4,62	20,4	0,79	0,90	0,71	41,94	193,78
32,62	30,772	4,62	6,6	0,79	0,90	0,71	13,65	
39,95	37,018	7,33	6,6	0,79	0,90	0,71	14,51	106,37
39,95	37,018	7,33	14,6	0,79	0,90	0,71	31,96	
40,39	40,214	0,44	14,6	0,79	0,90	0,71	32,06	14,11
40,39	40,214	0,44	6,6	0,79	0,90	0,71	14,56	
47,95	44,926	7,56	6,6	0,79	0,90	0,71	15,31	115,72
47,95	44,926	7,56	14,6	0,79	0,90	0,71	33,71	

48,39	48,214	0,44	14,6	0,79	0,90	0,71	33,80	14,87
48,39	48,214	0,44	6,6	0,79	0,90	0,71	15,35	
55,2	52,476	6,81	6,6	0,79	0,90	0,72	15,93	108,50
55,2	52,476	6,81	14,6	0,79	0,90	0,71	35,08	
56,39	55,914	1,19	14,6	0,79	0,90	0,71	35,30	42,00
56,39	55,914	1,19	6,6	0,79	0,90	0,72	16,03	
63,95	60,926	7,56	6,6	0,80	0,90	0,72	16,60	125,48
63,95	60,926	7,56	14,6	0,79	0,90	0,71	36,55	
64,39	64,214	0,44	14,6	0,79	0,90	0,71	36,62	16,11
64,39	64,214	0,44	6,6	0,80	0,90	0,72	16,63	
71,65	68,746	7,26	6,6	0,80	0,90	0,72	17,12	124,30
73,9	73,000	2,25	15,38	0,79	0,90	0,71	40,03	90,07
83,63	79,738	9,73	17,6	0,79	0,90	0,71	47,30	460,27
83,63	79,738	9,73	6,7	0,80	0,90	0,72	18,11	
90,87	87,974	7,24	6,7	0,80	0,90	0,72	18,51	134,01
90,87	87,974	7,24	2,3	0,80	0,90	0,72	6,40	
130,87	114,870	40	2,3	0,81	0,90	0,73	7,03	281,14
130,87	114,870	40	1,15	0,81	0,90	0,73	3,54	
150,87	142,870	20	1,15	0,81	0,90	0,73	3,66	73,27
150,87	142,870	20	1,6	0,81	0,90	0,73	5,08	
168,87	161,670	18	1,6	0,81	0,90	0,73	5,22	93,97

4.5.4. Rekapitulacija opterećenja vjetrom prema različitim normama

Na Slici 21. vidimo tri prikaza visinskih raspodjela opterećenja vjetra po metru visine za različite dijelove tornja. Ovi prikazi predstavljaju raspodjelu sile vjetra u kN po metru dužine na različitim visinama. Kod dijagrama opterećenja vjetrom prema postojećoj dokumentaciji u gornjim čelični dijelovima, vrijednosti opterećenja vjetra su manje i kreću se od 1,187 kN/m do 2,832 kN/m. Najveća vrijednost u betonskom dijelu tornja je 31,755 kN/m, koja se ponavlja nekoliko puta na platformama za antene, što ukazuje na snažno opterećenje vjetra u toj zoni. U nižim dijelovima tornja opterećenje značajno opada, do 4,83 kN/m na najnižoj točki. Kod opterećenja vjetrom prema DIN-u, opterećenje je slično kao kod proračuna prema postojećoj dokumentaciji, ali je nešto ravnomjernije raspoređeno po visini. Gornji dijelovi imaju vrijednosti od 4,444 kN/m do najniže vrijednosti 1,002 kN/m. Najveća vrijednost u betonskom dijelu tornja je 39,328 kN/m koja se nalazi na pogonskoj platformi. Srednji dijelovi tornja imaju opterećenja od 11,735 kN/m do 12,426 kN/m na trupu tornja te vrijednosti na središnjim platformama se kreću između 26,254 kN/m i 27,211 kN/m. Donji dijelovi imaju najviše opterećenje do 39,328 kN/m, koje se postepeno smanjuje na nižim visinama do 3,294 kN/m. Kod opterećenja vjetrom prema EN-u, čelični dijelovi imaju vrijednosti između 3,54 kN/m i 7,03 kN/m, što ukazuje na nešto veće opterećenje u odnosu na ostale prikaze. Najveća vrijednost

u betonskom dijelu tornja je 47,30 kN/m koja se nalazi na turističkoj platformi. Srednji dio tornja ima vrijednosti od 31,96 kN/m do 36,62 kN/m na platformama za antene, što pokazuje značajno povećano opterećenje u odnosu na opterećenja vjetra po tijelu tornja koje se kreće od 13,65 kN/m do 17,12 kN/m. U donjim dijelovima opterećenje vjetra dostiže maksimum od 41,94 kN/m na pogonskoj platformi, ali se smanjuje u najnižem segmentu na 10,97 kN/m.



Slika 21.: Dijagram opterećenja od vjetra na toranj: prema postojećoj dokumentaciji (lijevo), prema njemačkim normama (sredina), prema europskoj normi (desno)

4.6. Proračun na potres

Analiza je, za potrebe ovog rada, provedena u računalnom programu „Sofistik“. Višemodalna spektralna analiza smatra se jednom od najraširenijih metoda za proračun potresnog djelovanja, a sastoji se od modalne i spektralne analize. Na temelju modalne analize dobije se uvid u različite oblike vibriranja koji ovise o masi, odnosno frekvencijama gibanja svake mase. Iz frekvencija se direktno odrede periodi vibriranja koji su obrnuto proporcionalni u odnosu na pripadajuću frekvenciju. Prvi oblik vibriranja ima najmanju frekvenciju i najdulji period.

Kod spektralne analize potresno se opterećenje zadaje preko spektra u koji se unose podaci vezani uz vršno ubrzanje tla, faktor ponašanja, vrstu tla i tip spektra, dok se ostale vrijednosti automatski generiraju u računalnom programu prema EN 1998-1.

Ulazni podaci za Sofistik prikazani su na Slici. 22.

The screenshot displays the 'Actions' tab in the Sofistik software. It is divided into several sections:

- Directions of Action:** Includes sub-tabs for 'Response Spectrum Horizontal Direction X', 'Response Spectrum Horizontal Direction Y', and 'Response Spectrum Vertical Direction Z'. Checkboxes are present for 'Consider horizontal excitation in X', 'Consider horizontal excitation in Y', and 'Consider additional vertical excitation in Z'.
- Combination of the Effects of the Directional Components of the Seismic Action:** Offers the 'SRSS method' as the primary selection, with a 'Combination factor for secondary direction(s)' set to 0.3. Information icons provide details on EN 1998-1 standards.
- Accidental Eccentricity:** Features checkboxes for 'X-DIR', 'Y-DIR', and their combinations with eccentricities (+eay, -eay). A diagram shows a rectangular structure with dimensions L_x and L_y , and eccentricities e_{ax} and e_{ay} . The 'Accidental eccentricity' is set to $e_{ai} = \pm 5.00 \text{ o/o} * L_i$.
- Expert Settings:** Includes radio buttons for 'Apply acceleration to whole structure' and 'Apply acceleration only to following groups'. A table below lists the selected group:

ID	Name
<input checked="" type="checkbox"/>	1 Group 1

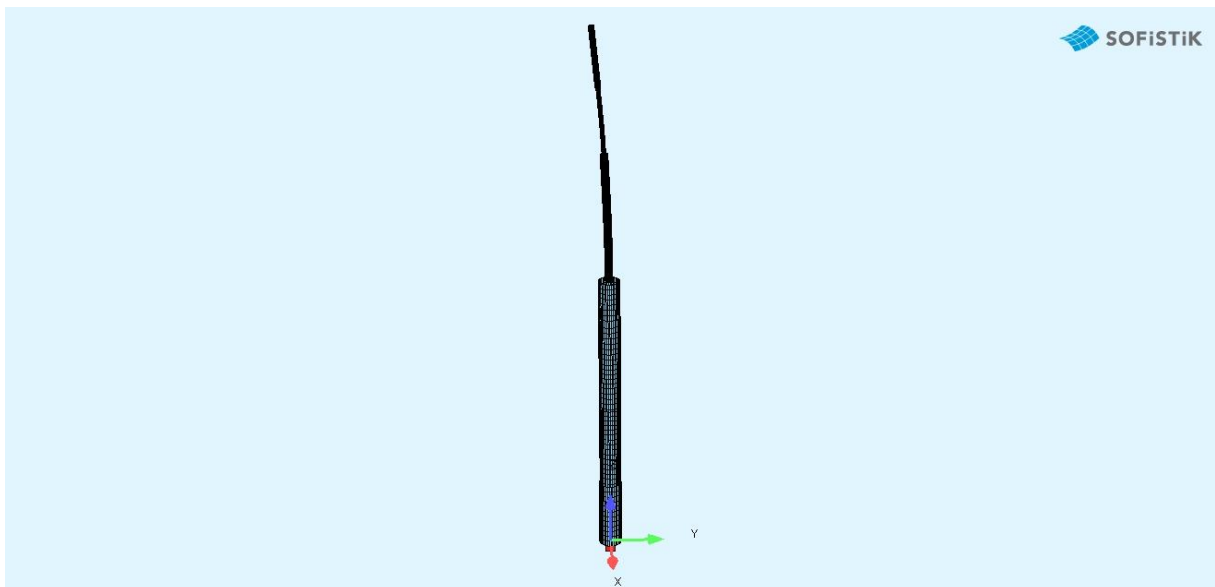
Slika 22.: Ulazni podaci za Sofistik

4.6.1. Modalna analiza

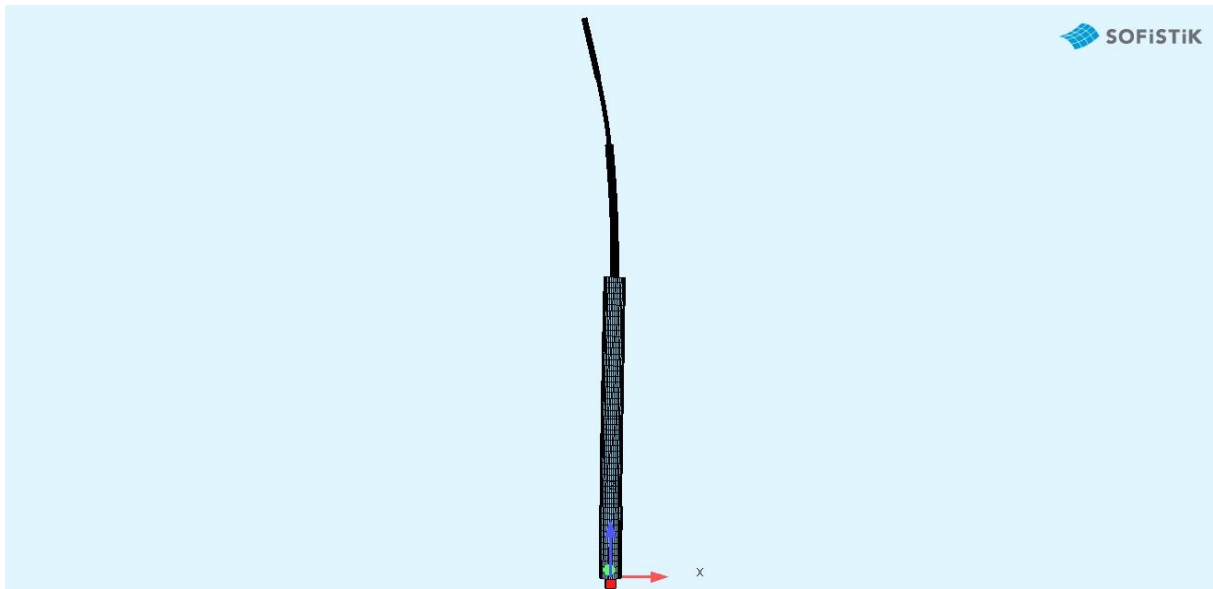
Na slikama 23. – 25. prikazana su prva tri oblika titranja



Slika 23.: Prvi oblik titranja (translacija u X smjeru)



Slika 24.: Drugi oblik titranja (translacija u Y smjeru)



Slika 25.: Treći oblik titranja (translacija u X smjeru)

Sum of Masses

	TM-X[t]	TM-Y[t]	TM-Z[t]	RM-X[tm2]	RM-Y[tm2]	RM-Z[tm2]
total	2474.013	2474.013	2474.013	8771.217	8771.222	17939.625
activ	2445.300	2445.300	2445.300	8632.726	8632.729	17656.152

Center of mass

	X[m]	Y[m]	Z[m]
	0.000	0.000	40.923

No	LC	Eigenvalue [1/Sec ²]	Relativ error	frequency [Hertz]	Period [sec]	modal damping
1	10001	7.23218E+00	0.00E+00	0.428	2.336390	0.05000
2	10002	7.23218E+00	6.14E-16	0.428	2.336390	0.05000
3	10003	1.71910E+01	2.07E-16	0.660	1.515408	0.05000
4	10004	1.71910E+01	1.03E-15	0.660	1.515407	0.05000
5	10005	1.13247E+02	6.27E-16	1.694	0.590427	0.05000
6	10006	1.13247E+02	6.27E-16	1.694	0.590427	0.05000
7	10007	4.05344E+02	1.26E-15	3.204	0.312081	0.05000
8	10008	4.05345E+02	0.00E+00	3.204	0.312081	0.05000
9	10009	1.04807E+03	1.08E-15	5.152	0.194082	0.05000
10	10010	1.04807E+03	1.52E-15	5.152	0.194081	0.05000
11	10011	2.13282E+03	2.68E-13	7.350	0.136051	0.05000
12	10012	2.13282E+03	2.68E-13	7.350	0.136051	0.05000
13	10013	2.19523E+03	2.28E-15	7.457	0.134103	0.05000
14	10014	3.52248E+03	1.64E-14	9.446	0.105866	0.05000
15	10015	3.52249E+03	7.10E-15	9.446	0.105866	0.05000
16	10016	3.67925E+03	2.47E-16	9.654	0.103586	0.05000
17	10017	7.23125E+03	1.40E-13	13.534	0.073888	0.05000
18	10018	7.23132E+03	1.63E-13	13.534	0.073888	0.05000
19	10019	8.73193E+03	4.12E-14	14.872	0.067240	0.05000
20	10020	1.08147E+04	5.88E-10	16.551	0.060419	0.05000
21	10021	1.08148E+04	5.85E-10	16.551	0.060419	0.05000
22	10022	1.66375E+04	1.01E-11	20.529	0.048712	0.05000
23	10023	1.71722E+04	1.36E-13	20.856	0.047948	0.05000
24	10024	1.71724E+04	1.88E-12	20.856	0.047947	0.05000
25	10025	1.72873E+04	5.33E-12	20.926	0.047788	0.05000
26	10026	2.24058E+04	2.18E-11	23.823	0.041976	0.05000
27	10027	2.24059E+04	2.54E-11	23.823	0.041976	0.05000
28	10028	2.30421E+04	6.15E-11	24.159	0.041392	0.05000
29	10029	2.91797E+04	8.74E-09	27.187	0.036782	0.05000
30	10030	3.28367E+04	8.93E-07	28.840	0.034674	0.05000
31		3.28368E+04	2.86E-06	28.840	0.034674	
32		4.05706E+04	1.93E-06	32.057	0.031194	

Modal masses - activated mass

no	LC	frequency [Hertz]	effective modal mass			activated mass[%]	rotation around S		
			X[%]	Y[%]	Z[%]		phiX[%]	phiY[%]	phiz[%]
1	10001	0.428	18.40	0.00	0.00	0.48016	0.00	57.80	0.00
2	10002	0.428	0.00	18.40	0.00	0.48016	57.79	0.00	0.00
3	10003	0.660	31.72	0.00	0.00	0.65877	0.00	17.25	0.00
4	10004	0.660	0.00	31.72	0.00	0.65877	17.25	0.00	0.00
5	10005	1.694	2.88	0.00	0.00	0.30395	0.00	0.68	0.00
6	10006	1.694	0.00	2.88	0.00	0.30395	0.68	0.00	0.00
7	10007	3.204	0.00	22.46	0.00	3.53827	16.50	0.00	0.00
8	10008	3.204	22.45	0.00	0.00	3.53826	0.00	16.51	0.00
9	10009	5.152	1.95	0.01	0.00	0.36138	0.01	2.24	0.00
10	10010	5.152	0.01	1.95	0.00	0.36138	2.24	0.01	0.00
11	10011	7.350	0.00	8.81	0.00	1.72038	13.16	0.00	12.53
12	10012	7.350	8.81	0.00	0.00	1.72040	0.00	13.17	21.10
13	10013	7.457	0.00	0.00	0.00	15.00336	0.00	0.00	100.00
14	10014	9.446	1.10	0.00	0.00	0.46862	0.00	1.86	0.75
15	10015	9.446	0.00	1.10	0.00	0.46862	1.86	0.00	0.19
16	10016	9.654	0.00	0.00	69.01	19.80891	0.00	0.00	0.67
17	10017	13.534	2.07	0.00	0.00	1.96505	0.00	3.81	2.11
18	10018	13.534	0.00	2.07	0.00	1.96497	3.81	0.00	0.21
19	10019	14.872	0.00	0.00	0.00	0.04569	0.00	0.00	100.00
20	10020	16.551	0.29	0.00	0.00	0.29521	0.00	0.56	1.40
21	10021	16.551	0.00	0.29	0.00	0.29521	0.56	0.00	0.31
22	10022	20.529	0.00	0.00	3.90	0.95872	0.00	0.00	0.26
23	10023	20.856	1.06	0.00	0.00	0.95944	0.01	2.33	100.00
24	10024	20.856	0.00	1.06	0.00	0.95941	2.33	0.01	100.00
25	10025	20.926	0.00	0.00	0.00	0.83712	0.00	0.00	100.00
26	10026	23.823	0.44	0.03	0.00	0.48938	0.06	1.00	100.00
27	10027	23.823	0.03	0.44	0.00	0.48940	1.00	0.06	100.00
28	10028	24.159	0.00	0.00	0.00	0.06815	0.00	0.00	100.00
29	10029	27.187	0.00	0.00	16.69	7.24888	0.00	0.00	100.00
30	10030	28.840	0.44	2.82	0.00	3.84855	6.20	0.98	100.00
sum			91.65	94.03	89.59				
<ul style="list-style-type: none"> . The effective modal masses are evaluated for the global X, Y and Z direction (earthquake). . The "activated mass" also includes torsional and opposite movements without a global displacement (tuning fork): <ul style="list-style-type: none"> . activated mass in % = product $u^2 \cdot M$ = displacement² * mass, in relation to the sum of active mass, u scaled on a maximum displacement or rotation of 1.00. . (this activated mass is often also called generalized modal mass) --> a critical earthquake eigenform has high values in "effective modal mass" --> an inner eigenform like a tuning fork torque has high values in "activated mass" --> torsional eigenforms have high values in "rotation around the system center S" (relative values) 									

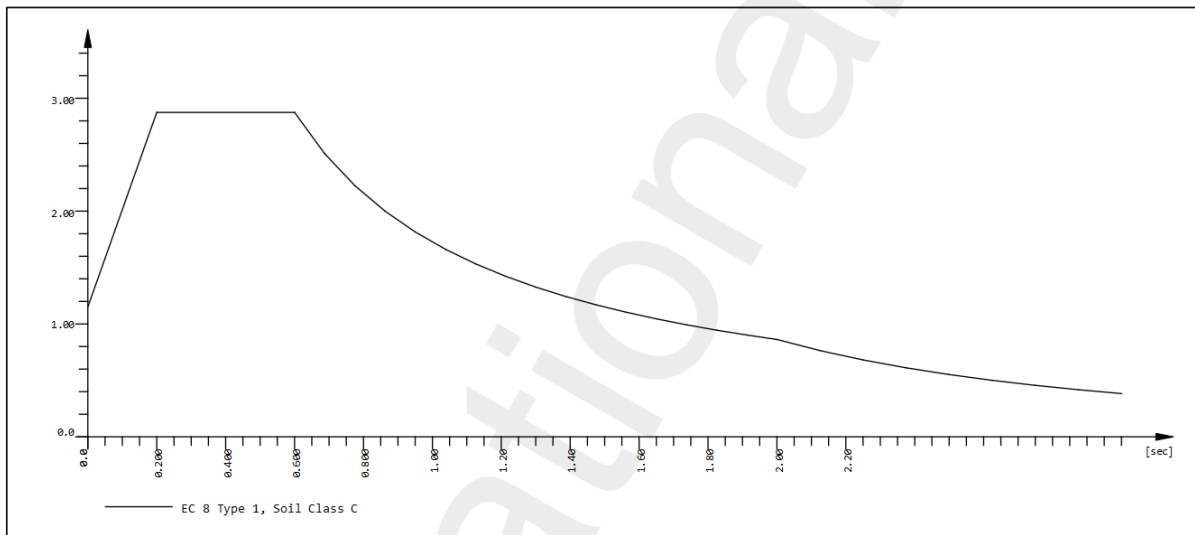
Prema tablici aktiviranih masa vidljivo je da se u prvom obliku titranja najviše mase (18,4%) aktivira kod translacije u smjeru X osi. Za prvi mod period iznosi 2,34 s. Drugi mod predstavlja translaciju u Y smjeru gdje se također aktiviralo 18,4% ukupne mase. Period za drugi mod iznosi 2,34 s. U trećem obliku titranja dolazi do translacije u X smjeru uz 31,72% aktivirane mase i periodom od 1,52 s. Zadnji red u tablici prikazuje koliki se postotak mase aktivirao u sumi za pojedini smjer, a važno je da taj iznos bude veći od 90% mase u x i y smjeru, što je u ovom slučaju zadovoljeno.

4.6.2. Spektralna analiza

Vršno ubrzanje tla za Sljeme očitano je iz karte potresnih područja Republike Hrvatske što je prikazano na Slici 26., a osnovna vrijednost faktora ponašanja očitana je za srednji razred duktilnosti (DCM) i iznosi $q_0=2,0$. Za vrstu tla definiran je tip C. Proračunski spektar odgovora prikazan je na Slici 27.



Slika 26.: Vršno ubrzanje tla (Izvor: [21])



Slika 27.: Proračunski spektar odgovora

5. PROCJENA MOMENATA SAVIJANJA PREMA TEORIJI DRUGOG REDA

5.1. Određivanje učinaka drugog reda prema EN-u

Prema normi EN 1992-1-1:2004 učinci drugog reda mogu se zanemariti ako je vitkost konstrukcije manja od granične vitkosti λ_{lim} , koja je definirana točkom 2.31. norme HRN EN 1992-1-1:2003 i to:

$$\lambda_{lim} = \frac{20 \cdot A \cdot B \cdot C}{\sqrt{n}} \quad \text{gdje je: } A = 0,7; B = 1,1 \text{ i } C = 0,7$$

Normalizirana uzdužna sila:

$$n = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}}$$

Površinu poprečnog presjeka tornja A_c možemo izračunati kao srednju vrijednost gornjeg, srednjeg i donjeg dijela tornja (zbog promjene stjenke) i to:

$$R_{dolje} = 3,45 \text{ m}$$

$$A_{c,dolje} = \pi \left(R_{dolje}^2 - (R_{dolje} - t)^2 \right) = \pi (3,45^2 - (3,45 - 0,65)^2) = 12,76 \text{ m}^2$$

$$R_{sredina} = 3,3 \text{ m}$$

$$A_{c,sredina} = \pi (R_{sredina}^2 - (R_{sredina} - t)^2) = \pi (3,3^2 - (3,3 - 0,35)^2) = 6,87 \text{ m}^2$$

$$R_{gore} = 3,25 \text{ m}$$

$$A_{c,gore} = \pi \left(R_{gore}^2 - (R_{gore} - t)^2 \right) = \pi (3,25^2 - (3,25 - 0,25)^2) = 4,91 \text{ m}^2$$

$$A_{c,srednje} = \frac{A_{c,dolje} + A_{c,sredina} + A_{c,gore}}{3} = \frac{12,76 + 6,87 + 4,91}{3} = 8,18 \text{ m}^2$$

Karakteristična vrijednost uzdužne sile od stalnog djelovanja:

$$N_{G,k} = 592,17 + 2860,59 + 9509,45 + 6891,87 + 4731,28 + 4 \cdot 1007,54 + 10625,62 + 33,5 + 527,18 + 163,25 + 216,34 + 1908,55 + 701,1 = 42627,81 \text{ kN}$$

Karakteristična vrijednost uzdužne sile od dodatnog stalnog djelovanja:

$$N_{\Delta G,k} = 1358,39 + 4 \cdot 333,01 + 3262,54 = 5952,97 \text{ kN}$$

Karakteristična vrijednost uzdužne sile od korisnog opterećenja:

$$N_{Q,k} = 1630,07 + 4 \cdot 399,61 + 3915,05 = 7143,56 \text{ kN}$$

Karakteristična vrijednost uzdužne sile od djelovanja snijegom:

$$N_{s,k} = 628,2 + 4 \cdot 398,27 + 1076,01 = 3297,29 \text{ kN}$$

Projektana vrijednost uzdužne sile:

$$N_{Ed} = \gamma_{G,j} \cdot (N_{G,k} + N_{\Delta G,k}) + \gamma_Q \cdot N_{Q,k,1} + \gamma_Q \cdot \psi_{0,2} \cdot N_{s,k,2} \rightarrow \text{Mjerodavno}$$

$$N_{Ed} = 1,35 \cdot (42627,81 + 5952,97) + 1,5 \cdot 7143,56 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 3297,29 = 79266,95 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = \gamma_{G,j} \cdot (N_{G,k} + N_{\Delta G,k}) + \gamma_Q \cdot N_{s,k,1} + \gamma_Q \cdot \psi_{0,2} \cdot N_{Q,k,2}$$

$$N_{Ed} = 1,35 \cdot (42627,81 + 5952,97) + 1,5 \cdot 3297,29 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot 7143,56 = 78030,73 \text{ kN}$$

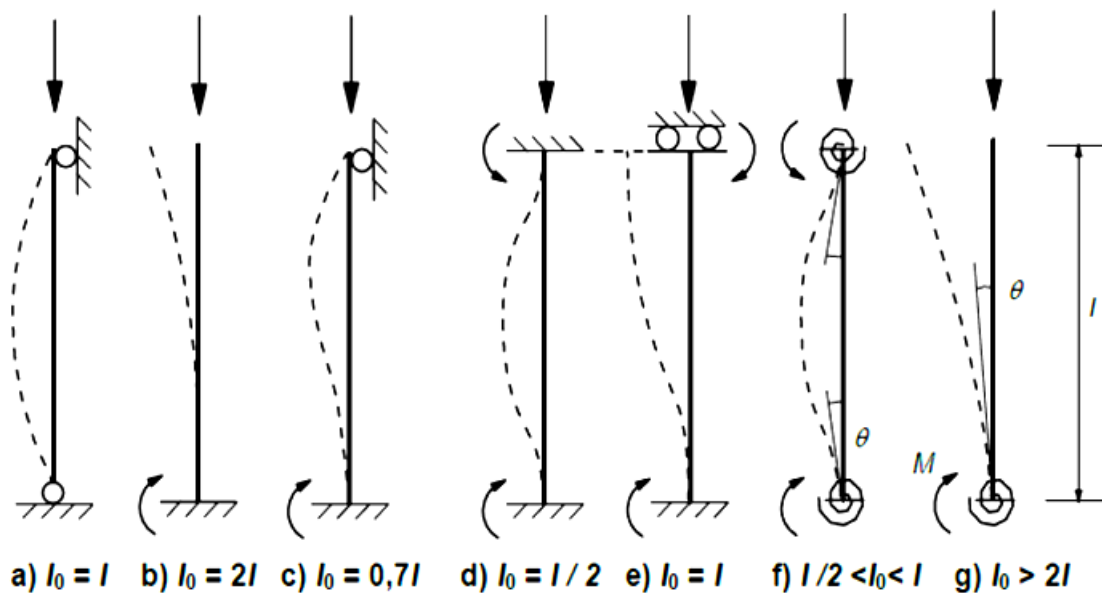
Normalizirana vrijednost uzdužne sile n:

$$n = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}} = \frac{79266,95}{81800 \cdot 2,0} = 0,4845$$

Granična vitkost:

$$\lambda_{lim} = \frac{20 \cdot A \cdot B \cdot C}{\sqrt{n}} = \frac{20 \cdot 0,7 \cdot 1,1 \cdot 0,7}{\sqrt{0,4845}} = 15,49$$

Efektivna duljina izvijanja za elemente sa konstantnim poprečnim presjekom l_0 određuje se prema izrazima sa slike:



Slika 28.: Prikaz duljine izvijanja ovisno o rubnim uvjetima (Izvor: [19])

Za elemente sa promjenjivim poprečnim presjekom ili raspodjelom uzdužne sile, efektivna duljina l_0 određuje se prema izrazu:

$$l_0 = \pi \sqrt{EI/N_B}$$

gdje je N_B uzdužna sila koja izaziva izvijanje elementa i računa se po Eulerovoj formuli:

$$N_B = \frac{n \cdot \pi^2 \cdot EI}{h^2}$$

n- koeficijent koji je za konzole 0,25

h- visina zgrade

EI- krutost konstrukcije, koja se računa po izrazu :

$$EI = K_c \cdot E_c \cdot I_c + K_s \cdot E_s \cdot I_s, \text{ gdje je:}$$

$$K_s = 1,0 \text{ za } \rho \geq 0,002$$

$$K_c = \frac{k_1 + k_2}{1 + \rho} = 1,225 + 0,20 = 1,425$$

$$\rho = 0$$

$$k_1 = \sqrt{\frac{f_{ck}}{20}} = \sqrt{\frac{30}{20}} = 1,225$$

$$k_2 = 0,30 \cdot \left[\frac{N_{Ed}}{f_{cd} \cdot A_c} \right] = 0,30 \cdot 0,4845 = 0,145 < 0,20 \rightarrow \text{mjerodavno}$$

Za određivanje momenata tromosti armature potrebno je pretpostaviti unutarnju i vanjsku armaturu prstena i to preko koeficijenta armiranja koji ovisi o klasi betona:

Za beton C30/37 - $\rho=0,0013$. Udaljenost od ruba prstena od težišta armature uzimamo $c=8$ cm.

Momente tromosti određujemo za srednje vrijednosti poprečnog presjeka tornja i to :

$$I_{c,dolje} = \pi \frac{(D^4 - d^4)}{64} = \pi \frac{(6,9^4 - 5,6^4)}{64} = 62,99 \text{ m}^4$$

$$I_{c,sredina} = \pi \frac{(D^4 - d^4)}{64} = \pi \frac{(6,6^4 - 5,9^4)}{64} = 33,66 \text{ m}^4$$

$$I_{c,gore} = \pi \frac{(D^4 - d^4)}{64} = \pi \frac{(6,5^4 - 6^4)}{64} = 24,01 \text{ m}^4$$

$$I_c = \frac{I_{c,dolje} + I_{c,sredina} + I_{c,gore}}{3} = 40,22 \text{ m}^4$$

Moment tromosti armature:

$$I_{s,dolje} = \pi(r_a^3 + r_i^3) \cdot t_{dolje} \cdot \rho$$

$$r_a = R_{dolje} - c = 3,45 - 0,07 = 3,47$$

$$r_i = R_{dolje} + c - t = 3,45 + 0,07 - 0,65 = 2,87$$

$$I_{s,dolje} = \pi(r_a^3 + r_i^3) \cdot t_{dolje} \cdot \rho = \pi(3,47^3 + 2,87^3) \cdot 0,65 \cdot 0,0013 = 0,1737 \text{ m}^4$$

$$I_{s,sredina} = \pi(r_a^3 + r_i^3) \cdot t_{sredina} \cdot \rho$$

$$r_a = R_{sredina} - c = 3,3 - 0,07 = 3,23$$

$$r_i = R_{sredina} + c - t = 3,3 + 0,07 - 0,35 = 3,02$$

$$I_{s,sredina} = \pi(r_a^3 + r_i^3) \cdot t_{sredina} \cdot \rho = \pi(3,23^3 + 3,02^3) \cdot 0,35 \cdot 0,0013 = 0,0875 \text{ m}^4$$

$$I_{s,gore} = \pi(r_a^3 + r_i^3) \cdot t_{gore} \cdot \rho$$

$$r_a = R_{gore} - c = 3,25 - 0,07 = 3,18$$

$$r_i = R_{gore} + c - t = 3,25 + 0,07 - 0,25 = 3,07$$

$$I_{s,gore} = \pi(r_a^3 + r_i^3) \cdot t_{gore} \cdot \rho = \pi(3,18^3 + 3,07^3) \cdot 0,25 \cdot 0,0013 = 0,0624 \text{ m}^4$$

$$I_s = \frac{I_{s,dolje} + I_{s,sredina} + I_{s,gore}}{3} = 0,1079 \text{ m}^4$$

Krutost konstrukcije:

$$EI = K_c \cdot E_c \cdot I_c + K_s \cdot E_s \cdot I_s$$

$$\alpha_E = \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{200000}{33000} = 6,06$$

$$EI = E_{cm}(K_c \cdot I_c + \alpha_E \cdot K_s \cdot I_s); (K_c \cdot I_c + \alpha_E \cdot K_s \cdot I_s) = I_{uk}$$

$$I_{uk} = (1,425 \cdot 40,22 + 6,06 \cdot 0,1079) = 57,97 \text{ m}^4$$

$$EI = E_{cm} \cdot I_{uk}$$

Efektivna duljina:

$$l_0 = \pi \sqrt{EI/N_B}$$

$$N_B = \frac{n \cdot \pi^2 \cdot EI}{h^2}$$

$$EI/N_B = \frac{\frac{EI}{1}}{\frac{n \cdot \pi^2 \cdot EI}{h^2}} = \frac{h^2}{n \cdot \pi^2}$$

$$l_0 = \pi \sqrt{\frac{h^2}{n \cdot \pi^2}} = \sqrt{\frac{h^2}{n}} = \sqrt{\frac{92^2}{0,25}} = 184 \text{ m}$$

Vitkost konstrukcije:

$$\lambda = \frac{l_0}{i}$$

$$i = \sqrt{\frac{I_{uk}}{A_c}} = \sqrt{\frac{57,97}{8,18}} = 2,66$$

$$\lambda = \frac{l_0}{i} = \frac{184}{2,66} = 69,17$$

Potrebno je uzeti u obzir učinke drugog reda, na način da se moment prvog reda, koji dobijemo linearnom analizom uvećamo za određeni faktor, koji računamo prema (EN 1992-1-1: 2004 točka 5.8.7.3.):

$$M_{Ed}^{II} = M_{Ed} \left[1 + \frac{\beta}{(N_B/N_{Ed}) - 1} \right]$$

Koeficijent β možemo uzeti 1 prema preporukama iz norme, te izraz poprima oblik:

$$M_{Ed}^{II} = \frac{M_{Ed}}{1 - (N_{Ed}/N_B)}$$

Moment savijanja od utjecaja opterećenja vjetrom računamo pomoću vrijednosti iz tablice iz poglavlja opterećenje vjetrom prema EN:

$$\begin{aligned} M_{Ed} = & 1,5 \cdot (162,02 \cdot 8,862 + 141,48 \cdot 17,188 + 40,92 \cdot 19,52 + 34,7 \cdot 20,522 + 154,9 \\ & \cdot 23,078 + 131,26 \cdot 26,62 + 193,78 \cdot 30,772 + 106,37 \cdot 37,018 + 14,11 \cdot 40,214 \\ & + 115,72 \cdot 44,926 + 14,87 \cdot 48,214 + 108,50 \cdot 52,476 + 42 \cdot 55,914 + 125,48 \cdot 60,926 \\ & + 16,11 \cdot 64,214 + 124,30 \cdot 68,746 + 90,07 \cdot 73 + 460,27 \cdot 79,738 + 134,01 \cdot 87,974 \\ & + 281,14 \cdot 114,87 + 73,27 \cdot 142,87 + 93,97 \cdot 161,67) = 167118,51 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$N_B = \frac{n \cdot \pi^2 \cdot EI}{h^2} = \frac{0,25 \cdot \pi^2 \cdot 34000 \cdot 57,97}{92^2} \cdot 10^3$$

$$N_B = 574574,459 \text{ kN} = 574,57 \text{ MN}$$

$$N_{Ed} = 78030,73 \text{ kN} = 78,03 \text{ MN}$$

$$N_{Ed}/N_B = 0,1358$$

$$M_{Ed}^{II} = \frac{M_{Ed}}{1 - (N_{Ed}/N_B)} = 1,16 \cdot M_{Ed}$$

Proračunske vrijednosti sile i momenta za dimenzioniranje:

$$M_{Ed}^I = 1,16 \cdot M_{Ed} = 193857,5 \text{ kNm} = 193,86 \text{ MNm}$$

$$N_{Ed,MAX} = 78030,73 \text{ kN} = 78,03 \text{ MN}$$

$$N_{Ed,MIN} = 42627,81 + 5952,97 = 48580,78 \text{ kN} = 48,58 \text{ MN}$$

Kombinacija 1- max N i max M

Bezdimenzijska vrijednost uzdužne sile:

$$n_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}} = \frac{-78030,73}{81800 \cdot 2,0} = -0,4770$$

Bezdimenzijska vrijednost momenta savijanja:

$$m_{Ed} = \frac{M_{Ed}^I}{A_c \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{19385750}{81800 \cdot 2 \cdot 347 \cdot 2,0} = 0,171$$

$$h = 2 \cdot r_a$$

Očitana vrijednost mehaničkog koeficijenta armiranja: $\omega_s=0,18$

Kombinacija 2- min N i max M

Bezdimenzijska vrijednost uzdužne sile:

$$n_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}} = \frac{-48580,78}{81800 \cdot 2,0} = -0,297$$

Bezdimenzijska vrijednost momenta savijanja:

$$m_{Ed} = \frac{M_{Ed}^I}{A_c \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{19385750}{81800 \cdot 2 \cdot 347 \cdot 2,0} = 0,171$$

$$h = 2 \cdot r_a$$

Očitana vrijednost mehaničkog koeficijenta armiranja: $\omega_s=0,2$ MJERODAVNO

Minimalna količina armature:

$$(1) A_{s,min} = 0,003 \cdot A_c = 0,003 \cdot 81800 = 245,4 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{HRN EN 1991-1-1}$$

$$(2) A_{s,min} = 0,15 \cdot \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} = 0,15 \cdot \frac{78030,73}{43,478} = 269,21 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{HRN EN 1991-1-1}$$

$$(3) A_{s,min} = 0,010 \cdot A_c = 0,010 \cdot 81800 = 818 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{EN 1998-1}$$

Mjerodavna je vrijednost iz uvjeta 3.

Maksimalna količina armature:

$$A_{s,max} = 0,04 \cdot A_c = 0,04 \cdot 81800 = 3272 \text{ cm}^2 \quad \rightarrow \text{EN 1998-1}$$

Potrebna površina armature za cijeli presjek:

$$A_{s,potrebno} = \omega_s \cdot A_c \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} = 0,2 \cdot 81800 \cdot \frac{2,0}{43,478} = 752,56 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,min} < A_{s,potrebno} < A_{s,max} \quad \text{NE ZADOVOLJAVA}$$

Mjerodavna potrebna površina armature za cijeli presjek uzima se $A_{s,min} = 818 \text{ cm}^2$

Opseg po kojem se postavlja armatura:

$$O_{dolje,vanjski} = 2\pi R_{dolje} = 2\pi \cdot 3,45 = 21,68 \text{ m}$$

$$O_{dolje,unutarnji} = 2\pi(R_{dolje} - t) = 2\pi \cdot 2,8 = 17,59 \text{ m}$$

$$O_{sredina,vanjski} = 2\pi R_{sredina} = 2\pi \cdot 3,3 = 20,73 \text{ m}$$

$$O_{sredina,unutarnji} = 2\pi(R_{sredina} - t) = 2\pi \cdot 2,95 = 18,54 \text{ m}$$

$$O_{gore,vanjski} = 2\pi R_{gore} = 2\pi \cdot 3,25 = 20,42 \text{ m}$$

$$O_{gore,unutarnji} = 2\pi(R_{gore} - t) = 2\pi \cdot 3 = 18,85 \text{ m}$$

$$O_{vanjski} = \frac{21,68 + 20,73 + 20,42}{3} = 20,94 \text{ m}$$

$$O_{unutarnji} = \frac{17,59 + 18,54 + 18,85}{3} = 18,33 \text{ m}$$

$$O_{ukupnoi} = 20,94 + 18,33 = 39,27 \text{ m}$$

Potrebna površina armature po metru dužine opsega:

$$\frac{A_{s,potrebno}}{O_{ukupno}} = \frac{818}{39,27} = 20,83 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Odabrana armatura po metru dužine opsega:

$$A_{s,odabrano} = 7 \varnothing 20 = 21,99 \text{ cm}^2/\text{m}$$

5.2. Određivanje učinaka drugog reda prema DIN-u

Prema pojednostavljenom postupku prema DIN-u

Omjer modula elastičnosti betona i čelika:

$$\alpha_E = \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{200000}{33000} = 6,06$$

Koeficijent armiranja vanjske i unutarnje armature:

Za beton C30/37 $\rightarrow \rho = 0,0013$

Udaljenost težišta armature do ruba prstena $c = 7$ cm.

Moment tromosti konstrukcije (bez koeficijenata):

$$I_{uk} = (40,22 + 6,06 \cdot 0,1079) = 40,87 \text{ m}^4$$

Karakteristična vrijednost momenta savijanja po teoriji prvog reda od djelovanja vjetra (poglavlje vjetar prema DIN-u):

$$\begin{aligned} M_k = & 49,45 \cdot 8,862 + 27,38 \cdot 17,188 + 11,73 \cdot 19,52 + 23,82 \cdot 20,522 + 160,20 \cdot 23,078 \\ & + 130,75 \cdot 26,62 + 185,19 \cdot 30,772 + 95,87 \cdot 37,018 + 12,80 \cdot 40,214 + 99,96 \cdot 44,926 \\ & + 12,94 \cdot 48,214 + 90,97 \cdot 52,476 + 35,35 \cdot 55,914 + 102,11 \cdot 60,926 + 13,21 \cdot 64,214 \\ & + 99,05 \cdot 68,746 + 51,42 \cdot 73 + 336,11 \cdot 79,738 + 102,66 \cdot 87,974 + 134,99 \cdot 114,87 \\ & + 19,33 \cdot 142,87 + 25,93 \cdot 161,67 = 106355,6 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Karakteristična vrijednost uzdužne sile od ukupnog stalnog opterećenja (izračunato u prethodnom poglavlju kod dimenzioniranja):

$$N_{G,k} = 42627,81 \text{ kN}$$

Karakteristična vrijednost uzdužne sile od uporabnog opterećenja (korisno opt.):

$$N_{Q,k} = 1630,07 + 4 \cdot 399,61 + 3915,05 = 7143,56 \text{ kN}$$

Popravni faktor

$$\alpha^2 = \frac{N_{Gk} \cdot h^2}{E_{cm} \cdot I_{uk}} = \frac{42,63 \cdot 92^2}{33000 \cdot 40,87} = 0,268$$

Moment savijanja drugog reda:

$$M_{Ed}^{II} = M_{Ed}(1 + 0,9 \cdot \alpha^2)$$

$$M_{Ed}^{II} = M_{Ed}(1 + 0,9 \cdot 0,268) = 1,24 \cdot M_{Ed}$$

5.2.1. Dimenzioniranje presjeka na dnu tornja

Proračunske vrijednosti sile i momenta za dimenzioniranje:

$$M_{Ed}^{II} = 1,24 \cdot M_{Ed} = 1,24 \cdot 1,50 \cdot 106355,6 = 197821,42 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed,MAX} = 78030,73 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,MIN} = 42627,81 + 5952,97 = 48580,78 \text{ kN}$$

$$A_c = \pi(R^2 - (R - t)^2) = \pi(3,45^2 - (3,45 - 0,65)^2) = 12,76 \text{ m}^2$$

Kombinacija 1 – max N i max M

Bezdimenzijska vrijednost uzdužne sile:

$$n_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}} = \frac{-78030,73}{127600 \cdot 2,0} = -0,3058$$

Bezdimenzijska vrijednost momenta savijanja:

$$m_{Ed} = \frac{M_{Ed}^{II}}{A_c \cdot r_a \cdot f_{cd}} = \frac{197821,42}{127600 \cdot 338 \cdot 2,0} = 0,2300$$

$$r_i/r_a = 2,89/3,38 = 0,86$$

Mehanički koeficijent armiranja ω_s očitava se sa dijagrama interakcije ovisno o omjeru radijusa do središta unutarnje i vanjske armature. U nastavku su dani dijagrami za omjer 0,7 i 0,8.

NAPOMENA – Izračunati omjer usporediti s 0,7 i 0,8 i odabrati dijagram interakcije koji je bliži dobivenom rezultatu.

Očitana vrijednost mehaničkog koeficijenta armiranja: $\omega_s = 0,12 \rightarrow$ **MJERODAVNO**

Kombinacija 1 – min N i max M

Bezdimenzijska vrijednost uzdužne sile:

$$n_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}} = \frac{-48580,78}{127600 \cdot 2,0} = -0,190$$

Bezdimenzijska vrijednost momenta savijanja:

$$m_{Ed} = \frac{M_{Ed}^I}{A_c \cdot r_a \cdot f_{cd}} = \frac{19782142}{127600 \cdot 338 \cdot 2,0} = 0,2300$$

Očitana vrijednost mehaničkog koeficijenta armiranja: $\omega_s=0$

Minimalna količina armature:

$$(1) A_{s,min} = 0,003 \cdot A_c = 0,003 \cdot 127600 = 382,8 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{HRN EN 1991-1-1}$$

$$(2) A_{s,min} = 0,15 \cdot \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} = 0,15 \cdot \frac{78030,73}{43,478} = 269,21 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{HRN EN 1991-1-1}$$

$$(3) A_{s,min} = 0,010 \cdot A_c = 0,010 \cdot 127600 = 1276 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{EN 1998-1}$$

Mjerodavna je vrijednost iz uvjeta 3.

Maksimalna količina armature:

$$A_{s,max} = 0,04 \cdot A_c = 0,04 \cdot 127600 = 5104 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{EN 1998-1}$$

Potrebna površina armature za cijeli presjek:

$$A_{s,potrebno} = \omega_s \cdot A_c \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} = 0,12 \cdot 127600 \cdot \frac{2,0}{43,478} = 704,36 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,min} < A_{s,potrebno} < A_{s,max} \quad \text{NE ZADOVOLJAVA}$$

Mjerodavna potrebna površina armature za cijeli presjek uzima se $A_{s,min} = 1276 \text{ cm}^2$

Opseg po kojemu se postavlja armatura:

$$O_{vanjska} = 2\pi R = 2\pi \cdot 3,45 = 21,68 \text{ m}$$

$$O_{unutarnja} = 2\pi(R - t) = 2\pi \cdot (3,45 - 0,65) = 17,59 \text{ m}$$

$$O_{ukupno} = 39,27 \text{ m}$$

Potrebna površina armature po metru dužine opsega na dnu tornja:

$$\frac{A_{s,potrebno}}{O_{ukupno}} = \frac{1276}{39,27} = 32,49 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Odabrana armatura po metru dužine opsega na dnu tornja:

$$A_{s,odabrano} = 11 \emptyset 20 = 34,56 \text{ cm}^2/\text{m}$$

5.2.2. Dimenzioniranje presjeka na sredini tornja

Proračunske vrijednosti sile i momenta za dimenzioniranje:

$$\begin{aligned}
 M_k &= 23,82 \cdot 20,522 + 160,20 \cdot 23,078 + 130,75 \cdot 26,62 + 185,19 \cdot 30,772 + 95,87 \\
 &\cdot 37,018 + 12,80 \cdot 40,214 + 99,96 \cdot 44,926 + 12,94 \cdot 48,214 + 90,97 \cdot 52,476 + 35,35 \\
 &\cdot 55,914 + 102,11 \cdot 60,926 + 13,21 \cdot 64,214 + 99,05 \cdot 68,746 + 51,42 \cdot 73 + 336,11 \\
 &\cdot 79,738 + 102,66 \cdot 87,974 + 134,99 \cdot 114,87 + 19,33 \cdot 142,87 + 25,93 \cdot 161,67 \\
 &= 105217,8 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

$$M_{Ed}^I = 1,24 \cdot M_{Ed} = 1,24 \cdot 1,50 \cdot 105217,8 = 195705,12 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed,MAX} = 78030,73 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,MIN} = 42627,81 + 5952,97 = 48580,78 \text{ kN}$$

$$A_c = \pi(R^2 - (R - t)^2) = \pi(3,3^2 - (3,3 - 0,35)^2) = 6,87 \text{ m}^2$$

$$r_a = 3,23 \text{ m} \quad r_i = 3,04 \text{ m} \quad r_i/r_a = 0,94$$

Kombinacija 1 – max N i max M

Bezdimenzijska vrijednost uzdužne sile:

$$n_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}} = \frac{-78030,73}{68700 \cdot 2,0} = -0,5679$$

Bezdimenzijska vrijednost momenta savijanja:

$$m_{Ed} = \frac{M_{Ed}^I}{A_c \cdot r_a \cdot f_{cd}} = \frac{19570512}{68700 \cdot 323 \cdot 2,0} = 0,4410$$

Očitana vrijednost mehaničkog koeficijenta armiranja: $\omega_s = 0,54 \rightarrow$ **MJERODAVNO**

Kombinacija 1 – min N i max M

Bezdimenzijska vrijednost uzdužne sile:

$$n_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}} = \frac{-48580,78}{68700 \cdot 2,0} = -0,3536$$

Bezdimenzijska vrijednost momenta savijanja:

$$m_{Ed} = \frac{M_{Ed}^I}{A_c \cdot r_a \cdot f_{cd}} = \frac{19782142}{68700 \cdot 323 \cdot 2,0} = 0,4410$$

Očitana vrijednost mehaničkog koeficijenta armiranja: $\omega_s=0,5$

Minimalna količina armature:

$$(1) A_{s,min} = 0,003 \cdot A_c = 0,003 \cdot 68700 = 206,1 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{HRN EN 1991-1-1}$$

$$(2) A_{s,min} = 0,15 \cdot \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} = 0,15 \cdot \frac{78030,73}{43,478} = 269,21 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{HRN EN 1991-1-1}$$

$$(3) A_{s,min} = 0,010 \cdot A_c = 0,010 \cdot 68700 = 687 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{EN 1998-1}$$

Mjerodavna je vrijednost iz uvjeta 3.

Maksimalna količina armature:

$$A_{s,max} = 0,04 \cdot A_c = 0,04 \cdot 68700 = 2748 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{EN 1998-1}$$

Potrebna površina armature za cijeli presjek:

$$A_{s,potrebno} = \omega_s \cdot A_c \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} = 0,54 \cdot 68700 \cdot \frac{2,0}{43,478} = 1706,52 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,min} < A_{s,potrebno} < A_{s,max} \quad \text{ZADOVOLJAVA}$$

Opseg po kojemu se postavlja armatura:

$$O_{vanjska} = 2\pi R = 2\pi \cdot 3,3 = 20,73 \text{ m}$$

$$O_{unutarnja} = 2\pi(R - t) = 2\pi \cdot (3,3 - 0,35) = 18,53 \text{ m}$$

$$O_{ukupno} = 39,26 \text{ m}$$

Potrebna površina armature po metru dužine opsega na dnu tornja:

$$\frac{A_{s,potrebno}}{O_{ukupno}} = \frac{1706,52}{39,26} = 43,47 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

Odabrana armatura po metru dužine opsega na dnu tornja:

$$A_{s,odabrano} = 9 \emptyset 25 = 44,18 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

5.2.3. Dimenzioniranje presjeka na gornjem djelu tornja

Karakteristična vrijednost uzdužne sile od stalnog djelovanja:

$$N_{G,k} = 592,17 + 2860,59 + 4731,28 + 33,55 + 216,34 = 8433,93 \text{ kN}$$

Karakteristična vrijednost uzdužne sile od dodatnog stalnog djelovanja:

$$N_{\Delta G,k} = 1358,39 \text{ kN}$$

Karakteristična vrijednost uzdužne sile od korisnog opterećenja:

$$N_{Q,k} = 1630,07 \text{ kN}$$

Karakteristična vrijednost uzdužne sile od djelovanja snijegom:

$$N_{s,k} = 628,2 \text{ kN}$$

Projektna vrijednost uzdužne sile:

$$N_{Ed} = \gamma_{G,j} \cdot (N_{G,k} + N_{\Delta G,k}) + \gamma_Q \cdot N_{Q,k,1} + \gamma_Q \cdot \psi_{0,2} \cdot N_{s,k,2} \rightarrow \text{Mjerodavno}$$

$$N_{Ed} = 1,35 \cdot (8433,93 + 1358,39) + 1,5 \cdot 1630,07 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 628,2 = 16230,12 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = \gamma_{G,j} \cdot (N_{G,k} + N_{\Delta G,k}) + \gamma_Q \cdot N_{s,k,1} + \gamma_Q \cdot \psi_{0,2} \cdot N_{Q,k,2}$$

$$N_{Ed} = 1,35 \cdot (8433,93 + 1358,39) + 1,5 \cdot 628,2 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot 1630,07 = 15873,51 \text{ kN}$$

Proračunske vrijednosti sile i momenta za dimenzioniranje:

$$M_k = 336,11 \cdot 79,738 + 102,66 \cdot 87,974 + 134,99 \cdot 114,87 + 19,33 \cdot 142,87 + 25,93 \\ \cdot 161,67 = 58292,23 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed}^I = 1,24 \cdot M_{Ed} = 1,24 \cdot 1,50 \cdot 58292,23 = 108423,55 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed,MAX} = 16230,12 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,MIN} = 8433,93 + 1358,39 = 9792,32 \text{ kN}$$

$$A_c = \pi(R^2 - (R - t)^2) = \pi(3,25^2 - (3,25 - 0,25)^2) = 4,91 \text{ m}^2$$

$$r_a = 3,18 \text{ m} \quad r_i = 3,09 \text{ m} \quad r_i/r_a = 0,97$$

Kombinacija 1 – max N i max M

Bezdimenzijska vrijednost uzdužne sile:

$$n_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}} = \frac{-16230,12}{49100 \cdot 2,0} = -0,1653$$

Bezdimenzijska vrijednost momenta savijanja:

$$m_{Ed} = \frac{M_{Ed}^I}{A_c \cdot r_a \cdot f_{cd}} = \frac{10842355}{49100 \cdot 318 \cdot 2,0} = 0,3472$$

Očitana vrijednost mehaničkog koeficijenta armiranja: $\omega_s = 0,26 \rightarrow$ **MJERODAVNO**

Kombinacija 1 – min N i max M

Bezdimenzijska vrijednost uzdužne sile:

$$n_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}} = \frac{-9792,32}{49100 \cdot 2,0} = -0,0997$$

Bezdimenzijska vrijednost momenta savijanja:

$$m_{Ed} = \frac{M_{Ed}^I}{A_c \cdot r_a \cdot f_{cd}} = \frac{10842355}{49100 \cdot 318 \cdot 2,0} = 0,3472$$

Očitana vrijednost mehaničkog koeficijenta armiranja: $\omega_s = 0,25$

Minimalna količina armature:

$$(1) A_{s,min} = 0,003 \cdot A_c = 0,003 \cdot 49100 = 147,3 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{HRN EN 1991-1-1}$$

$$(2) A_{s,min} = 0,15 \cdot \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} = 0,15 \cdot \frac{16230,12}{43,478} = 55,99 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{HRN EN 1991-1-1}$$

$$(3) A_{s,min} = 0,010 \cdot A_c = 0,010 \cdot 49100 = 491 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{EN 1998-1}$$

Mjerodavna je vrijednost iz uvjeta 3.

Maksimalna količina armature:

$$A_{s,max} = 0,04 \cdot A_c = 0,04 \cdot 49100 = 1964 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{EN 1998-1}$$

Potrebna površina armature za cijeli presjek:

$$A_{s,potrebno} = \omega_s \cdot A_c \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} = 0,26 \cdot 49100 \cdot \frac{2,0}{43,478} = 587,24 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,min} < A_{s,potrebno} < A_{s,max} \quad \text{ZADOVOLJAVA}$$

Opseg po kojemu se postavlja armatura:

$$O_{vanjska} = 2\pi R = 2\pi \cdot 3,25 = 20,42 \text{ m}$$

$$O_{unutarnja} = 2\pi(R - t) = 2\pi \cdot (3,25 - 0,25) = 18,85 \text{ m}$$

$$O_{ukupno} = 39,27 \text{ m}$$

Potrebna površina armature po metru dužine opsega na dnu tornja:

$$\frac{A_{s,potrebno}}{O_{ukupno}} = \frac{587,24}{39,27} = 14,95 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Odabrana armatura po metru dužine opsega na dnu tornja:

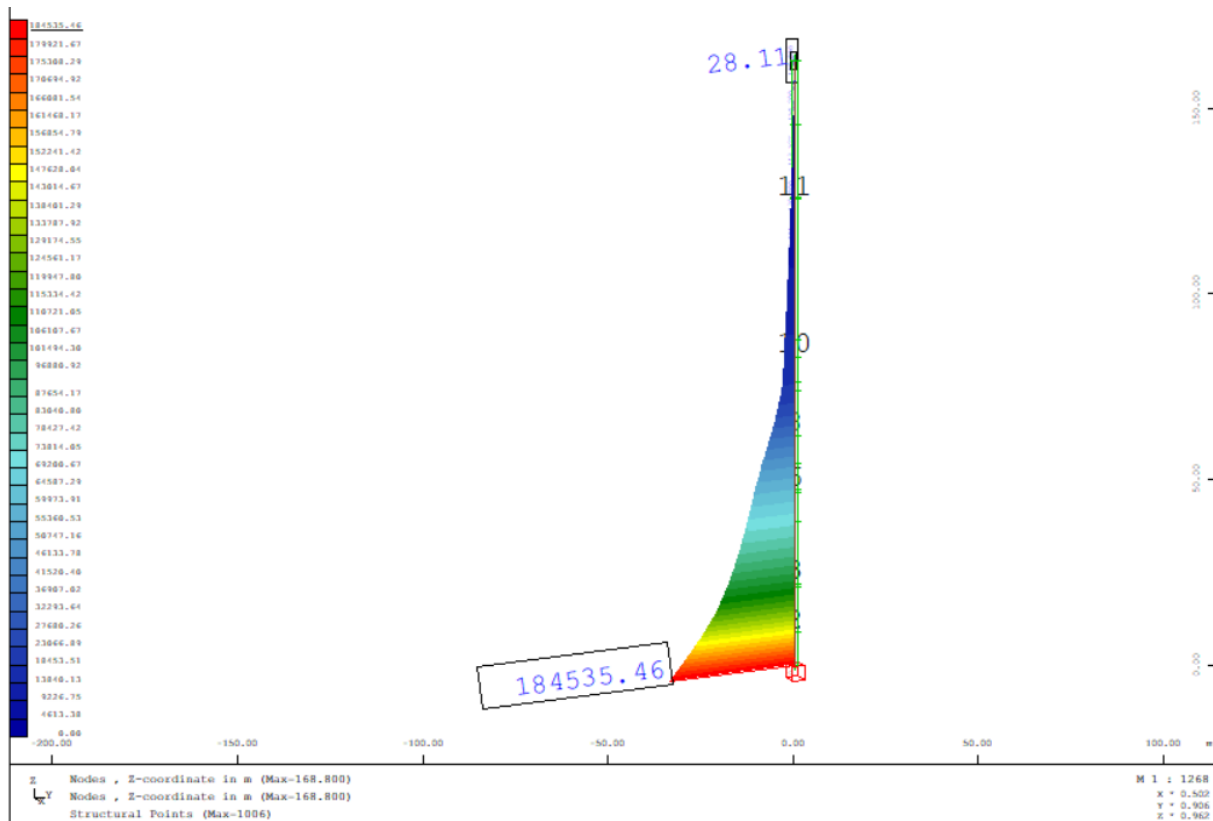
$$A_{s,odabrano} = 10 \text{ } \emptyset 14 = 15,39 \text{ cm}^2/\text{m}$$

5.3. Dimenzioniranje tornja na potresno opterećenje

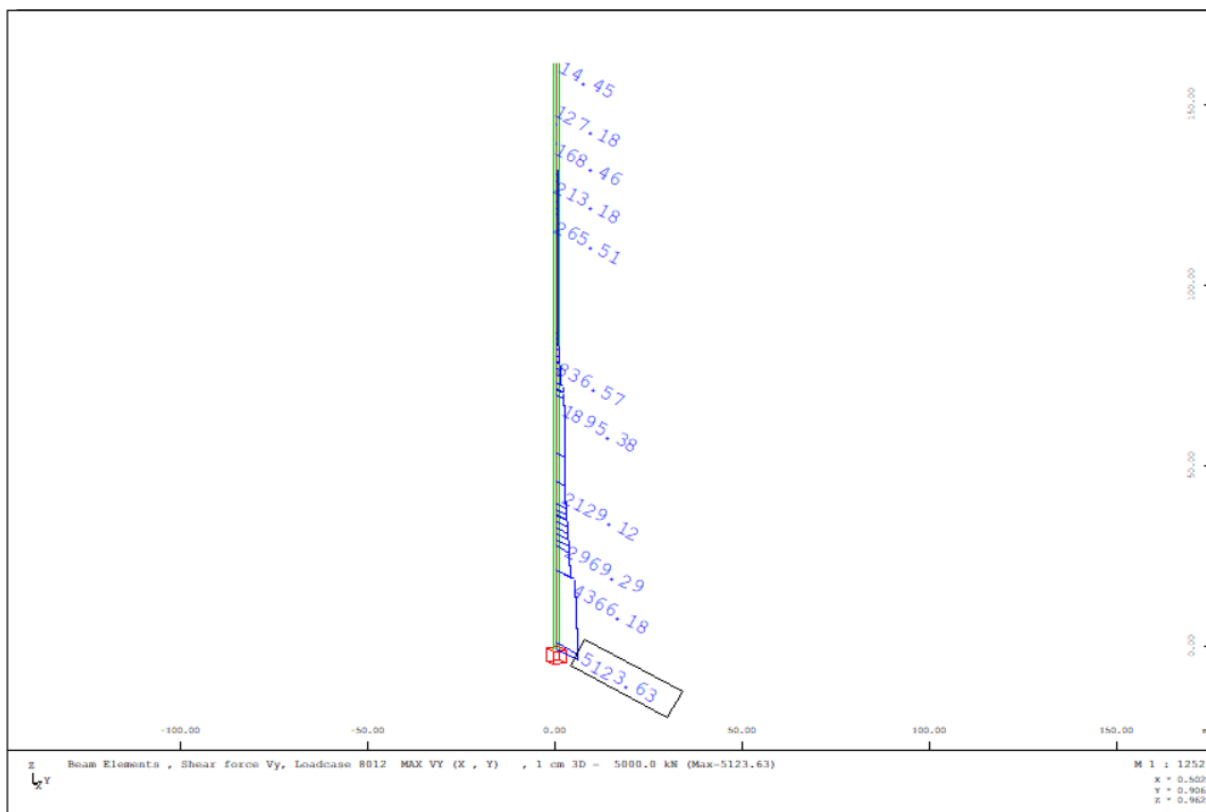
Provodi se dimenzioniranje tornja na potresno opterećenje u tri karakteristična presjeka, odnosno presjeka na dnu tornja gdje je debljina stijenke 65 cm, na srednjem djelu tornja kojemu je debljina stijenke 35 cm, te se još u proračun uzima presjek na gornjem dijelu betonskog dijela tornja gdje je debljina stijenke 25 cm.

5.3.1. Dimenzioniranje presjeka na dnu tornja

Proračunske vrijednosti sile i momenta za dimenzioniranje dobivene u proračunom na potresno opterećenje u programu Sofistik te su prikazane na Slici 29. i Slici 30. :



Slika 29.: Momentni dijagram potresnog opterećenja



Slika 30.: Uzdužne sile od potresnog opterećenja

$$M_{Ed} = 184535,46 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = 5123,63 \text{ kN}$$

$$A_c = \pi(R^2 - (R - t)^2) = \pi(3,45^2 - (3,45 - 0,65)^2) = 12,76 \text{ m}^2$$

Bezdimenzijska vrijednost uzdužne sile:

$$n_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}} = \frac{-5123,63}{127600 \cdot 2,0} = -0,02$$

Bezdimenzijska vrijednost momenta savijanja:

$$m_{Ed} = \frac{M_{Ed}^I}{A_c \cdot r_a \cdot f_{cd}} = \frac{18453546}{127600 \cdot 338 \cdot 2,0} = 0,21$$

$$r_i/r_a = 2,89/3,38 = 0,86$$

Očitana vrijednost mehaničkog koeficijenta armiranja: $\omega_s = 0,23$

Minimalna količina armature:

$$(1) A_{s,min} = 0,003 \cdot A_c = 0,003 \cdot 127600 = 382,8 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{HRN EN 1991-1-1}$$

$$(2) A_{s,min} = 0,15 \cdot \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} = 0,15 \cdot \frac{5123,63}{43,478} = 117,84 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{HRN EN 1991-1-1}$$

$$(3) A_{s,min} = 0,010 \cdot A_c = 0,010 \cdot 127600 = 1276 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{EN 1998-1}$$

Mjerodavna je vrijednost iz uvjeta 3.

Maksimalna količina armature:

$$A_{s,max} = 0,04 \cdot A_c = 0,04 \cdot 127600 = 5104 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{EN 1998-1}$$

Potrebna površina armature za cijeli presjek:

$$A_{s,potrebno} = \omega_s \cdot A_c \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} = 0,23 \cdot 127600 \cdot \frac{2,0}{43,478} = 1350,02 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,min} < A_{s,potrebno} < A_{s,max} \quad \text{ZADOVOLJAVA}$$

Opseg po kojemu se postavlja armatura:

$$O_{vanjska} = 2\pi R = 2\pi \cdot 3,45 = 21,68 \text{ m}$$

$$O_{unutarnja} = 2\pi(R - t) = 2\pi \cdot (3,45 - 0,65) = 17,59 \text{ m}$$

$$O_{ukupno} = 39,27 \text{ m}$$

Potrebna površina armature po metru dužine opsega na dnu tornja:

$$\frac{A_{s,potrebno}}{O_{ukupno}} = \frac{1350,02}{39,27} = 34,38 \text{ cm}^2/m$$

Odabrana armatura po metru dužine opsega na dnu tornja:

$$A_{s,odabrano} = 11 \text{ } \emptyset 20 = 34,56 \text{ cm}^2/m$$

5.3.2. Dimenzioniranje presjeka na sredini tornja

$$M_{Ed} = 106107,67 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = 4366,18 \text{ kN}$$

$$A_c = \pi(R^2 - (R - t)^2) = \pi(3,3^2 - (3,3 - 0,35)^2) = 6,87 \text{ m}^2$$

$$r_a = 3,23 \text{ m} \quad r_i = 3,04 \text{ m} \quad r_i/r_a = 0,94$$

Bezdimenzijska vrijednost uzdužne sile:

$$n_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}} = \frac{-4366,18}{68700 \cdot 2,0} = -0,032$$

Bezdimenzijska vrijednost momenta savijanja:

$$m_{Ed} = \frac{M_{Ed}^I}{A_c \cdot r_a \cdot f_{cd}} = \frac{10610767}{68700 \cdot 323 \cdot 2,0} = 0,24$$

Očitana vrijednost mehaničkog koeficijenta armiranja: $\omega_s = 0,26$

Minimalna količina armature:

$$(1) A_{s,min} = 0,003 \cdot A_c = 0,003 \cdot 68700 = 206,1 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{HRN EN 1991-1-1}$$

$$(2) A_{s,min} = 0,15 \cdot \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} = 0,15 \cdot \frac{4366,18}{43,478} = 100,42 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{HRN EN 1991-1-1}$$

$$(3) A_{s,min} = 0,010 \cdot A_c = 0,010 \cdot 68700 = 687 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{EN 1998-1}$$

Mjerodavna je vrijednost iz uvjeta 3.

Maksimalna količina armature:

$$A_{s,max} = 0,04 \cdot A_c = 0,04 \cdot 68700 = 2748 \text{ cm}^2 \quad \rightarrow \text{EN 1998-1}$$

Potrebna površina armature za cijeli presjek:

$$A_{s,potrebno} = \omega_s \cdot A_c \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} = 0,26 \cdot 68700 \cdot \frac{2,0}{43,478} = 821,66 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,min} < A_{s,potrebno} < A_{s,max} \quad \text{ZADOVOLJAVA}$$

Opseg po kojemu se postavlja armatura:

$$O_{vanjska} = 2\pi R = 2\pi \cdot 3,3 = 20,73 \text{ m}$$

$$O_{unutarnja} = 2\pi(R - t) = 2\pi \cdot (3,3 - 0,35) = 18,53 \text{ m}$$

$$O_{ukupno} = 39,26 \text{ m}$$

Potrebna površina armature po metru dužine opsega na dnu tornja:

$$\frac{A_{s,potrebno}}{O_{ukupno}} = \frac{821,66}{39,26} = 20,93 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Odabrana armatura po metru dužine opsega na dnu tornja:

$$A_{s,odabrano} = 7\emptyset 20 = 21,99 \text{ cm}^2/\text{m}$$

5.3.3. Dimenzioniranje presjeka na gornjem djelu tornja

$$M_{Ed} = 13840,13 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = 836,57 \text{ kN}$$

$$A_c = \pi(R^2 - (R - t)^2) = \pi(3,25^2 - (3,25 - 0,25)^2) = 4,91 \text{ m}^2$$

$$r_a = 3,18 \text{ m} \quad r_i = 3,09 \text{ m} \quad r_i/r_a = 0,97$$

Bezdimenzijska vrijednost uzdužne sile:

$$n_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}} = \frac{-836,57}{49100 \cdot 2,0} = -0,0085$$

Bezdimenzijska vrijednost momenta savijanja:

$$m_{Ed} = \frac{M_{Ed}^I}{A_c \cdot r_a \cdot f_{cd}} = \frac{1384013}{49100 \cdot 318 \cdot 2,0} = 0,029$$

Očitana vrijednost mehaničkog koeficijenta armiranja: $\omega_s = 0$

Minimalna količina armature:

$$(1) A_{s,min} = 0,003 \cdot A_c = 0,003 \cdot 49100 = 147,3 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{HRN EN 1991-1-1}$$

$$(2) A_{s,min} = 0,15 \cdot \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} = 0,15 \cdot \frac{836,57}{43,478} = 19,24 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{HRN EN 1991-1-1}$$

$$(3) A_{s,min} = 0,010 \cdot A_c = 0,010 \cdot 49100 = 491 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{EN 1998-1}$$

Mjerodavna je vrijednost iz uvjeta 3.

Maksimalna količina armature:

$$A_{s,max} = 0,04 \cdot A_c = 0,04 \cdot 49100 = 1964 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{EN 1998-1}$$

Potrebna površina armature za cijeli presjek:

$$A_{s,potrebno} = A_{s,min} = 491 \text{ cm}^2$$

Opseg po kojemu se postavlja armatura:

$$O_{vanjska} = 2\pi R = 2\pi \cdot 3,25 = 20,42 \text{ m}$$

$$O_{unutarnja} = 2\pi(R - t) = 2\pi \cdot (3,25 - 0,25) = 18,85 \text{ m}$$

$$O_{ukupno} = 39,27 \text{ m}$$

Potrebna površina armature po metru dužine opsega na dnu tornja:

$$\frac{A_{s,potrebno}}{O_{ukupno}} = \frac{491}{39,27} = 12,5 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Odabrana armatura po metru dužine opsega na dnu tornja:

$$A_{s,odabrano} = 9 \emptyset 14 = 13,86 \text{ cm}^2/\text{m}$$

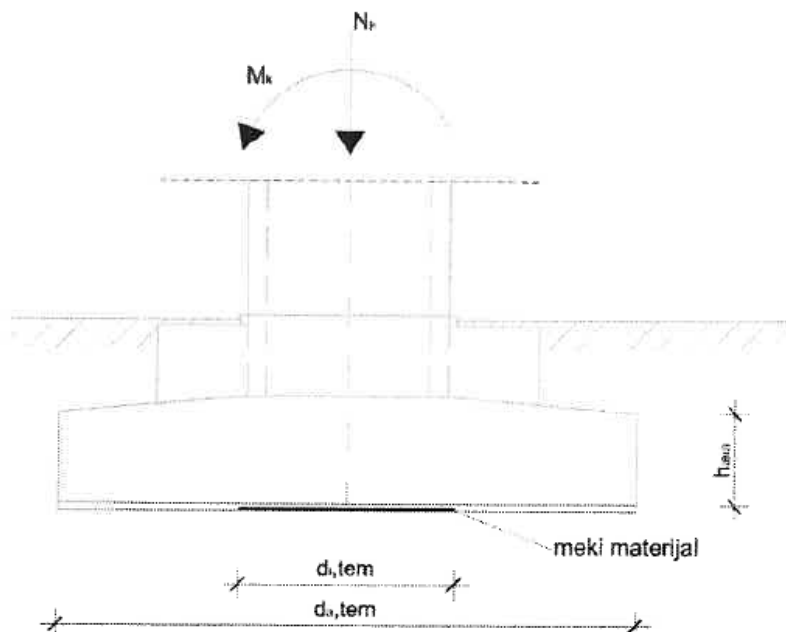
Potresno opterećenje je dinamičko, često s iznenadnim promjenama sile, što rezultira velikim momentima savijanja i deformacijama. Vjetar, s druge strane, predstavlja statičko ili kvazistatičko opterećenje koje se raspoređuje na duže vrijeme i relativno ravnomjerno djeluje na strukturu. Proračuni ukazuju na to da su momenti savijanja i sile uzrokovane vjetrom veće u odnosu na potresno opterećenje. To se može dogoditi u specifičnim konstrukcijama poput visokih tornjeva, gdje opterećenje vjetra može biti dominantno zbog velike visine i izloženosti površine. U ovakvim slučajevima, vjetar može generirati značajnije sile, posebno kada se kombinira sa stalnim opterećenjima.

Prema proračunu moment savijanja od vjetra iznosi 197821,42 kNm na dnu tornja, dok moment savijanja od potresa iznosi 183602,31 kNm na istom presjeku.

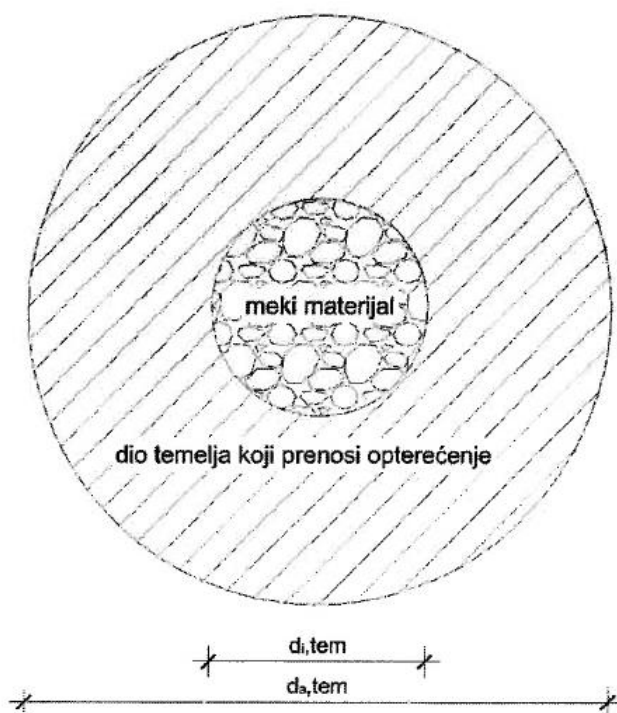
U tom slučaju, armatura se dimenzionira prema većim opterećenjima od vjetra, jer konstrukcija mora zadovoljiti uvjete stabilnosti prema najnepovoljnijem utjecaju.

6. PRORAČUN TEMELJNE STOPE

U promjeru od 7,0 m ispod centralnog dijela tornja postavljeno je 10 cm mekanog materijala kako bi se pritisak tla prenio po betonskom prstenu vanjskog promjera $d_{a,tem}$ i unutarnjeg promjera $d_{i,tem}$ što je prikazano na Slici 31 i 32.



Slika 31.: Prikaz opterećenja na temelj (Izvor: [3])



Slika 32.: Prikaz tlocrta temelja sa mekanom podlogom (Izvor: [3])

Površina dijela temelja koji prenosi opterećenje:

$$A_{tem} = \pi \frac{(d_{a,tem}^2 - d_{i,tem}^2)}{4} = \pi \frac{(20^2 - 6,9^2)}{4} = 276,77 \text{ m}^2$$

Moment otpora poprečnog presjeka temelja:

$$W_{tem} = \frac{I_P}{r} = \frac{\frac{1}{64} \cdot \pi (d_{a,tem}^4 - d_{i,tem}^4)}{\frac{d_{a,tem}}{2}} = \frac{\frac{1}{64} \cdot \pi (20^4 - 6,9^4)}{\frac{20}{2}} = 774,27 \text{ m}^3$$

Jezgra poprečnog presjeka temelja:

$$K = \frac{W_{tem}}{A_{tem}} = \frac{774,27}{276,77} = 2,8 \text{ m}$$

Ekscentricitet:

$$e_K = \frac{M_K}{N_K} = \frac{106355,6}{42627,81} = 2,49 \text{ m} < K = 2,8 \text{ m}$$

Dokazano je da se za ovaj slučaj opterećenja resultantna sila nalazi u jezgri poprečnog presjeka temelja.

Naprezanja na tlo pod karakterističnim opterećenjem:

$$\sigma_K = \frac{N_K}{A_{tem}} \pm \frac{M_K}{W_K} = \frac{42627,81}{276,77} \pm \frac{106355,6}{774,27} = 154,02 \pm 137,36 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_K = 0,154 \pm 0,137$$

$$\sigma_K = 0,291/0,017 \text{ MPa}$$

7. OCJENA NOSIVOSTI I UPORABLJIVOSTI KONSTRUKCIJE

U ovome se poglavlju određuje sigurnost tornja s postojećom armaturom, određenom u 5. poglavlju, na djelovanje vjetra prema europskim normama uz upotrebu nelinearnog proračuna. Provjeravaju se granična stanja nosivosti i granična stanja uporabivosti, a kao rezultat se dobivaju koeficijenti sigurnosti na cjelokupno promjenjivo djelovanje.

Za nelinearnu analizu potrebno je zadati odnose deformacija i naprezanja (radne dijagrame) za pojedini materijal. Materijalna nelinearnost modela zadaje se kod definiranja karakteristika materijala u Sofiplusu. Za radni dijagram betona EN 1992-1-1 predlaže sljedeći odnos:

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta}$$

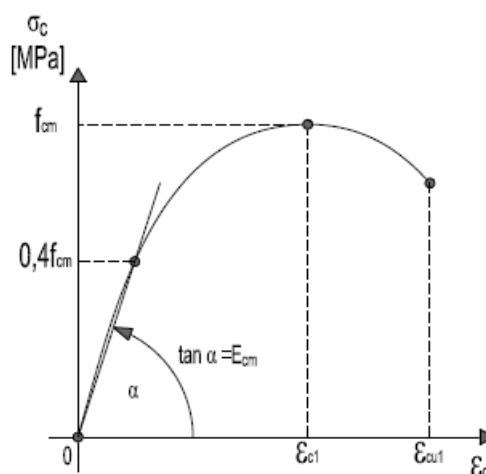
where:

$$\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1}$$

ε_{c1} is the strain at peak stress according to Table 3.1

$$k = 1,05 E_{cm} \times |\varepsilon_{c1}| / f_{cm} \quad (f_{cm} \text{ according to Table 3.1})$$

Vrijednosti ε_{c1} , ε_{cu1} , E_{cm} i f_{cm} dane su tablično za pojedinu klasu betona u normi EN 1992-1. Prema danim izrazima izračunate su vrijednosti naprezanja za pripadnu deformaciju. Dobivene vrijednosti ovise o usvojenoj klasi betona.



Slika 33.: Odnos naprezanja i deformacija za beton korišten u proračunu M/Φ dijagrama (Izvor: [19])

U nastavku je prikazano zadavanje deformacija i naprezanja za beton C30/37 i armaturu B500B.

Stress-Strain of calc. mean values	ϵ [o/oo]	σ -r[MPa]	E-t[N/mm ²]
Is only valid within the defined stress range	0.000	0.00	34080
	-0.250	-8.52	30720
	-0.500	-16.20	27240
	-0.750	-23.01	23560
	-1.000	-28.90	16520
	-1.250	-33.03	18920
	-1.500	-37.76	11480
	-1.750	-40.63	7080
	-2.000	-42.40	2400
	-2.250	-43.00	-2480
	-2.500	-42.38	-7640
	-2.750	-40.47	-13080
	-3.000	-37.20	-18760
	-3.250	-32.51	-24840
	-3.500	-26.30	0
Safetyfactor			(1.50)

Stress-Strain of calc. mean values	ϵ [o/oo]	σ -r[MPa]	E-t[N/mm ²]
Is also extended beyond the defined stress range	1000.000	540.00	0
	50.000	540.00	0
	2.500	500.00	842
	0.000	0.00	200000
	-2.500	-500.00	842
	-50.000	-540.00	0
	-1000.000	-540.00	0
Safetyfactor			(1.15)

Kod proračuna pukotina:

Stress-Strain of calc. mean values	ϵ [o/oo]	σ -r[MPa]	E-t[N/mm ²]
Is also extended beyond the defined stress range	1000.000	222.00	0
	50.000	222.00	0
	2.500	205.00	358
	0.000	0.00	82000
	-2.500	-205.00	358
	-50.000	-222.00	0
	-1000.000	-222.00	0
Safetyfactor			(1.15)

Za provjeru GSN proračun koeficijenta sigurnosti se provodi za dvije kombinacije:

1. kombinacija: $1,35G + \gamma_{GSN}(W + 0,7Q + 0,7S)$
2. kombinacija: $1,0G + \gamma_{GSN}W$

čime se pokriva povoljno i nepovoljno djelovanje stalnog opterećenja, a djelovanje vjetra, korisnog opterećenja i snijega se uzima u obzir odgovarajućim odnosima u skladu s europskom normom EN 1990.

Za provjeru GSU proračun koeficijenta sigurnosti se provodi za sljedeće tri kombinacije s povoljnim djelovanjem stalnog opterećenja i odgovarajućim odnosima djelovanja vjetra, korisnog opterećenja i snijega.

3. kombinacija: $1,0G + \gamma_{GSU,progib}(0,2W + 0,3Q + 0,2S)$

Provodi se za navedenu čestu kombinaciju nelinearni proračun u kojem se koeficijent sigurnosti za cjelokupno promjenjivo djelovanje očita za granični progib tornja (H/500).

4. kombinacija: $1,0G + \gamma_{GSU,naprezanja}(1,0W + 0,7Q + 0,7S)$

Za napisanu karakterističnu kombinaciju treba utvrditi koeficijent sigurnosti, pri čemu se nelinearni proračun provodi s ograničenim naprezanjima u betonu ($0,6f_{ck}$) i armaturi ($0,8f_{yk}$).

5. kombinacija: $1,0G + \gamma_{GSU,pukotine}(0,2W + 0,6Q + 0,2S)$

Kontrola pukotina provodi se za čestu kombinaciju.

7.1. Ocjena GSN tornja – djelovanje vjetra prema europskim normama

Djelovanja na toranj prikazana u programu Sofistic s naglaskom na djelovanje vjetra prema

EN:

```

1 +PROG SOFILOAD urs:30.1
2 HEAD OPTERECENJA
3
4 LC NO 1 DLZ -1 TYPE NONE TITL 'VLATITA TEZINA TORNJA' $ VLASTITA TEZINA TORNJA I ANTENE PO METRU DUZINE - POVRSINA PRESJEKA x TEZINA BETONA
5
6 LC NO 2 TYPE NONE TITL 'DODATNO STALNO DJELOVANJE'
7 NODE NO 9 TYPE PZZ P1 -6090 $ TEZINA PLATFORME A
8 NODE NO 8 TYPE PZZ P1 -1341 $ TEZINA PLATFORME B
9 NODE NO 7 TYPE PZZ P1 -1341 $ TEZINA PLATFORME B
10 NODE NO 5 TYPE PZZ P1 -1341 $ TEZINA PLATFORME B
11 NODE NO 4 TYPE PZZ P1 -1341 $ TEZINA PLATFORME B
12 NODE NO 3 TYPE PZZ P1 -13888 $ TEZINA PLATFORME C
13 NODE NO 10 TYPE PZZ P1 -3110 $ TEZINA STUBISTA + TEZINA DIZALA
14 NODE NO 6 TYPE PZZ P1 -11945 $ TEZINA STUBISTA + TEZINA DIZALA
15 NODE NO 2 TYPE PZZ P1 -7756 $ TEZINA STUBISTA + TEZINA DIZALA
16 NODE NO 11 TYPE PZZ P1 -592 $ TEZINA ANTENE
17
18
19 LC NO 3 TYPE NONE TITL 'KORISNO OPTERECENJE'
20 NODE NO 9 TYPE PZZ P1 -1630.07 $ PLATFORMA A KORISNO
21 NODE NO 8 TYPE PZZ P1 -399.61 $ PLATFORMA B KORISNO
22 NODE NO 7 TYPE PZZ P1 -399.61 $ PLATFORMA B KORISNO
23 NODE NO 5 TYPE PZZ P1 -399.61 $ PLATFORMA B KORISNO
24 NODE NO 4 TYPE PZZ P1 -399.61 $ PLATFORMA B KORISNO
25 NODE NO 3 TYPE PZZ P1 -3915.05 $ PLATFORMA C KORISNO
26
27
28 LC NO 4 TYPE NONE TITL 'OPTERECENJE SNIJEGOM'
29 NODE NO 9 TYPE PZZ P1 -601.3 $ PLATFORMA A
30 NODE NO 8 TYPE PZZ P1 -386.29 $ PLATFORMA B
31 NODE NO 7 TYPE PZZ P1 -386.29 $ PLATFORMA B
32 NODE NO 5 TYPE PZZ P1 -386.29 $ PLATFORMA B
33 NODE NO 4 TYPE PZZ P1 -386.29 $ PLATFORMA B
34 NODE NO 3 TYPE PZZ P1 -1043.62 $ PLATFORMA C
35
36
37 LC NO 5 TYPE NONE TITL 'VJETAR EN'
38 LINE REF BGRP 1 TITL 'VJETAR' TYPE PXX P1 0 Z1 0 P2 10.97 Z2 14.77
39 LINE REF BGRP 1 TITL 'VJETAR' TYPE PXX P1 10.97 Z1 14.77 P2 35.11 Z2 18.80
40 LINE REF BGRP 1 TITL 'VJETAR' TYPE PXX P1 33.39 Z1 18.80 P2 34.10 Z2 20.00
41 LINE REF BGRP 1 TITL 'VJETAR' TYPE PXX P1 39.35 Z1 20.00 P2 39.91 Z2 20.87
42 LINE REF BGRP 1 TITL 'VJETAR' TYPE PXX P1 39.91 Z1 20.87 P2 42.10 Z2 24.55
43 LINE REF BGRP 1 TITL 'VJETAR' TYPE PXX P1 36.48 Z1 24.55 P2 38.05 Z2 28.00
44 LINE REF BGRP 1 TITL 'VJETAR' TYPE PXX P1 40 Z1 28.00 P2 41.94 Z2 32.62
45 LINE REF BGRP 1 TITL 'VJETAR' TYPE PXX P1 13.65 Z1 32.62 P2 14.51 Z2 39.95
46 LINE REF BGRP 1 TITL 'VJETAR' TYPE PXX P1 31.96 Z1 39.95 P2 32.06 Z2 40.39
47 LINE REF BGRP 1 TITL 'VJETAR' TYPE PXX P1 14.56 Z1 40.39 P2 15.31 Z2 47.95
48 LINE REF BGRP 1 TITL 'VJETAR' TYPE PXX P1 33.71 Z1 47.95 P2 33.80 Z2 48.39
49 LINE REF BGRP 1 TITL 'VJETAR' TYPE PXX P1 15.35 Z1 48.39 P2 15.93 Z2 55.2
50 LINE REF BGRP 1 TITL 'VJETAR' TYPE PXX P1 35.08 Z1 55.2 P2 35.30 Z2 56.39
51 LINE REF BGRP 1 TITL 'VJETAR' TYPE PXX P1 16.03 Z1 56.39 P2 16.60 Z2 63.95
52 LINE REF BGRP 1 TITL 'VJETAR' TYPE PXX P1 36.55 Z1 63.95 P2 36.62 Z2 64.39
53 LINE REF BGRP 1 TITL 'VJETAR' TYPE PXX P1 16.63 Z1 64.39 P2 17.12 Z2 71.65
54 LINE REF BGRP 1 TITL 'VJETAR' TYPE PXX P1 17.12 Z1 71.65 P2 40.03 Z2 73.90
55 LINE REF BGRP 1 TITL 'VJETAR' TYPE PXX P1 40.03 Z1 73.90 P2 47.30 Z2 83.63
56 LINE REF BGRP 1 TITL 'VJETAR' TYPE PXX P1 18.11 Z1 83.63 P2 18.51 Z2 90.87
57 LINE REF BGRP 1 TITL 'VJETAR' TYPE PXX P1 6.40 Z1 90.87 P2 7.03 Z2 130.87
58 LINE REF BGRP 1 TITL 'VJETAR' TYPE PXX P1 3.54 Z1 130.87 P2 3.66 Z2 150.87
59 LINE REF BGRP 1 TITL 'VJETAR' TYPE PXX P1 5.08 Z1 150.87 P2 5.22 Z2 168.87
60

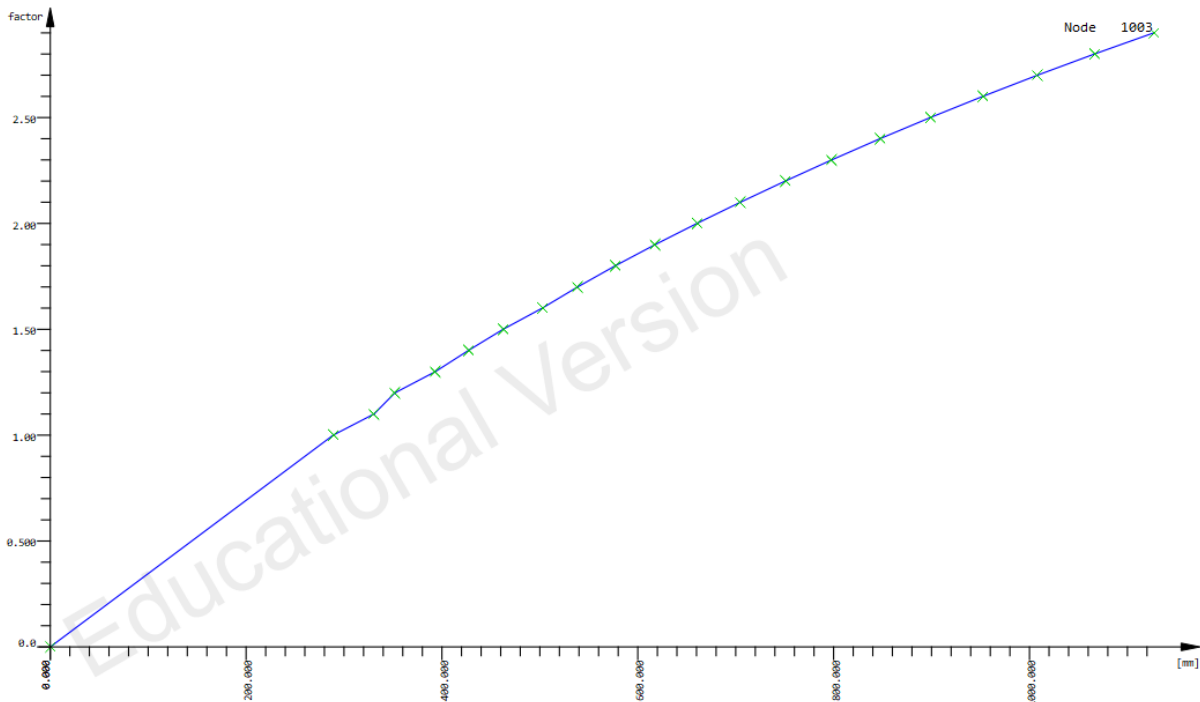
```


1. kombinacija

```

61 $Granicno stanje nosivosti
62 $-----
63 $ 1.35*(G+DS) + 1.5(W+0.7Q+0.7S)
64
65 LET#G1 1.35 $ FAKTOR SIGURNOSTI ZA STALNO OPTERECENJE
66 LET#Q1 1.50 $ FAKTOR SIGURNOSTI ZA KORISNO OPTERECENJE
67 LET#W1 1.50 $ FAKTOR SIGURNOSTI ZA DJELOVANJE VJETRA
68 LET#S1 1.50 $ FAKTOR SIGURNOSTI ZA DJELOVANJE SNIJEGOM
69 LET#PSIQ1 0.7 $ FAKTOR KOMBINACIJE ZA KORISNO DJELOVANJE
70 LET#PSIS1 0.7 $ FAKTOR KOMBINACIJE ZA KORISNO SNIJEG
71
72 LC 51 TYPE NONE TITL 'GSN_1' ; COPY 2 FACT #G1/#G1; COPY 3 FACT #Q1*#PSIQ1/#G1; COPY 5 FACT #W1/#G1; COPY 4 FACT #S1*#PSIS1/#G1
73
1 +PROG ASE urs:9
2 HEAD GSN-stalna ili prolazna kombinacija-nepovoljnja
3 ECHO FULL EXTR $ REGULIRANJE ISPISA
4 ULTI 20 FAK1 2 DFAK 0.1 PRO 1 DL YES PRIM NO
5 $ DEFINIRANJE NELINEARNOG PRORACUNA
6 CTRL OPT ITER 3 V2 1
7 SYST PROB TH3 ITER 100 TOL 0.01
8 NSTR KMOD SN KSV CAL KSB CAL $ SL
9 GRP ALL
10 LC NO 401 DLZ 1 FACT 1.0
11 LCC 51 ULTI YES
12 END

```



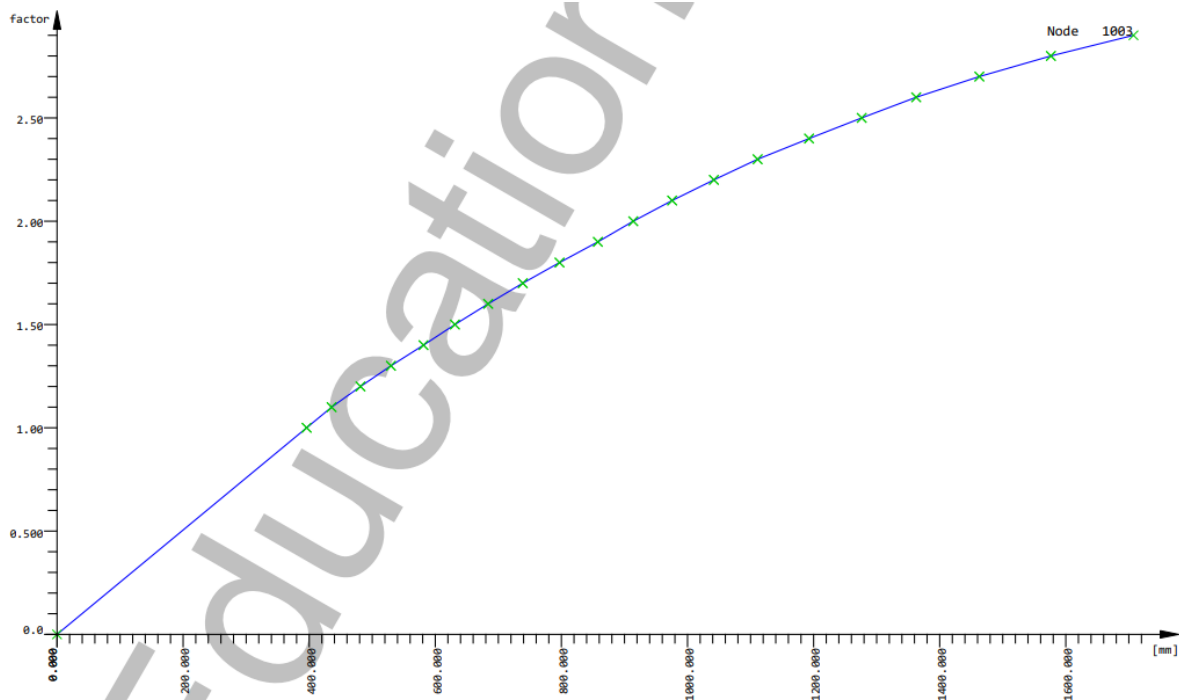
Koeficijent sigurnosti tornja na promjenjivo djelovanje za 1. kombinaciju iznosi 2,8.

2. kombinacija

```

74
75 $Granicno stanje nosivosti
76 $-----
77 $ 1.0*(G+DS) + 1.5W
78
79 LET#G1 1.0 $ FAKTOR SIGURNOSTI ZA STALNO OPTERECENJE
80 LET#Q1 0 $ FAKTOR SIGURNOSTI ZA KORISNO OPTERECENJE
81 LET#W1 1.50 $ FAKTOR SIGURNOSTI ZA DJELOVANJE VJETRA
82 LET#S1 0 $ FAKTOR SIGURNOSTI ZA DJELOVANJE SNIJEGOM
83 LET#PSIQ1 0.7 $ FAKTOR KOMBINACIJE ZA KORISNO DJELOVANJE
84 LET#PSIS1 0.7 $ FAKTOR KOMBINACIJE ZA KORISNO SNIJEG
85
86 LC 52 TYPE NONE TITL 'GSN_2' ; COPY 2 FACT #G1/#G1; COPY 3 FACT #Q1*#PSIQ1/#G1; COPY 5 FACT #W1/#G1; COPY 4 FACT #S1*#PSIS1/#G1
87
1 |*!Caption GSN 1.0G+1.5/1.0*W
2 +PROG ASE urs:10
3 HEAD GSN-stalna ili prolazna kombinacija-povoljna
4 ECHO FULL EXTR $ REGULIRANJE ISPISA
5 ULTI 20 FAK1 1.0 DFAK 0.1 PRO 1 DL YES PRIM NO
6 $ DEFINIRANJE NELINEARNOG PRORACUNA
7 CTRL OPT ITER 3 V2 1
8 SYST PROB TH3 ITER 30 TOL 0.01
9 NSTR KMOD SN KSV CAL KSB CAL $ SL
10 GRP ALL
11
12 LET#fact 1.5/1.00 $sve svedeno na faktor vlastite tezine
13
14 LC NO 501 DLZ 1 FACT 1.0
15 LCC 52 ULTI YES
16 END

```



Koeficijent sigurnosti tornja na promjenjivo djelovanje za 2. kombinaciju iznosi 2,9.

7.2. Ocjena GSU tornja – djelovanje vjetra prema europskim normama

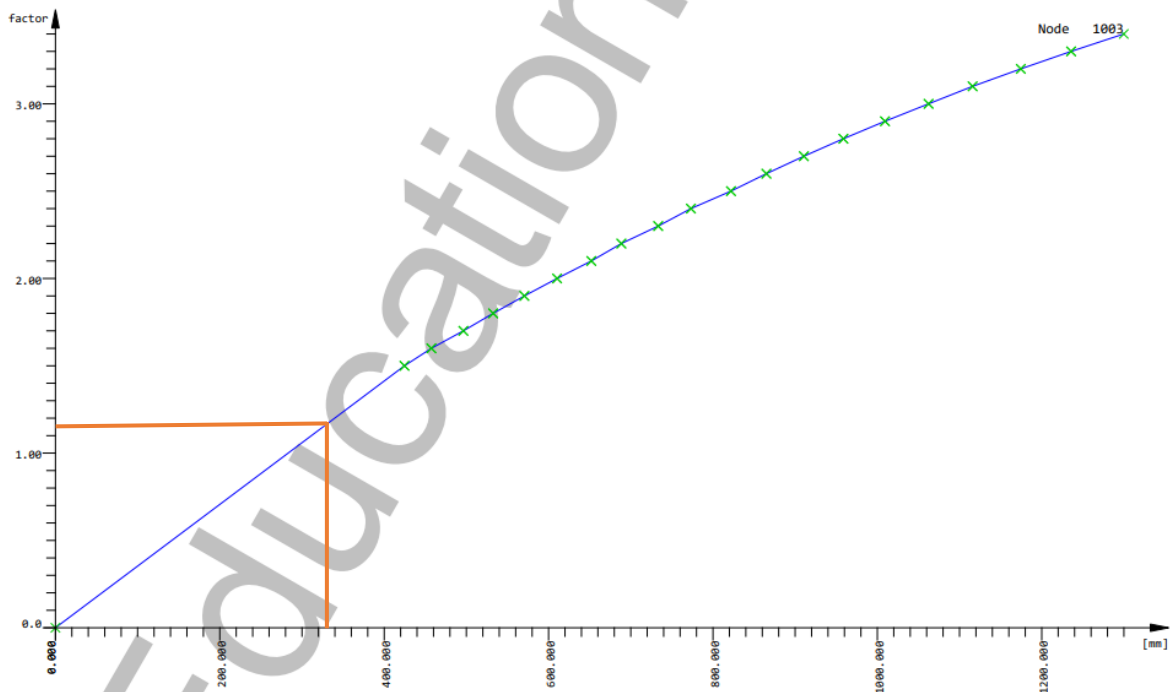
3. kombinacija

```

94 $Granicno stanje uporabivosti - granicni pomak
95 $-----
96 $ 1.0*(G+DS) + 1.0*(0.2W+0.3Q+0.2S)
97
98 LET#G1 1.0 $ FAKTOR SIGURNOSTI ZA STALNO OPTERECENJE
99 LET#Q1 1.0 $ FAKTOR SIGURNOSTI ZA KORISNO OPTERECENJE
100 LET#W1 1.0 $ FAKTOR SIGURNOSTI ZA DJELOVANJE VJETRA
101 LET#S1 1.0 $ FAKTOR SIGURNOSTI ZA DJELOVANJE SNIJEGOM
102 LET#PSIQ1 0.3 $ FAKTOR KOMBINACIJE ZA KORISNO DJELOVANJE
103 LET#PSIS1 0.2 $ FAKTOR KOMBINACIJE ZA KORISNO SNIJEG
104 LET#PSIW1 0.2 $ FAKTOR KOMBINACIJE ZA KORISNO VJETAR
105
106 LC 61 TYPE NONE TITL 'GSU_1' ; COPY 1,2 FACT #G1/#G1; COPY 3 FACT #Q1*#PSIQ1/#G1; COPY 5 FACT #W1/#G1; COPY 4 FACT #S1*#PSIS1/#G1

1 !*!Caption GSU 1.0G+1.0*(0.2W+0.3Q+0.2S)-Progib
2 +PROG ASE urs:6
3 HEAD GSU-Progib
4 ECHO FULL EXTR $ REGULIRANJE ISPISA
5 ULTI 20 FAK1 1.5 DFAK 0.1 PRO 1 DL YES PRIM NO
6 $ DEFINIRANJE NELINEARNOG PRORACUNA
7 CTRL OPT ITER 3 V2 1
8 SYST PROB TH3 ITER 30 TOL 0.01
9 NSTR KMOD SN KSV CAL KSB CAL $ SL
10 GRP ALL
11 LC NO 601 DLZ 1 FACT 1.0
12 LCC 61 ULTI YES
13 END

```



Granični pomak jednak je $\frac{H}{500} = \frac{168,87}{500} = 33,8 \text{ cm}$ što odgovara koeficijentu sigurnosti tornja na promjenjivo djelovanje 1,15.

4. kombinacija

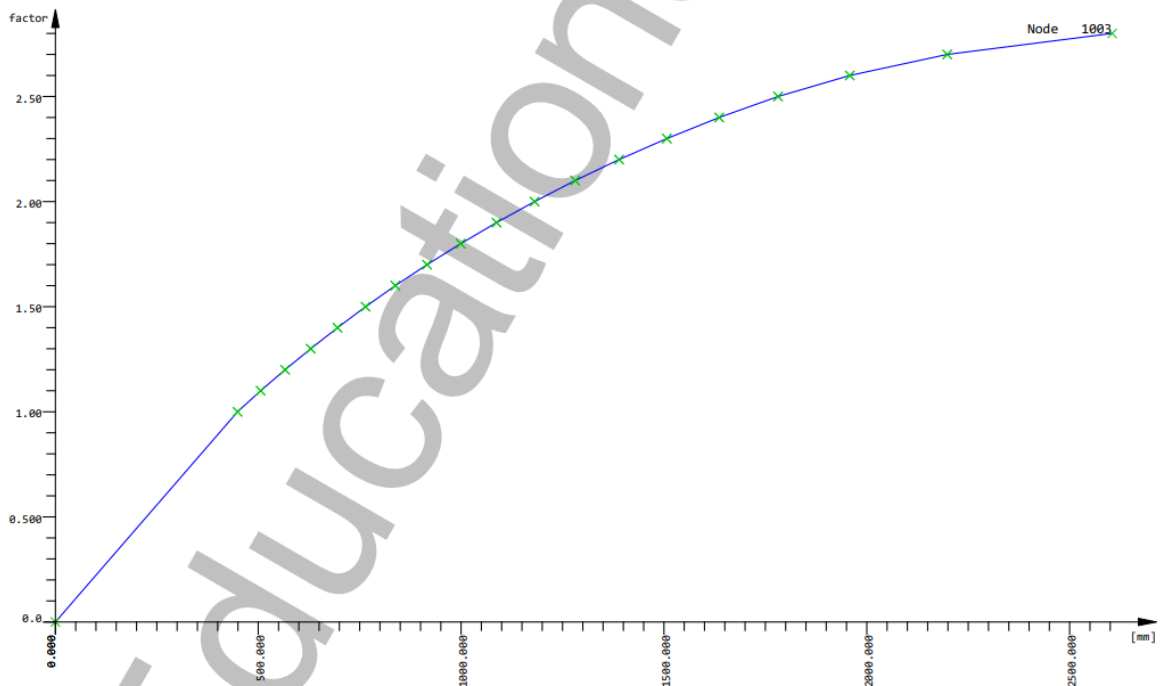
Za navedenu karakterističnu kombinaciju provodi se kontrola naprezanja u betonu ($0,6 f_{ck}$) i armaturi ($0,8 f_{yk}$).

```

108 $Granicno stanje uporabivosti - naprezanja u betonu i armaturi
109 $-----
110 $ 1.0*(G+DS) + 1.0*(1.0W+0.7Q+0.7S)
111
112 LET#G1 1.0 $ FAKTOR SIGURNOSTI ZA STALNO OPTERECENJE
113 LET#Q1 1.0 $ FAKTOR SIGURNOSTI ZA KORISNO OPTERECENJE
114 LET#W1 1.0 $ FAKTOR SIGURNOSTI ZA DJELOVANJE VJETRA
115 LET#S1 1.0 $ FAKTOR SIGURNOSTI ZA DJELOVANJE SNIJEGOM
116 LET#PSIQ1 0.7 $ FAKTOR KOMBINACIJE ZA KORISNO DJELOVANJE
117 LET#PSIS1 0.7 $ FAKTOR KOMBINACIJE ZA KORISNO SNIJEG
118 LET#PSIW1 1.0 $ FAKTOR KOMBINACIJE ZA KORISNO VJETAR
119
120 LC 62 TYPE NONE TITL 'GSU_2' ; COPY 1,2 FACT #G1/#G1; COPY 3 FACT #Q1*#PSIQ1/#G1; COPY 5 FACT #W1/#G1; COPY 4 FACT #S1*#PSIS1/#G1

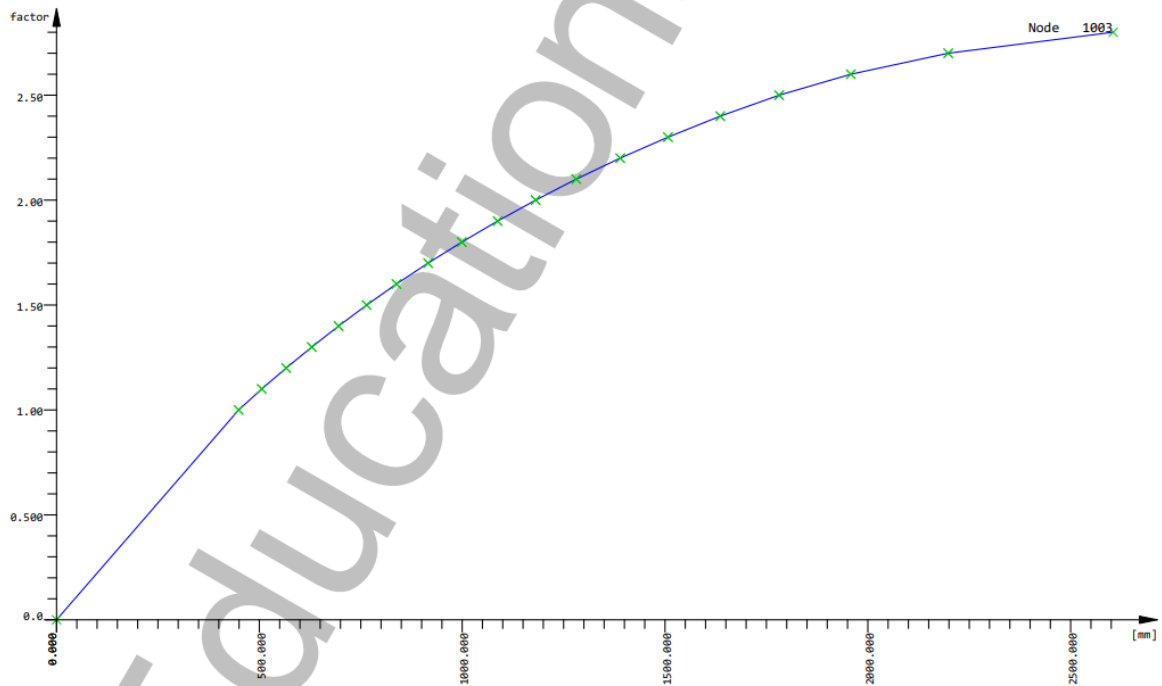
1 !*!Caption GSU 1.0G+1.0*(1.0W+0.7Q+0.7S) 0.6fck
2 +PROG ASE urs:5
3 HEAD GSU-Naprezanja
4 ECHO FULL EXTR $ REGULIRANJE ISPISA
5 ULTI 20 FAK1 1.0 DFAK 0.1 PRO 1 DL YES PRIM NO
6 $ DEFINIRANJE NELINEARNOG PRORACUNA
7 CTRL OPT ITER 3 V2 1
8 SYST PROB TH3 ITER 30 TOL 0.01
9 NSTR KMOD SN KSV CAL KSB CAL $ SL
10 GRP ALL
11 LC NO 701 DLZ 1 FACT 1.0
12 LCC 62 ULTI YES
13 END

```



Koeficijent sigurnosti tornja na promjenjivo djelovanje za 4. kombinaciju iznosi 2,8.

```
1 !*!Caption GSU 1.0G+1.0*(1.0W+0.7Q+0.7S) 0.8fyk
2 +PROG ASE urs:11
3 HEAD GSU-Naprezanja
4 ECHO FULL EXTR $ REGULIRANJE ISPISA
5 ULTI 20 FAK1 1.0 DFAK 0.1 PRO 1 DL YES PRIM NO
6 $ DEFINIRANJE NELINEARNOG PRORACUNA
7 CTRL OPT ITER 3 V2 1
8 SYST PROB TH3 ITER 30 TOL 0.01
9 NSTR KMOD SN KSV CAL KSB CAL $ SL
10 GRP ALL
11 LC NO 701 DLZ 1 FACT 1.0
12 LCC 62 ULTI YES
13 END
```



Koeficijent sigurnosti tornja na promjenjivo djelovanje za 4. kombinaciju iznosi 2,7.

5. kombinacija

```

122 $Granicno stanje uporabivosti - kontrola pukotina
123 $-----
124 $ 1.0*(G+DS) + 1.0*(0.2W+0.6Q+0.2S)
125
126 LET#G1 1.0 $ FAKTOR SIGURNOSTI ZA STALNO OPTERECENJE
127 LET#Q1 1.0 $ FAKTOR SIGURNOSTI ZA KORISNO OPTERECENJE
128 LET#W1 1.0 $ FAKTOR SIGURNOSTI ZA DJELOVANJE VJETRA
129 LET#S1 1.0 $ FAKTOR SIGURNOSTI ZA DJELOVANJE SNIJEGOM
130 LET#PSIQ1 0.6 $ FAKTOR KOMBINACIJE ZA KORISNO DJELOVANJE
131 LET#PSIS1 0.2 $ FAKTOR KOMBINACIJE ZA KORISNO SNIJEG
132 LET#PSIW1 0.2 $ FAKTOR KOMBINACIJE ZA KORISNO VJETAR
133
134 LC 63 TYPE NONE TITL 'GSU_3' ; COPY 1,2 FACT #G1/#G1; COPY 3 FACT #Q1*#PSIQ1/#G1; COPY 5 FACT #W1/#G1; COPY 4 FACT #S1*#PSIS1/#G1
135 END

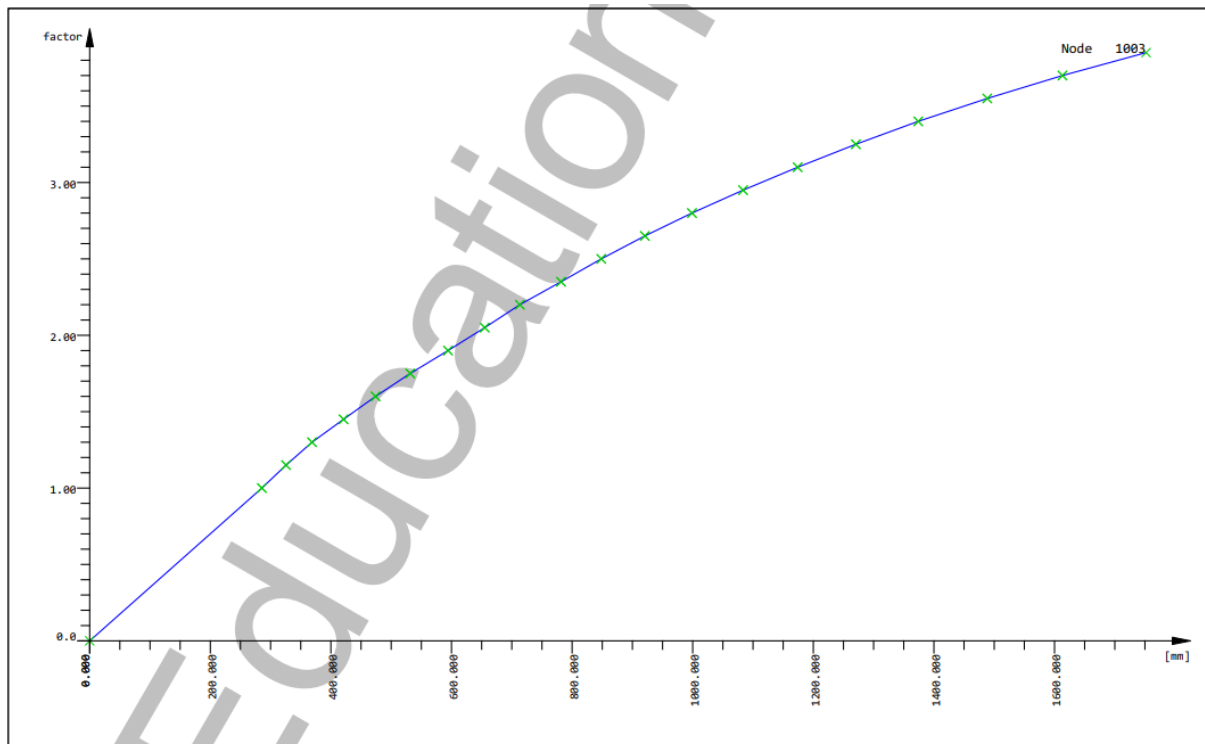
```

TAB. 7.2 N [2] Naprezanja [Mpa]	Maksimalni promjer šipke armature [mm]		
	$W_k=0.4$ mm	$W_k=0.3$ mm	$W_k=0.2$ mm
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	5
400	8	6	4
450	6	5	-

TAB. 7.3 N [2] Naprezanja [Mpa]	Maksimalni razmak šipke armature [mm]		
	$W_k=0.4$ mm	$W_k=0.3$ mm	$W_k=0.2$ mm
160	300	300	200
200	300	250	150
240	250	200	100
280	200	150	50
320	150	100	-
360	100	50	-

Prema uvjetima maksimalnog promjera šipke maksimalna dopuštena naprezanja su 200 MPa, a prema uvjetima iz tablice s maksimalnim razmakom šipka armatruie interpolacijom je dobiveno 312 MPa što znači da je mjerodavno maksimalno dopušteno naprezanje 200 MPa.

```
1 !*!Caption GSU 1.0G+1.0*(0.2W+0.6Q+0.2S) ogranicena naprezanja u armaturi ovisno o pukotinama
2 +PROG ASE urs:7
3 HEAD GSU-Pukotine
4 ECHO FULL EXTR $ REGULIRANJE ISPISA
5 ULTI 20 FAK1 1.0 DFAK 0.2 PRO 1 DL YES PRIM NO
6 $ DEFINIRANJE NELINEARNOG PRORACUNA
7 CTRL OPT ITER 3 V2 1
8 SYST PROB TH3 ITER 30 TOL 0.01
9 NSTR KMOD SN KSV CAL KSB CAL $ SL
10 GRP ALL
11 LC NO 801 DLZ 1 FACT 1.0
12 LCC 63 ULTI YES
13 END
```



Koeficijent sigurnosti tornja na promjenjivo djelovanje za 5. kombinaciju iznosi 3,85.

8. ZAKLJUČAK

Zaključak ovog rada temelji se na usporedbi rezultata proračuna vjetrovnog opterećenja armiranobetonskog tornja prema njemačkim normama DIN i europskim normama EN 1991-1-4, te analizi djelovanja drugih opterećenja poput seizmičkog djelovanja i stalnih opterećenja. Kroz rad je obrađena važnost točnog definiranja parametara opterećenja i metoda proračuna kako bi se osigurala sigurnost i dugovječnost konstrukcije.

Prvi korak u postupku bio je prikupljanje podataka i rekonstrukcija nacрта tornja, nakon čega je izrađen štapni model u programu **SOFiSTiK**, uzimajući u obzir geometriju tornja te promjene promjera poprečnog presjeka trupa i antene. Nakon toga su izračunata stalna i korisna opterećenja, a opterećenje snijegom određeno je prema EN 1991-1-3.

Proračun prema DIN normama pokazao je ravnomjerniju raspodjelu opterećenja vjetrom po visini tornja s nešto manjim maksimalnim vrijednostima u usporedbi s europskim normama. Iako su opterećenja po visini tornja bila uravnoteženija, najveće koncentracije opterećenja bile su zabilježene na srednjim visinama betonskog dijela tornja, što odražava značaj statičkog dijela pritiska u kombinaciji s dinamičkim faktorima koji djeluju na strukturu. Maksimalno opterećenje od vjetra prema DIN-u iznosilo je 39,328 kN/m na pogonskoj platformi, što je očekivano za ovakve visoke konstrukcije.

S druge strane, proračun prema EN normama omogućio je detaljniju analizu stvarnih deformacija i naprezanja kroz nelinearni proračun, koji je imao za cilj odrediti razinu sigurnosti tornja pod postojećim djelovanjima, posebno na višim dijelovima tornja, gdje su se aerodinamički koeficijenti i faktori turbulencije pokazali presudnima. Ova metoda proračuna preciznije prikazuje stvarne uvjete na konstrukciji, što je rezultiralo većim vrijednostima opterećenja na turističkoj platformi (oko 4730 kN/m). U nelinearnom proračunu, stalno i dodatno stalno opterećenje zadržano je konstantnim, dok su promjenjiva opterećenja, uključujući vjetar, snijeg i korisno opterećenje, linearno povećavana do sloma za GSN ili do prestanka uporabivosti za GSU. To potvrđuje da nelinearna analiza prema europskim normama pruža sigurniji i detaljniji pristup kod visokih i vitkih konstrukcija pod djelovanjem jakih vjetrova.

Što se tiče seizmičkog proračuna, oba su pristupa ponudila zadovoljavajuće rezultate, s time da europska norma više naglašava nelinearne efekte i utjecaj kombiniranih opterećenja. Razlike u rezultatima između dva pristupa su očekivane, s obzirom na različite pristupe analizi opterećenja vjetrom i nelinearnih efekata, ali oba sustava proračuna potvrđuju stabilnost i otpornost tornja na predviđena opterećenja.

Zaključno, rad pokazuje važnost pravilnog dimenzioniranja tornjeva prema različitim normama te prednost primjene nelinearnog proračuna prema europskim normama, posebno u uvjetima gdje konstrukcija mora izdržati opterećenja poput vjetra i potresa.

POPIS LITERATURE

- [1] Schreiber W.F. Advanced television systems for terrestrial broadcasting: Some problems and some proposed solutions. *Proceedings of the IEEE*, June 1995, Volume 83 Issue: 6, 958 – 981 str.
Dostupno: <https://ieeexplore.ieee.org/document/387095/authors#authors>
[pristupljeno 27.04.2024.]
- [2] Leonhardt F. MODERN DESIGN OF TELEVISION TOWERS. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*; lipanj 1970, Volume 46 Issue 3: 265-291 str.
Dostupno: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/iicep.1970.6728>
[pristupljeno 27.04.2024.]
- [3] Mandić Ivanković A. Betonski tornjevi -osnovni dijelovi, temeljenje, proračun i dimenzioniranje. *Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagreb*. [pristupljeno 28.04.2024.]
- [4] https://www.tripadvisor.com/Attraction_Review-g187291-d243380-Reviews-Fernsehturm_Stuttgart-Stuttgart_Baden_Wuerttemberg.html [pristupljeno 28.04.2024.]
- [5] Holgate A. Towers; Sibylle Schlaich, *The Art of Structural Engineering: The Work of Jörg Schlaich and His Team*, Stuttgart/London, Edition Axel Menges; 1997, 29-43 str.
Dostupno: https://books.google.hr/books/about/The_Art_of_Structural_Engineering.html?id=VPG6p93AWVIC&redir_esc=y [pristupljeno 28.04.2024.]
- [6] Reiff A., Burkhardt B. Repairs of the Stuttgart Television Tower. *ICOMOS – Hefte des Deutschen Nationalkomitees*, 21. kolovoz 2020: 52-58 str.
Dostupno: <https://doi.org/10.11588/ih.2020.0.75096> [pristupljeno 28.04.2024.]
- [7] Bock T., Linner T., Miura S. Robotic High-Rise Construction of Pagoda Concept: innovative earthquake-proof Design for the Tokyo Sky Tree. *Why Tall?*
CTBUH 2011 World conference, 10.-12. listopada 2011: 659-669 str. [pristupljeno 22.06.2024.]
- [8] https://hr.wikipedia.org/wiki/Ostankinski_televizijski_toranj#/media/Datoteka:Tallest_towers_in_the_world.PNG [pristupljeno 22.06.2024.]
- [9] Bock T., Linner T., Miura S. Robotic High-Rise Construction of Pagoda Concept: innovative earthquake-proof Design for the Tokyo Sky Tree. *Why Tall?*
CTBUH 2011 World conference, 10.-12. listopada 2011: 659-669 str. [pristupljeno 22.06.2024.]

- [10] <https://www.ibtimes.com/tokyo-skytree-worlds-tallest-tower-opens-japan-photos-699475> [pristupljeno 22.06.2024.]
- [11] Nakai M., Hirakawa K., Yamanaka M., Okuda H., Konishi A. Performance-based Wind-resistant Design for High-rise Structures in Japan, *International Journal of High-Rise Buildings*, rujan 2013, Vol 2 No 3, 271-283 str.
Dostupno:<https://koreascience.kr/article/JAKO201308160369206.pdf> [pristupljeno 25.6.2024.]
- [12] Mandujano-Salazar YY. Tokyo Tower and Tokyo Skytree: History and Symbolism in Contemporary Japan, *Revista Gremium®*, prosinac 2016, Volume 3 Special Issue SI1, 11-21 str.
Dostupno:
<https://pdfs.semanticscholar.org/8957/5e1e56d1b3481321c8135c1d610082fc8fa2.pdf>
[pristupljeno 26.6.2024]
- [13] <https://www.triptojapan.com/tours/tokyo-skytree-tickets-panoramic-views/199725161>
[pristupljeno 26.6.2024]
- [14] Haraldsen E., Østrødt K., Davidrajuh R. Understanding the Importance of Efficient Visitor Flow within Tokyo Skytree, *International Journal of Simulation- Systems, Science & Technology*, travanj 2021, Volume 22 Issue 1, 7.1-7.8 str.
Dostupno:<https://uis.brage.unit.no/uis-xmlui/bitstream/handle/11250/3049523/Postnr%2b1990902.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [pristupljeno 5.7.2024.]
- [15] Konishi A., Emura M. Structural Design and Construction of the Foundation of TOKYO SKYTREE, *International Journal of High-Rise Buildings*, prosinac 2015, Vol 4 No 4, 249-259 str.
Dostupno:<https://global.ctbuh.org/resources/papers/2624-249-259%20%2001.Atsumi%20Konishi.pdf> [pristupljeno 7.7.2024.]
- [16] <https://muza-chan.net/japan/index.php/blog/tokyo-sky-tree-photo-report> [pristupljeno 7.7.2024.]
- [17] Szolomicki J., Golasz-Szolomicka H. Tokyo Skyscrapers: Technologically Advanced Structures in Seismic Areas, *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Architectural and Environmental Engineering*, 2019, Vol 13 No 4, 213-223 str.
Dostupno:
https://www.academia.edu/79739546/Tokyo_Skyscrapers_Technologically_Advanced_Structures_in_Seismic_Areas [pristupljeno 10.7.2024.]

- [18] Japan finishes 'Sky Tree' - world's tallest communications tower, *PHYS ORG*,
<https://phys.org/news/2012-03-japan-finishes-sky-tree-.html> [pristupljeno 12.7.2024.]
- [19] <https://repositorij.hzn.hr/norm/HRN+ENV+1991-2-1%3A2005> [pristupljeno 1.8.2024.]
- [20] <https://repositorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+1991-1-4%3A2012> [pristupljeno 1.9.2024.]
- [21] Karte potresnih područja RH. Dostupno: <http://seizkarta.gfz.hr/hazmap/karta.php>
[pristupljeno 10.9.2024.]

POPIS SLIKA

Slika 1.: Osnovni dijelovi telekomunikacijskog tornja (Izvor: [3])	4
Slika 2.: Temelji s geotehničkim sidrima, kružne ploče i stožasti temelji (Izvor: [3])	5
Slika 3.: Ovješene i klasične konzolne platforme (Izvor: [3]).....	6
Slika 4.: Stuttgartski televizijski toranj (Izvor: [4])	9
Slika 5.: Temelj Stuttgartskog TV tornja (Izvor: [5]).....	12
Slika 6.: Usporedba najviših TV tornjeva na svijetu (Izvor: [8]).....	14
Slika 7.: Oblici dijelova tornja (Izvor: [10])	16
Slika 8.: Kombinacija shimbashire i najsuvremenijih prigušivaća (Izvor: [9]).....	17
Slika 9.: Tokyo Skytree noću (Izvor: [13])	19
Slika 10.: Tokyo Skytree noću (Izvor: [9])	20
Slika 11.: Postavljanje čelične mreže oko jezgre (Izvor: [16]).....	21
Slika 12.: Karta opterećenja snijegom u Hrvatskoj (Izvor: [19])	41
Slika 13.: Koeficijenti oblika opterećenja od snijega (Izvor: [19])	42
Slika 14.: Vjetrovne zone prema njemačkim normama (Izvor: [3])	49
Slika 15.: Model tornja i rezultirajući horizontalni pomaci iz Sofistika.....	52
Slika 16.: Izlazni podaci programa Sofistik	53
Slika 17.: Kategorija zemljišta (Izvor: [3])	61
Slika 18.: Osnovni koeficijent sile (Izvor: [20])	63
Slika 19.: Proračunska vitkost (Izvor: [20])	64
Slika 20.: Koeficijent redukcije uslijed vitkosti (Izvor: [20]).....	65
Slika 21.: Dijagram opterećenja od vjetra na toranj: prema postojećoj dokumentaciji (lijevo), prema njemačkim normama (sredina), prema europskoj normi (desno).....	72
Slika 22.: Ulazni podaci za Sofistik.....	73
Slika 23.: Prvi oblik titranja (translacija u X smjeru).....	74
Slika 24.: Drugi oblik titranja (translacija u Y smjeru)	74
Slika 25.: Treći oblik titranja (translacija u X smjeru)	75
Slika 26.: Vršno ubrzanje tla (Izvor: [21])	78
Slika 27.: Proračunski spektar odgovora	78
Slika 28.: Prikaz duljine izvijanja ovisno o rubnim uvjetima (Izvor: [19])	80
Slika 29.: Momentni dijagram potresnog opterećenja	94
Slika 30.: Uzdužne sile od potresnog opterećenja	94
Slika 31.: Prikaz opterećenja na temelj (Izvor: [3]).....	100
Slika 32.: Prikaz tlocrta temelja sa mekanom podlogom (Izvor: [3])	100
Slika 33.: Odnos naprezanja i deformacija za beton korišten u proračunu M/Φ dijagrama (Izvor: [19])	102

POPIS TABLICA

Tablica 1.: Karakteristične vrijednosti opterećenja snijegom s_k na različitim nadmorskim visinama u pojedinim zonama (Izvor: [19])	42
Tablica 2.: Tlak vjetra na karakterističnim visinama	49
Tablica 3.: Statički tlak vjetra na karakterističnim visinama	50
Tablica 4.: Dinamički tlak vjetra na karakterističnim visinama	55
Tablica 5.: Ukupan tlak vjetra na karakterističnim visinama	56
Tablica 6.: Opterećenje vjetra prema DIN-u na karakterističnim visinama	58
Tablica 7.: Vršni pritisak brzine vjetra	62
Tablica 8.: Koeficijent sile c_f	65
Tablica 9.: Ekvivalentne mase po segmentima tornja	69
Tablica 10.: Opterećenje vjetra prema EN-u na karakterističnim visinama.....	70

PRILOZI

Prilog 1: Presjek kroz toranj (I-I)

Prilog 2: Tlocrt montažne platforme (A-A) i strojarnice (B-B)

Prilog 3: Tlocrt vidikovca (C-C)

Prilog 4: Tlocrt restorana (D-D)

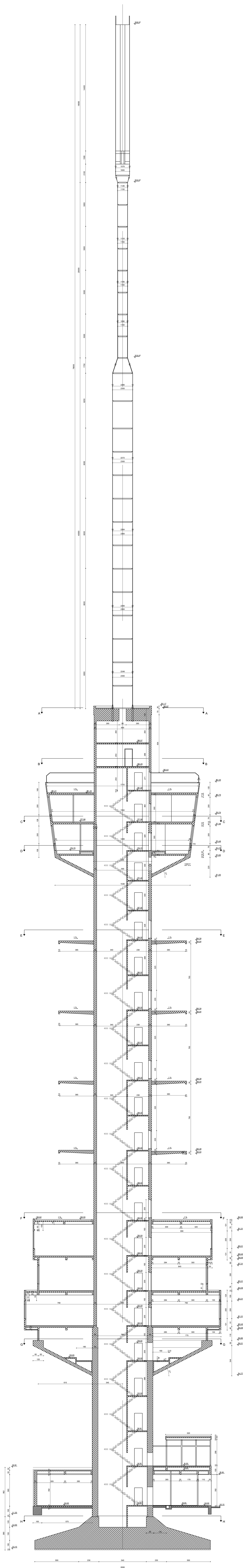
Prilog 5: Tlocrt platforme za antene (E-E)

Prilog 6: Tlocrt pogonske kupole (F-F)

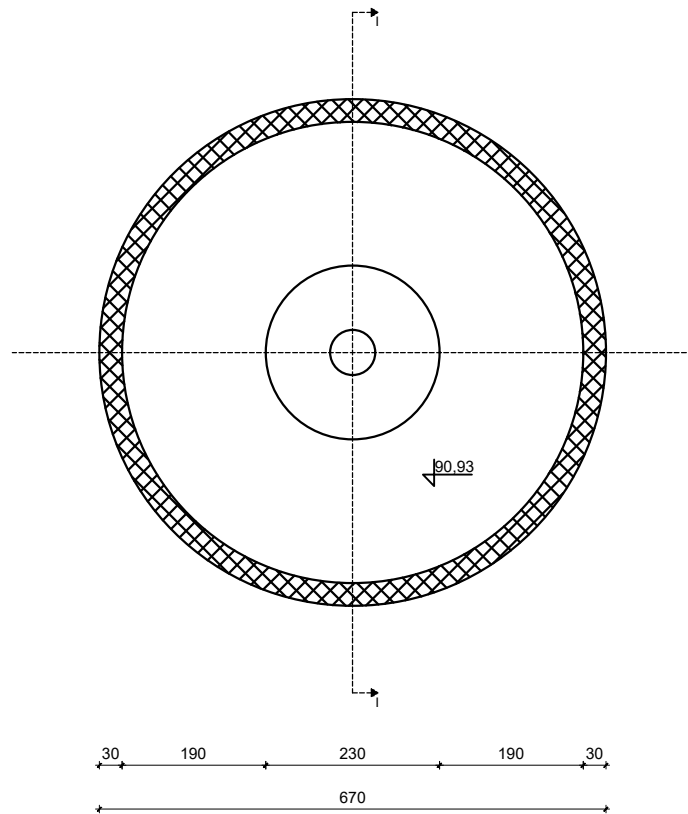
Prilog 7: Tlocrt presjeka G-G

Prilog 8: Tlocrt temelja (H-H)

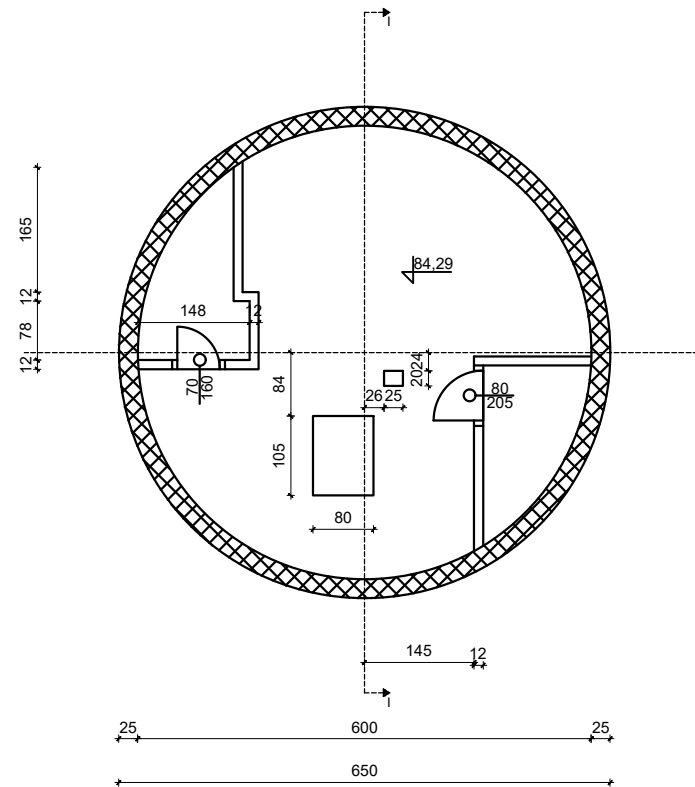
Prilog 9: Nacrt armature



PRESJEK A-A, MJ 1:50



PRESJEK B-B, MJ 1:50



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

KOLEGIJ:

DIPLOMSKI RAD

MJERILO:

SADRŽAJ:

Tlocrt montažne platforme
(A-A) i strojarnice (B-B)

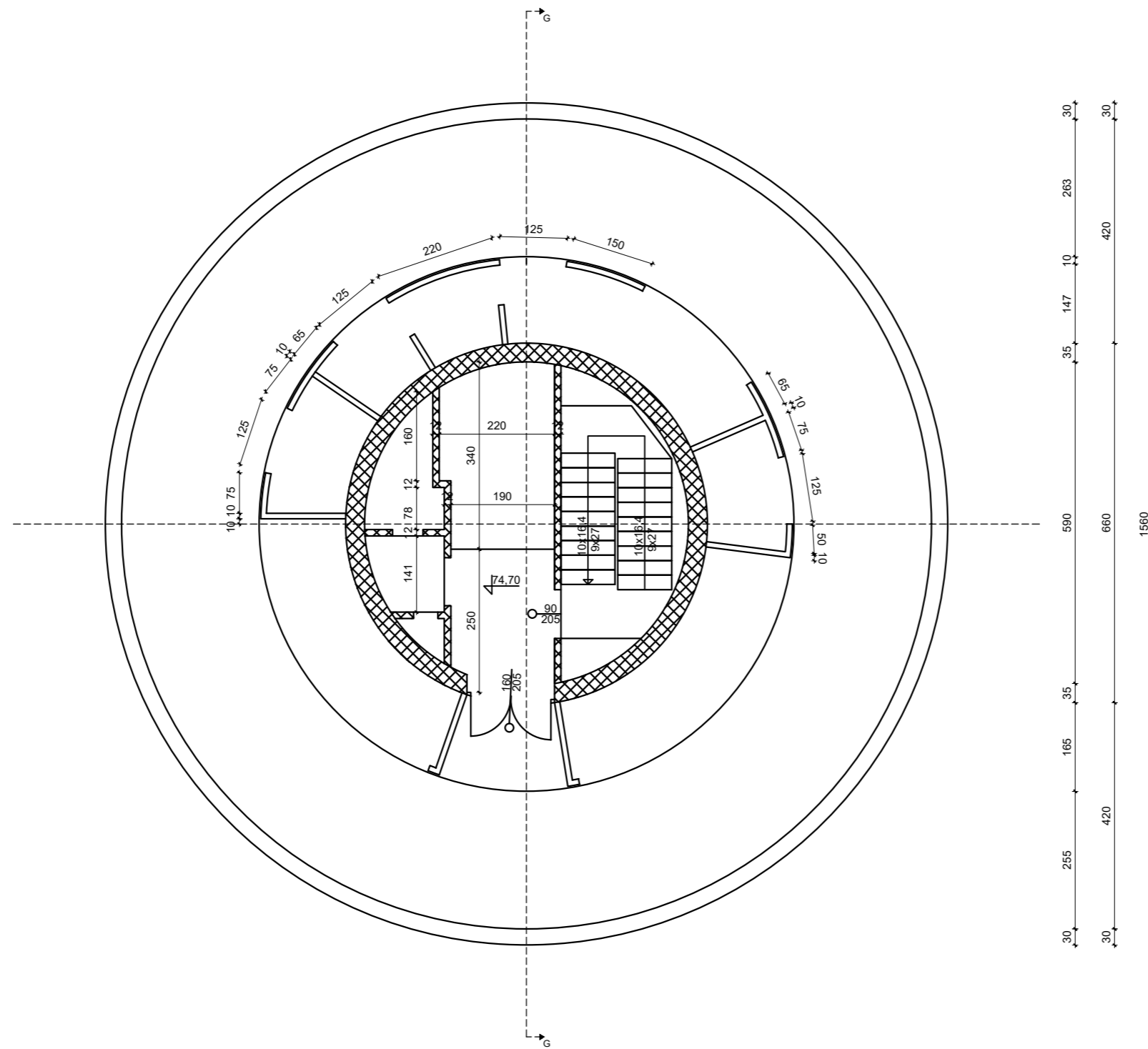
1:50

IZRADILA:

MARTINA JURAK

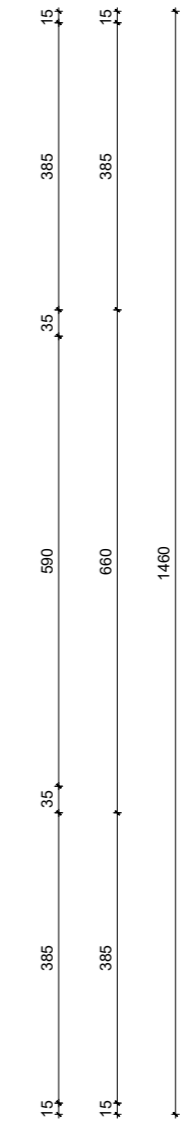
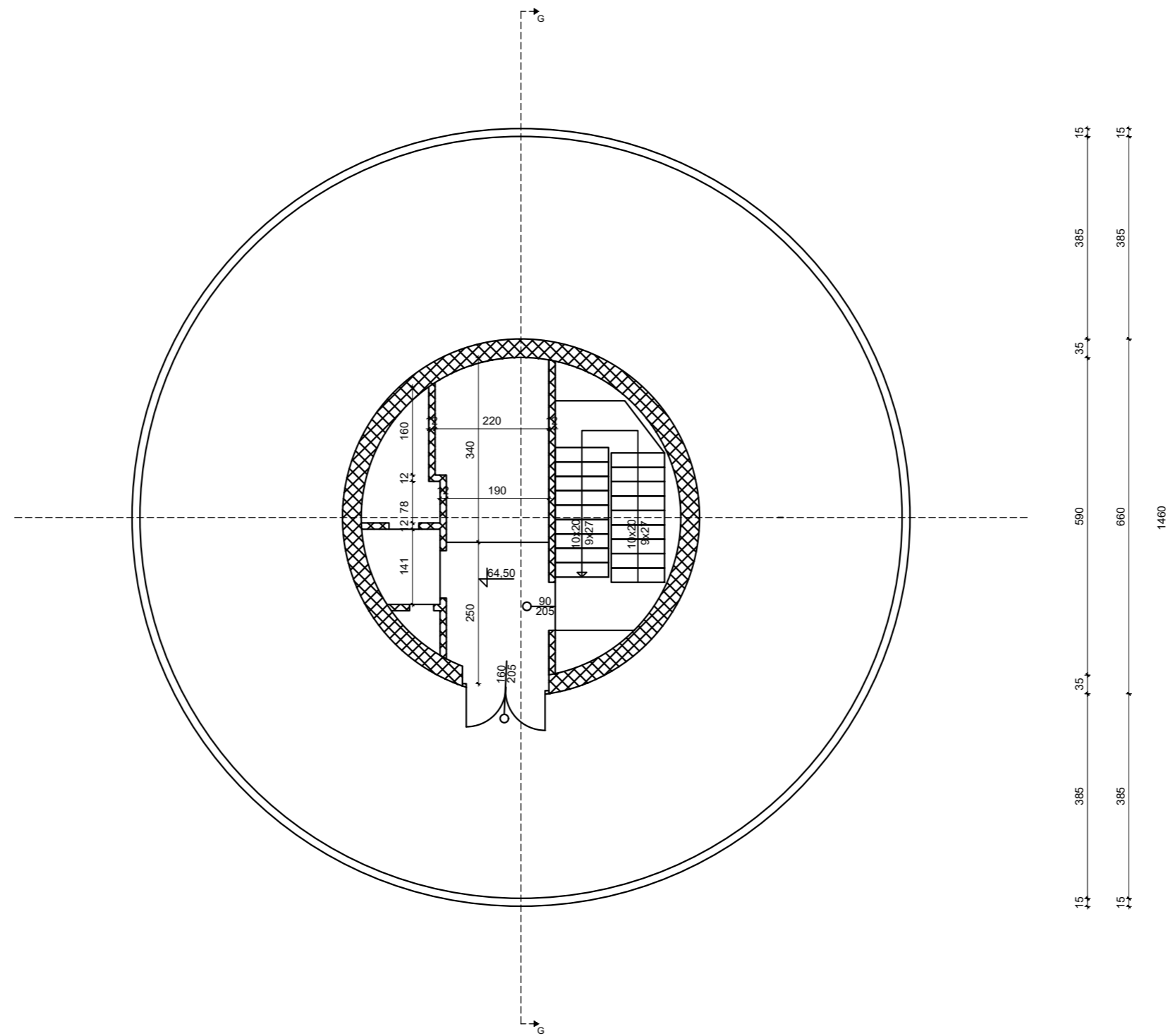
AK. GOD:
2023./2024.

PRESJEK D-D, MJ 1:50



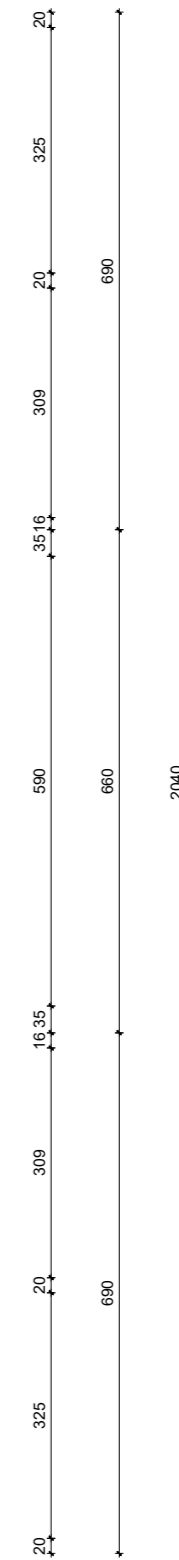
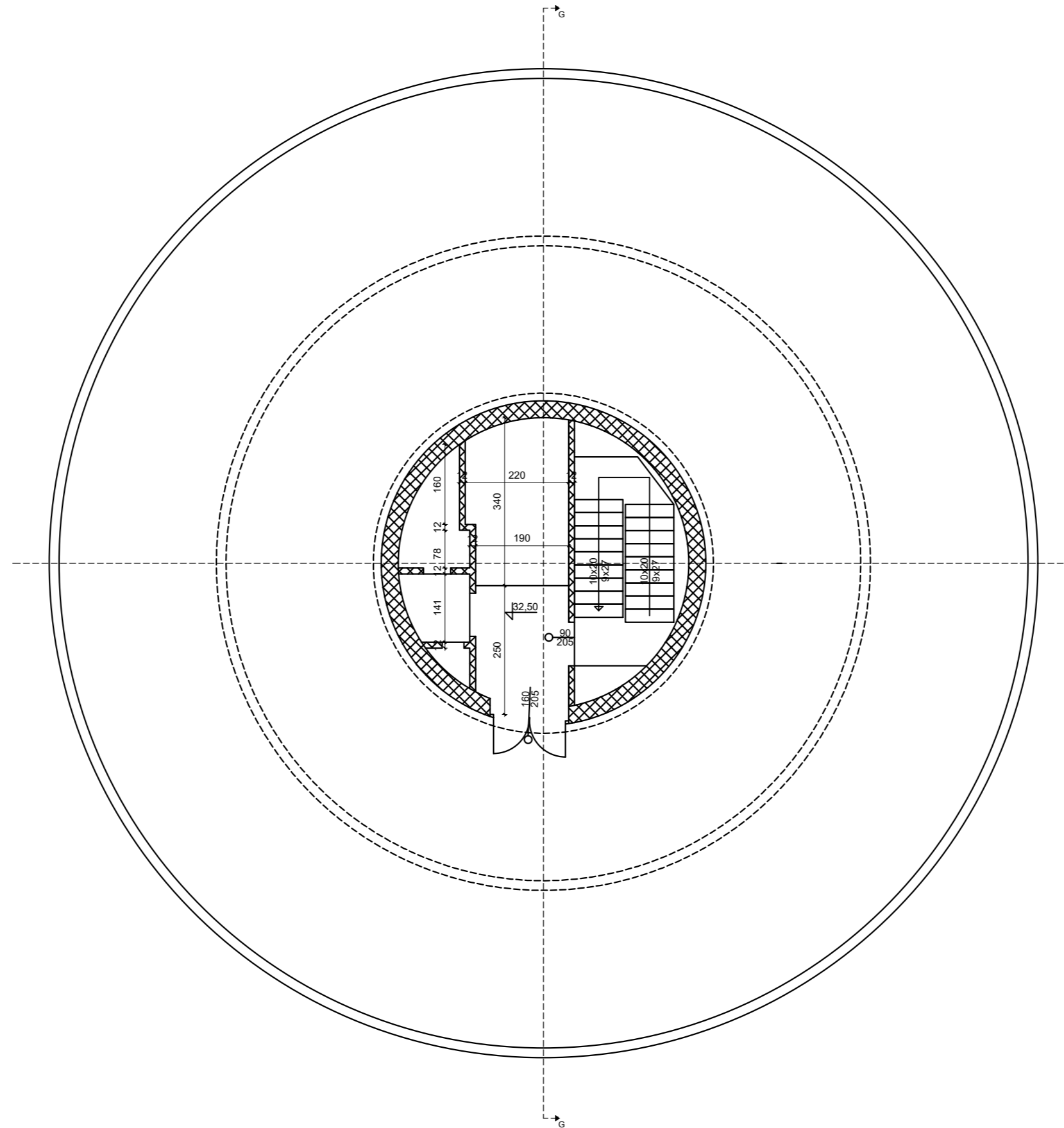
 SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET		
KOLEGIJ:	DIPLOMSKI RAD	MJERILO:
SADRŽAJ:	Tlocrt restorana (D-D)	1:50
IZRADILA:	MARTINA JURAK	AK. GOD: 2023./2024.

PRESJEK E-E, MJ 1:50



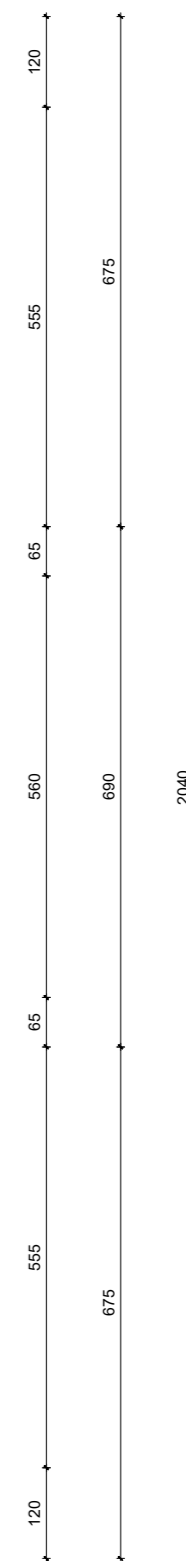
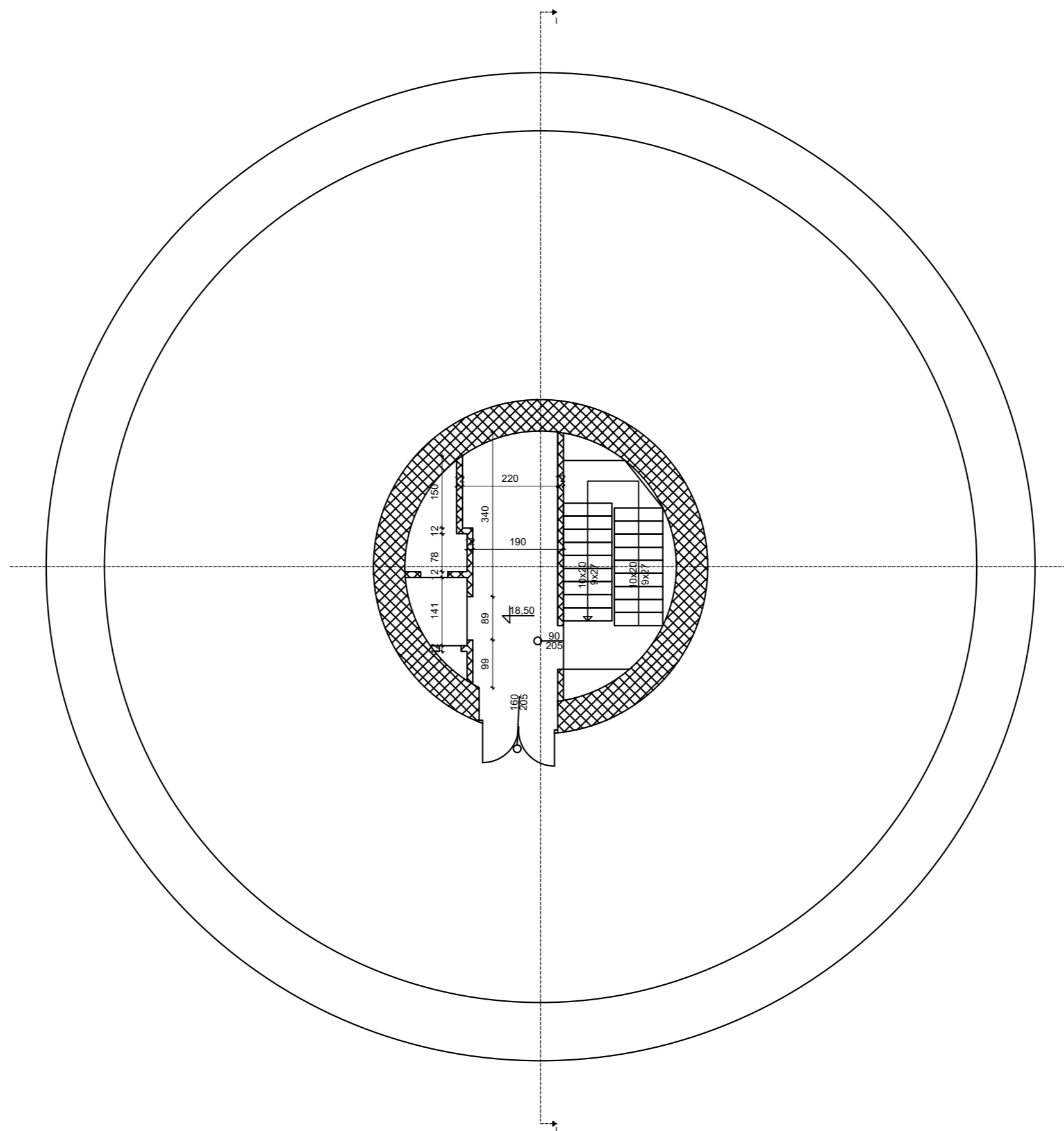
 SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET		
KOLEGIJ:	DIPLOMSKI RAD	MJERILO:
SADRŽAJ:	Tlocrt platforme za antene (E-E)	1:50
IZRADILA:	MARTINA JURAK	AK. GOD: 2023./2024.

PRESJEK F-F, MJ 1:50



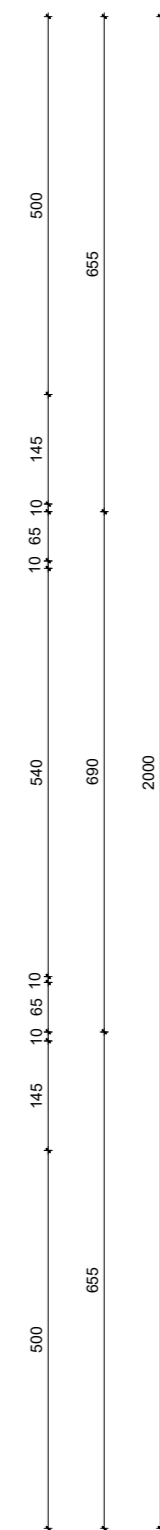
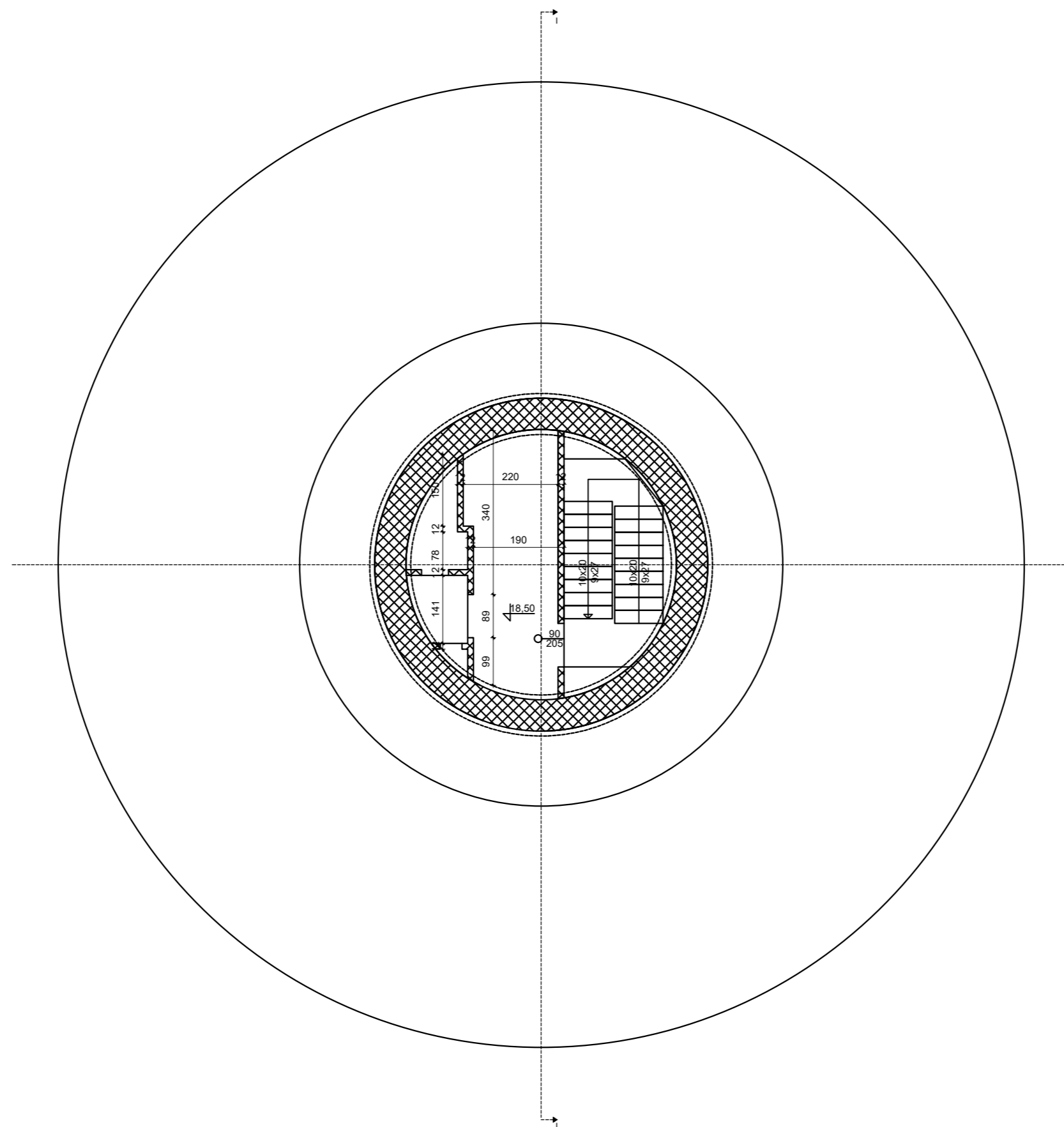
 SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET		
KOLEGIJ:	DIPLOMSKI RAD	MJERILO:
SADRŽAJ:	Tlocrt pogonske kupole (F-F)	1:50
IZRADILA:	MARTINA JURAK	AK. GOD: 2023./2024.

PRESJEK G-G, MJ 1:50



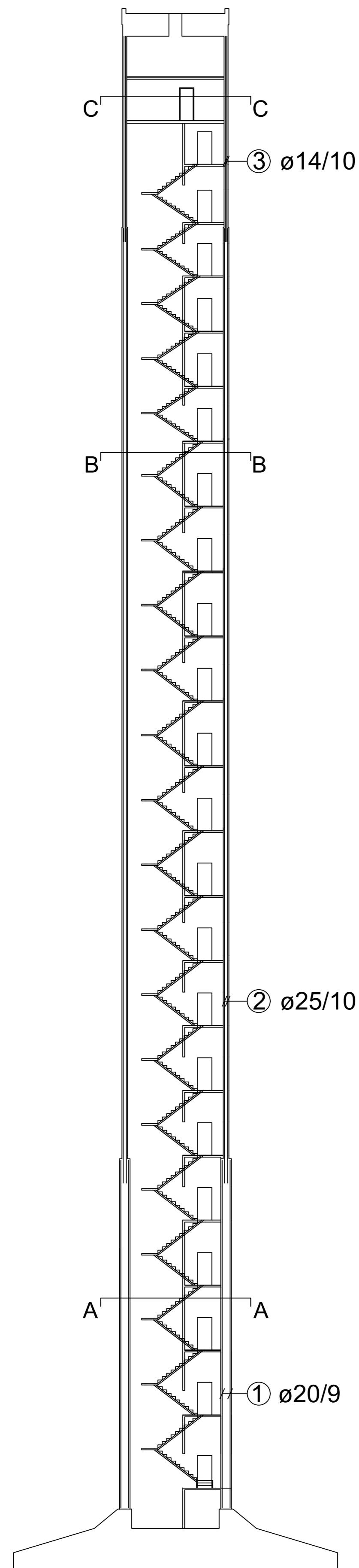
 SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET		
KOLEGIJ:	DIPLOMSKI RAD	MJERILO:
SADRŽAJ:	Tlocrt presjeka G-G	1:50
IZRADILA:	MARTINA JURAK	AK. GOD: 2023./2024.

PRESJEK H-H, MJ 1:50

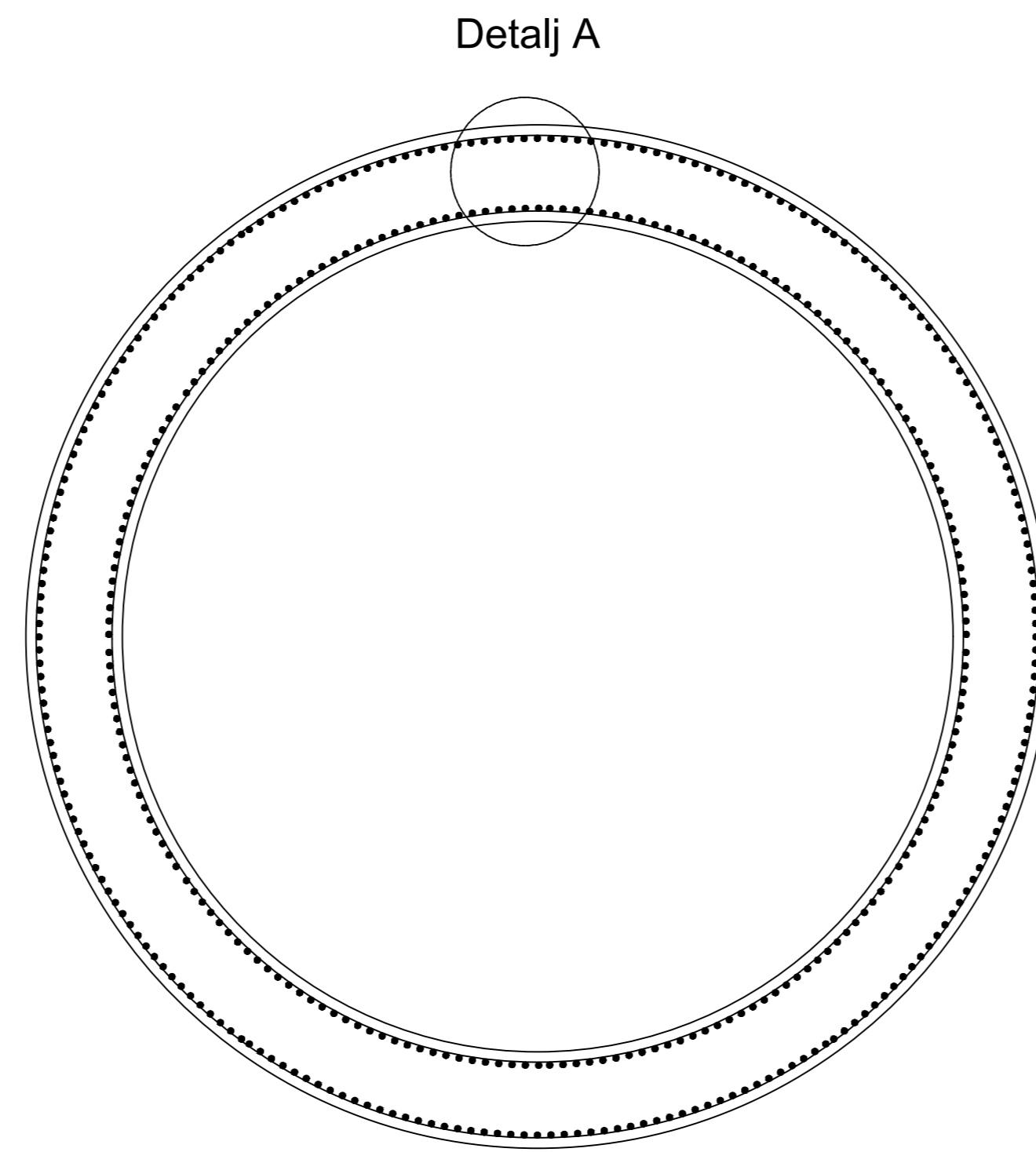


 SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET		
KOLEGIJ:	DIPLOMSKI RAD	MJERILO:
SADRŽAJ:	Tlocrt temelja (H-H)	1:50
IZRADILA:	MARTINA JURAK	AK. GOD: 2023./2024.

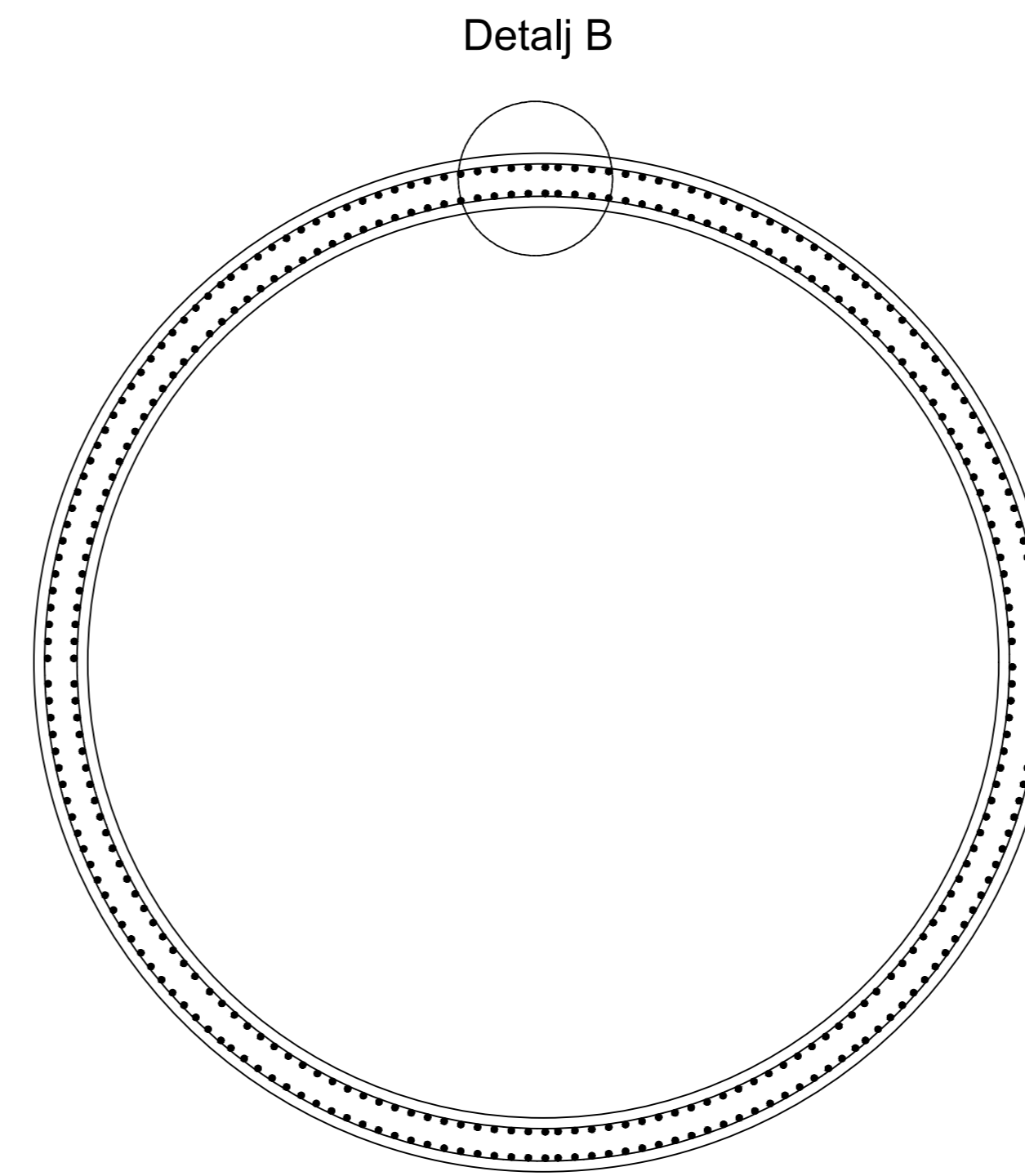
Uzdužni presjek, M 1:100



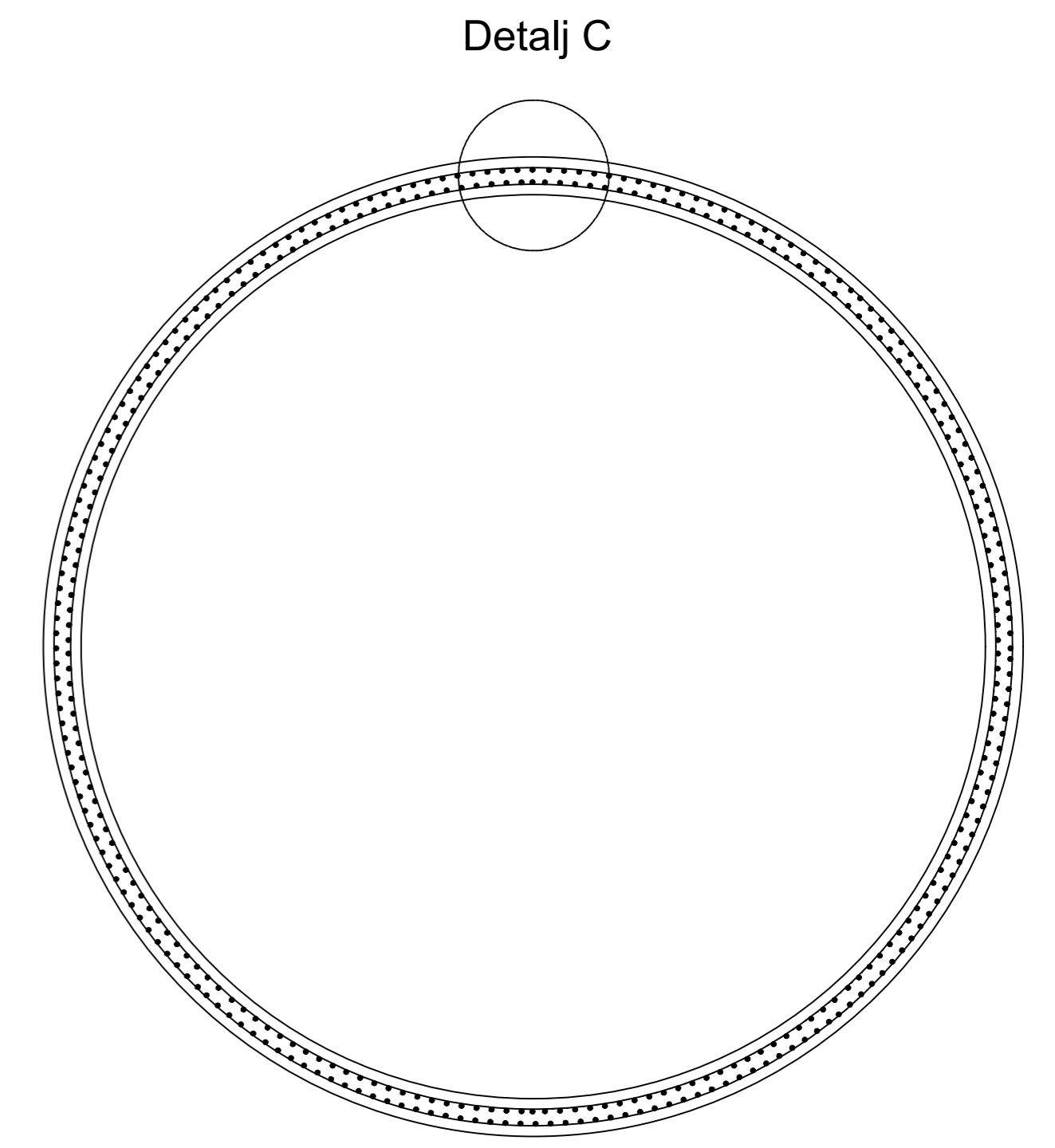
Poprečni presjek A-A, M 1:50



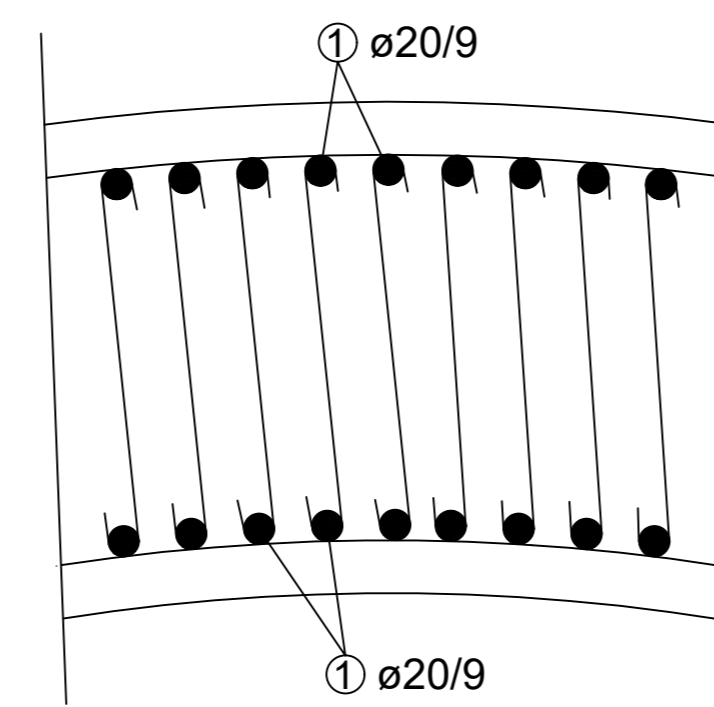
Poprečni presjek B-B, M 1:50



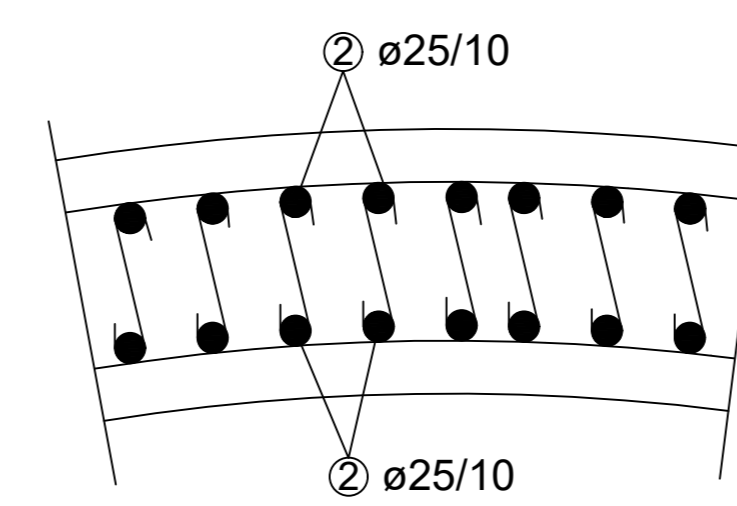
Poprečni presjek C-C, M 1:50



Detalj A, M 1:10



Detalj B, M 1:10



Detalj C, M 1:10

