

SPECIJALNE INŽENJERSKE GRAĐEVINE

3. PREDAVANJE

**Betonski tornjevi -
osnovni dijelovi, temeljenje,
proračun i dimensioniranje**

BETONSKI TORNJEVI

SADRŽAJ PREDAVANJA (1.dio)

▣ Oblikovanje i osnovni dijelovi

- Općenito
- Temelji
- Tijelo tornja
- Platforme tornjeva
- Mjesta promjene promjera
- Vrh tornja
- Čelični jarboli na betonskim tornjevima

▣ Temeljenje

- Općenito
- Dokaz ekscentričnosti opterećenja
- Dokaz naprezanja na tlo
- Proračun naprezanja ispod tornja
- Utjecaj zakretanja temelja



OBLIKOVANJE I OSNOVNI DIJELOVI

OPĆENITO

- Na oblikovanje tornjeva utječu:
 - ekonomski zahtjevi
 - konstrukcijski zahtjevi
 - prirodni uvjeti
 - zahtjevi uklapanja u okoliš
 - zahtjevi na oblik (klasičan izgled, ekstravagancija...).

Primjer tradicionalne konstrukcije:

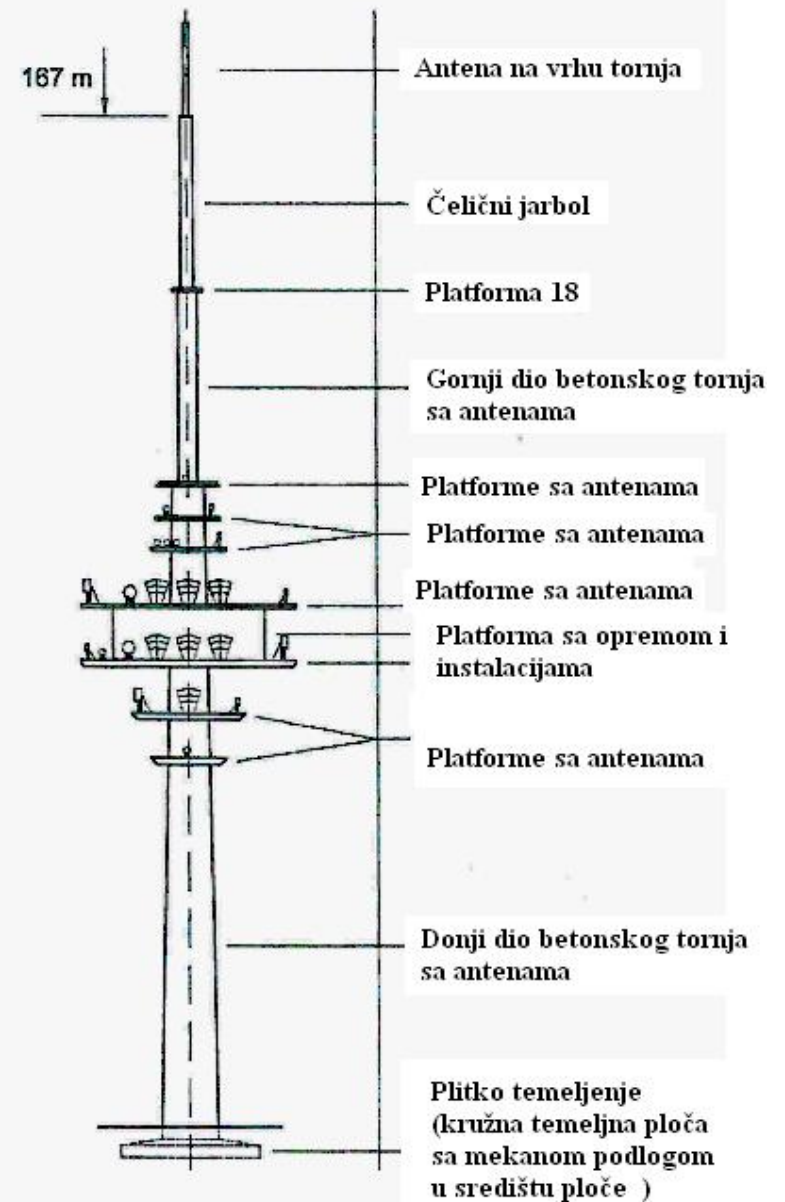
- televizijski toranj u Stuttgart-u (1953)
 - prvi armiranobetonski toranj



OBLIKOVANJE I OSNOVNI DIJELOVI

OPĆENITO

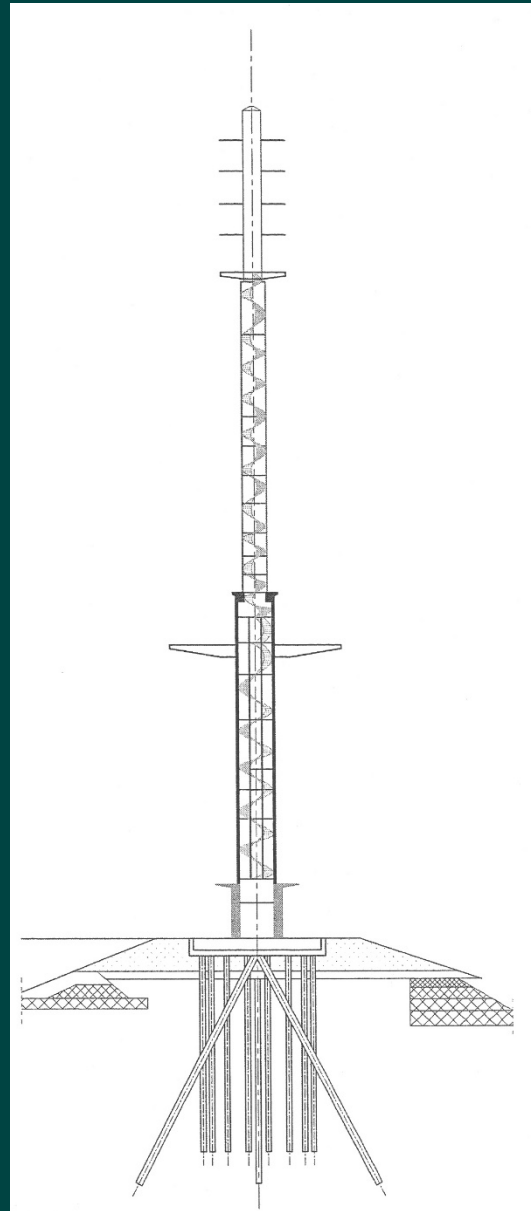
- Osnovni dijelovi jednog telekomunikacijskog betonskog tornja



OBLIKOVANJE I OSNOVNI DIJELOVI

OPĆENITO

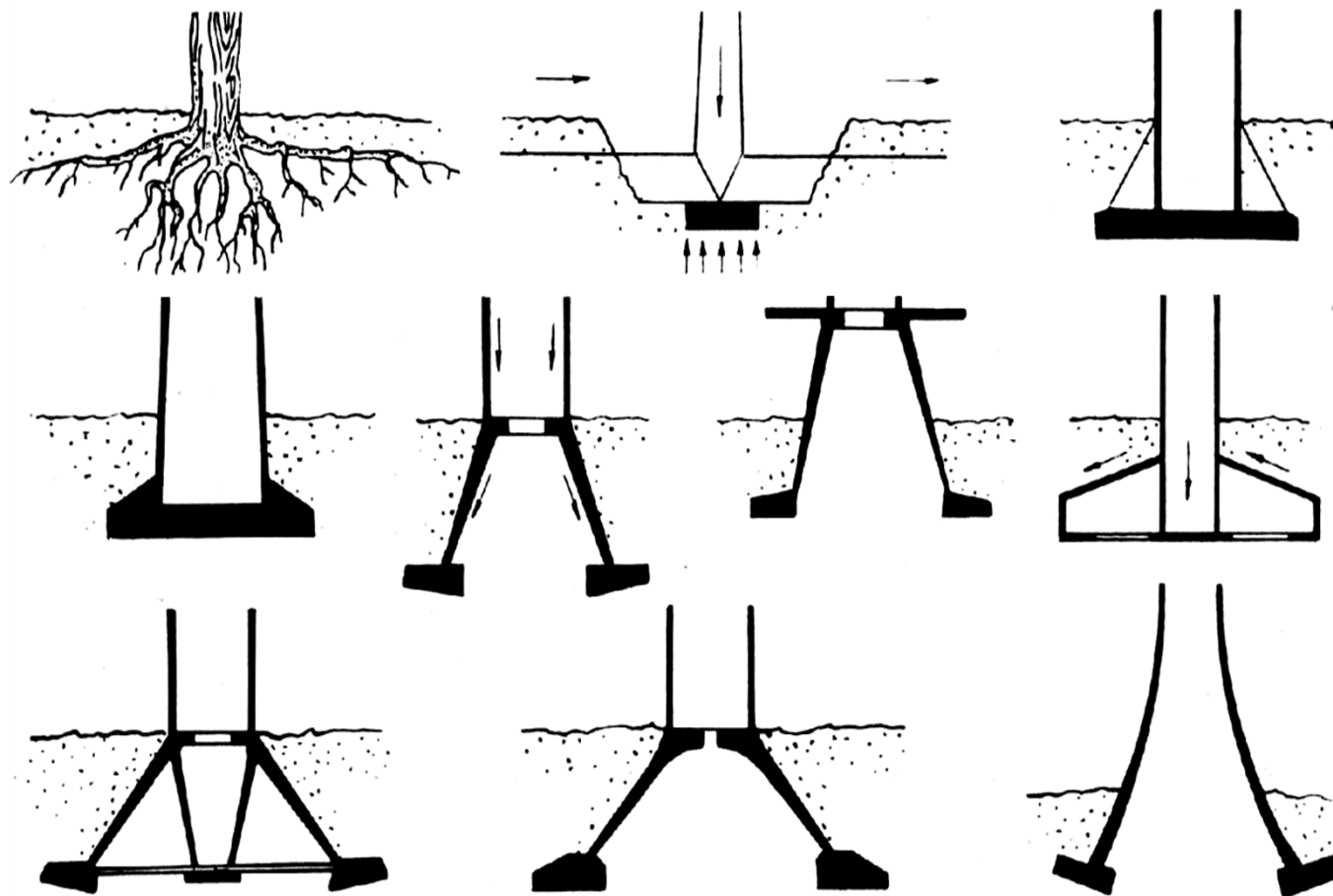
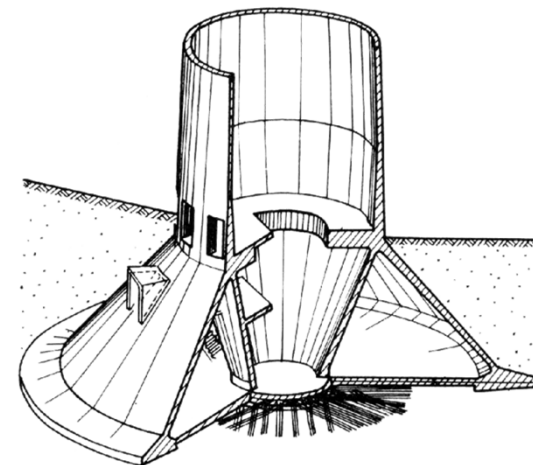
- Osnovni dijelovi (općenito)
 - Temelji
 - Tijelo tornja
 - Platforme tornjeva
 - Mjesta promjene promjera
 - Vrh tornja



OBLIKOVANJE I OSNOVNI DIJELOVI

TEMELJI

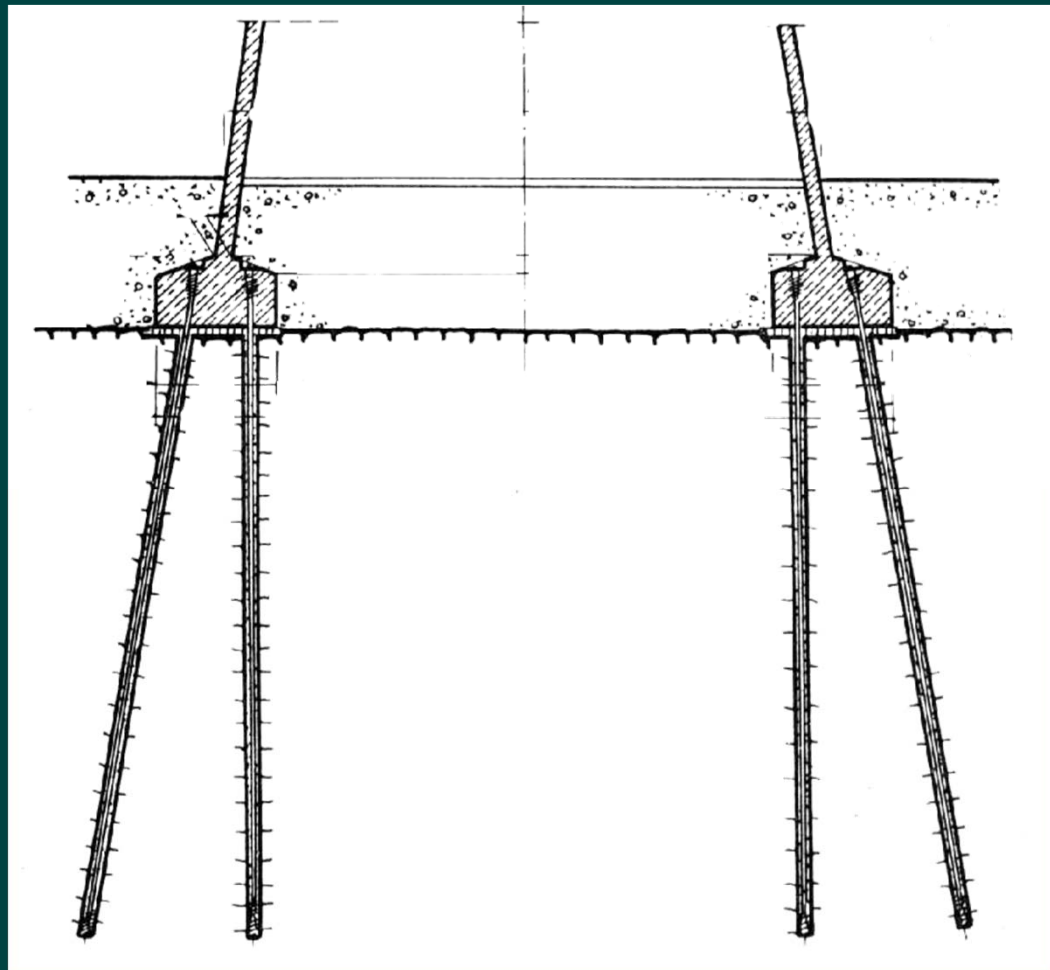
- Kružne ili prstenaste ploče
- Stožasti temelji



OBLIKOVANJE I OSNOVNI DIJELOVI

TEMELJI

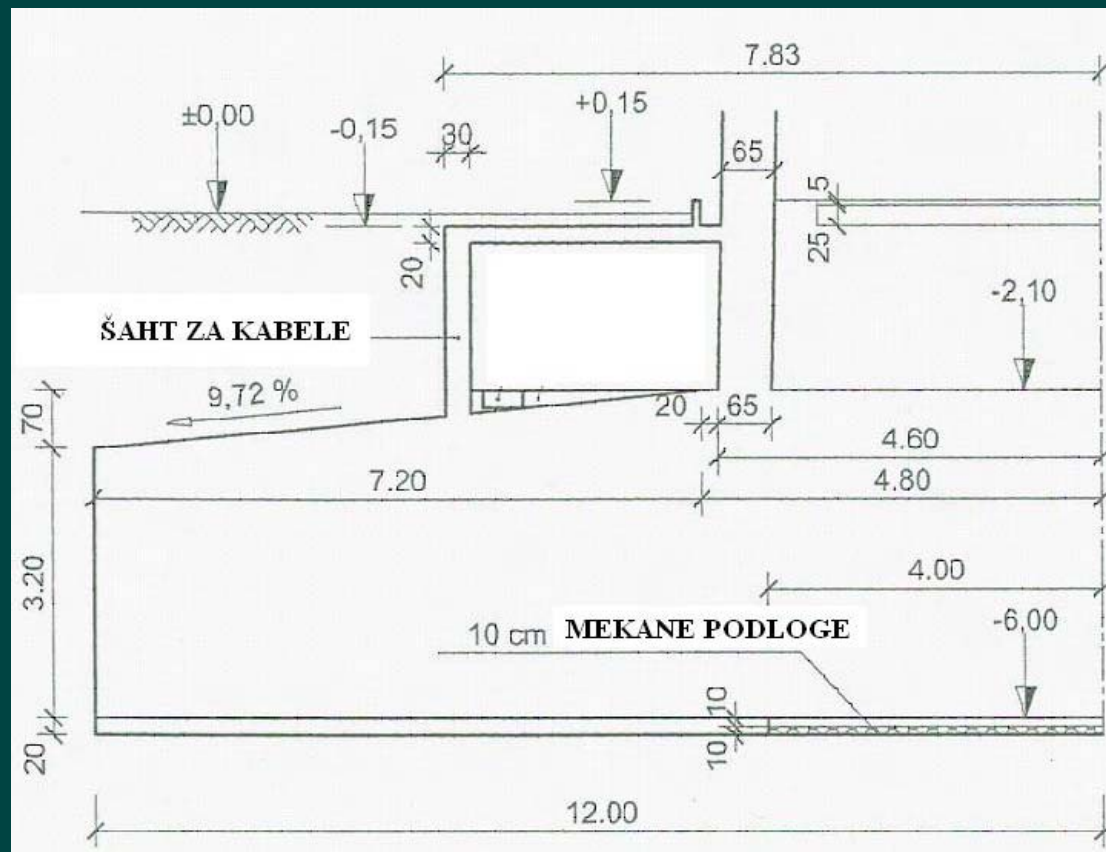
- Temeljenje sa geotehničkim sidrima:
 - u stjenovitom ili kamenom tlu
 - preuzimanje momenta sidrima



OBLIKOVANJE I OSNOVNI DIJELOVI

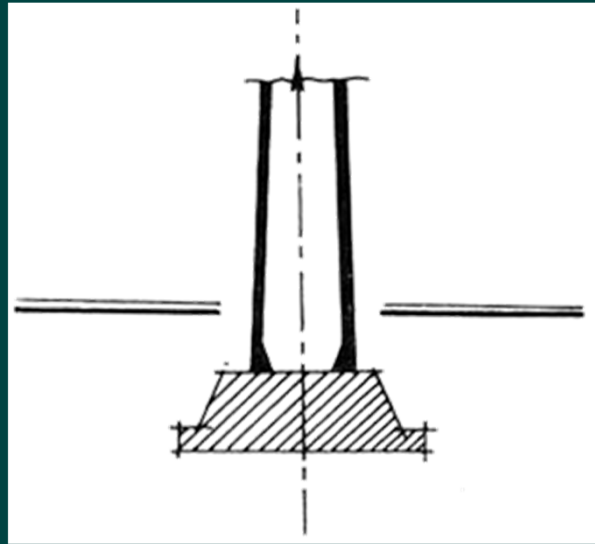
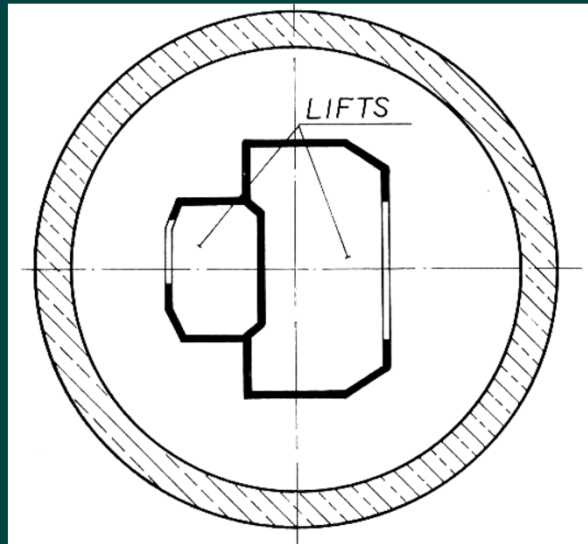
TEMELJI

- karakterističan oblik temeljne ploče armiranobetonskog tornja:
 - nedaleko tornja se nalazi građevina (kuća, zgrada) sa telekomunikacijskom opremom
 - podzemnim kabelom su vezani građevina i toranj
 - kabele se uz toranj nalaze u šahtu
 - problem je otvor u dnu tornja za prolaz kabela - oslabljenje dna tornja

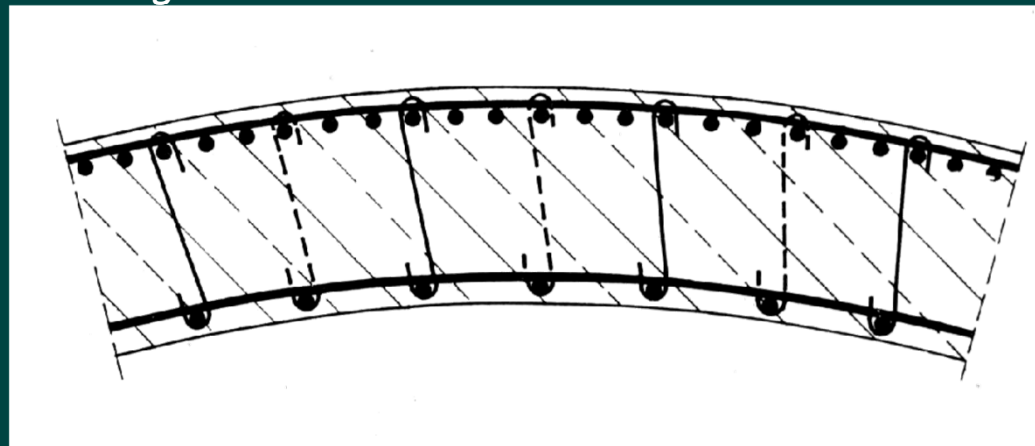


OBLIKOVANJE I OSNOVNI DIJELOVI

TIJELO TORNJA



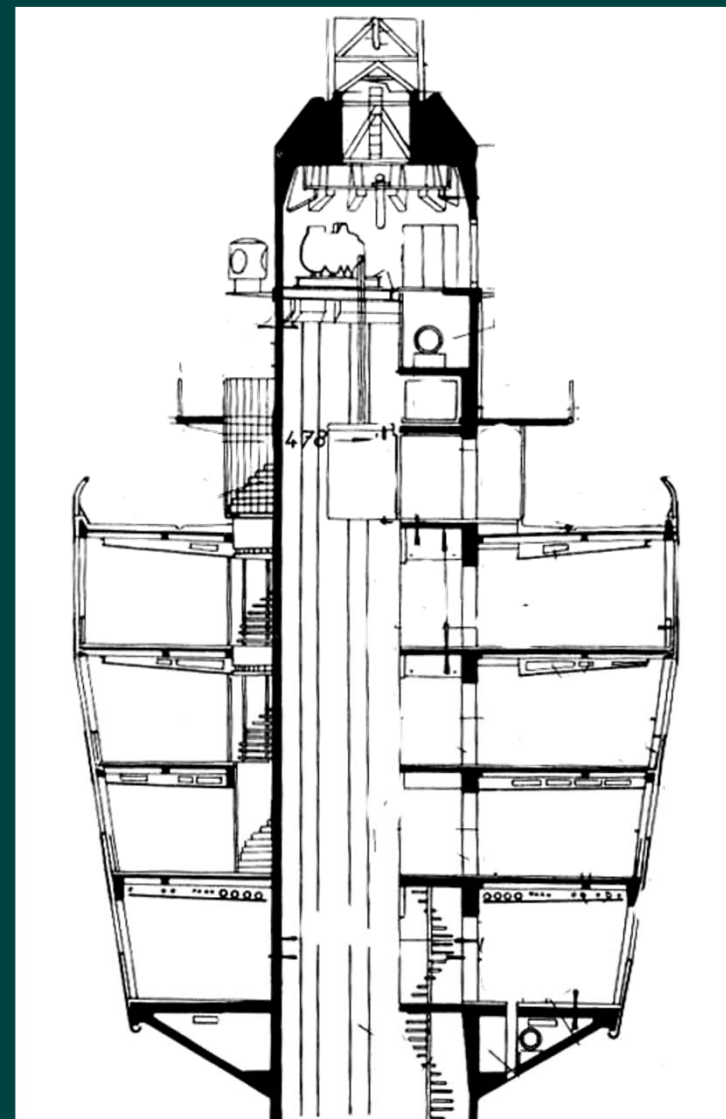
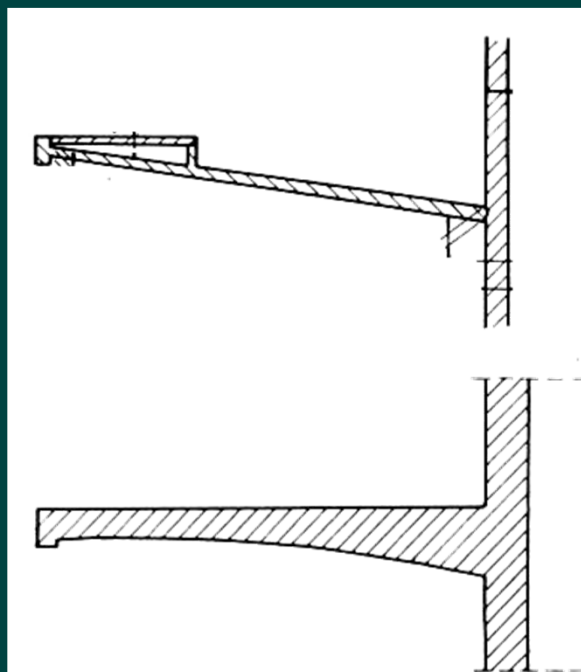
- Najbolji konstrukcijski element je zatvorena betonska cijev kružnog ili poligonalnog poprečnog presjeka
- Zašiljena konstrukcija *penjajućeg* ili *kliznog* oblika
- Armiranje tornja:
 - vertikalna armatura: šipke na razmacima 10-15 cm
 - prstenasta armatura za prihvaćanje radijalnih sila



OBLIKOVANJE I OSNOVNI DIJELOVI

PLATFORME TORNJEVA

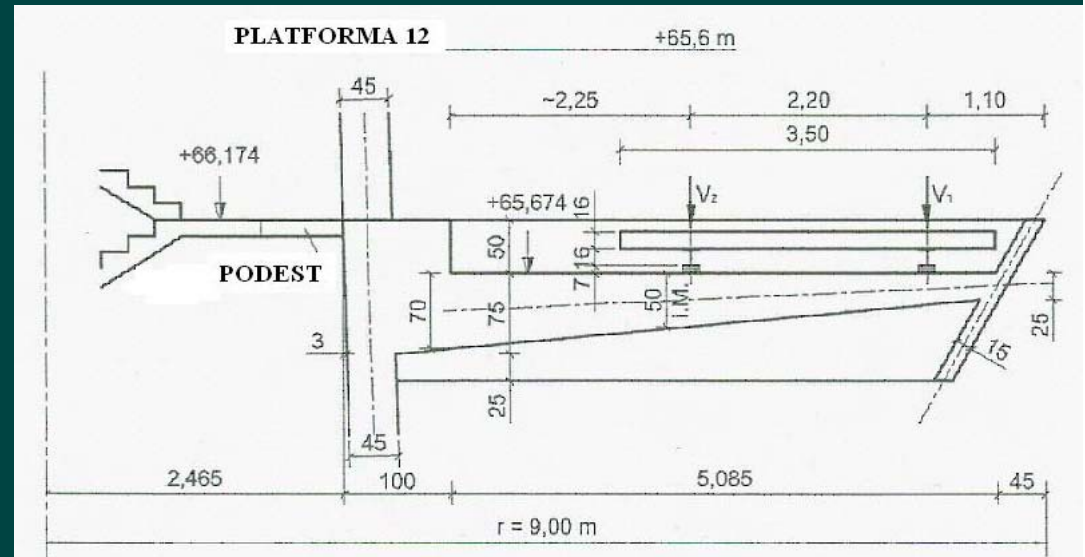
- ❑ ovješene platforme (plosnata konoidna ljuska)
- ❑ klasična konzolna platforma



OBLIKOVANJE I OSNOVNI DIJELOVI PLATFORME TORNJEVA

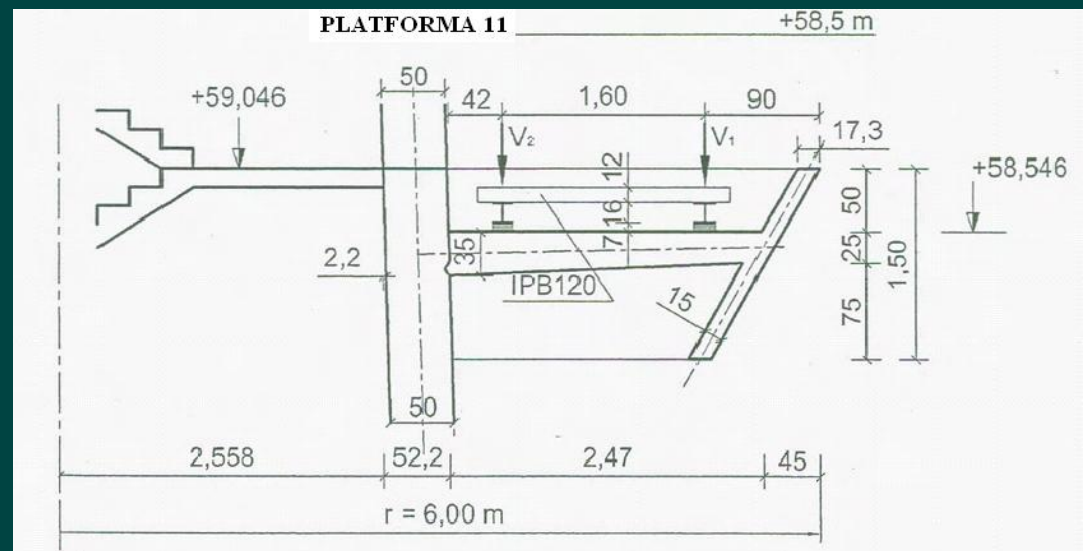
□ Veće platforme tornjeva:

- izvedba tijela tornja do položaja kružnog AB prstena
- prsten je u pravilu cca dvostruke debljine stjenke tornja
- naknadno se izvode konzole promjenjive visine



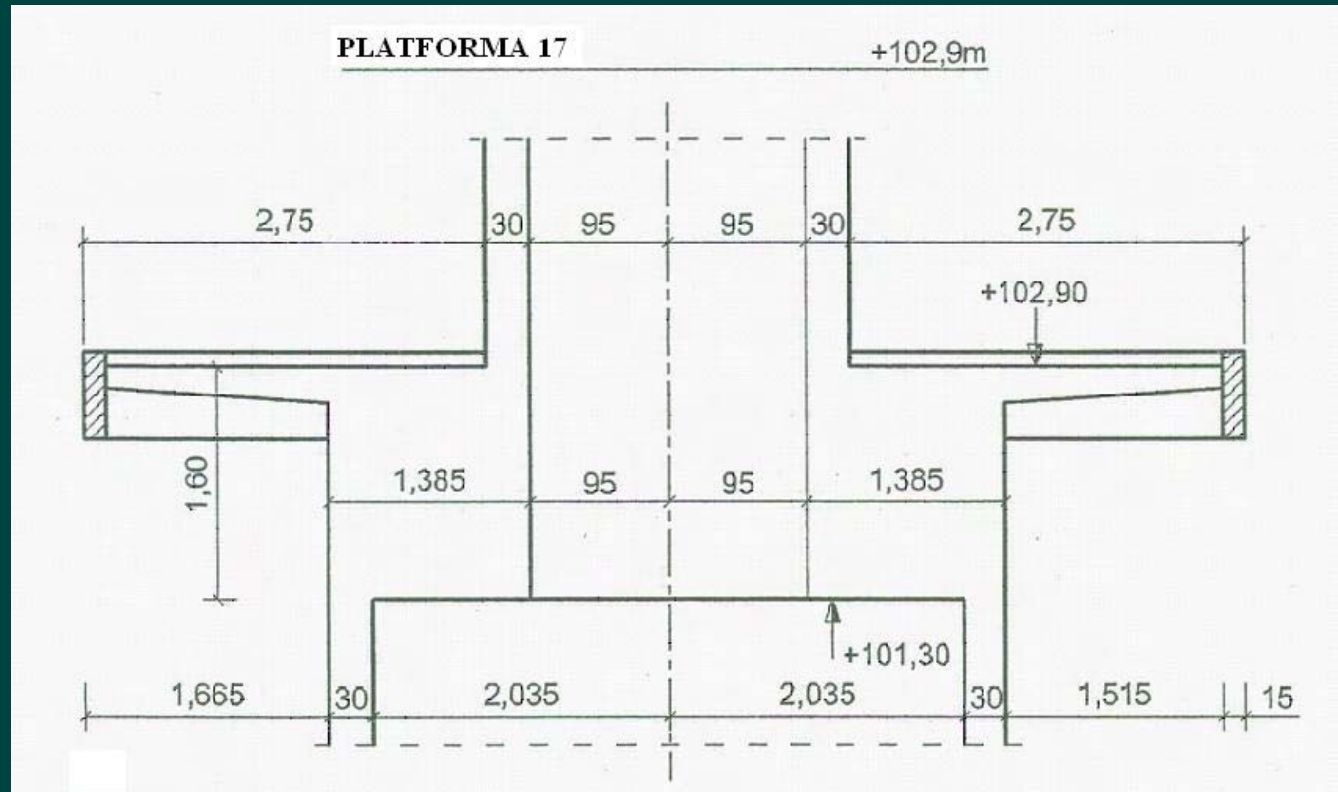
□ **Manje platforme tornjeva:**

- izvedba tijela tornja konstantne debljine podiznom oplatom
- ostavljanje nastavka armature za sidrenje konzole



PROMJENA PROMJERA TORNJA

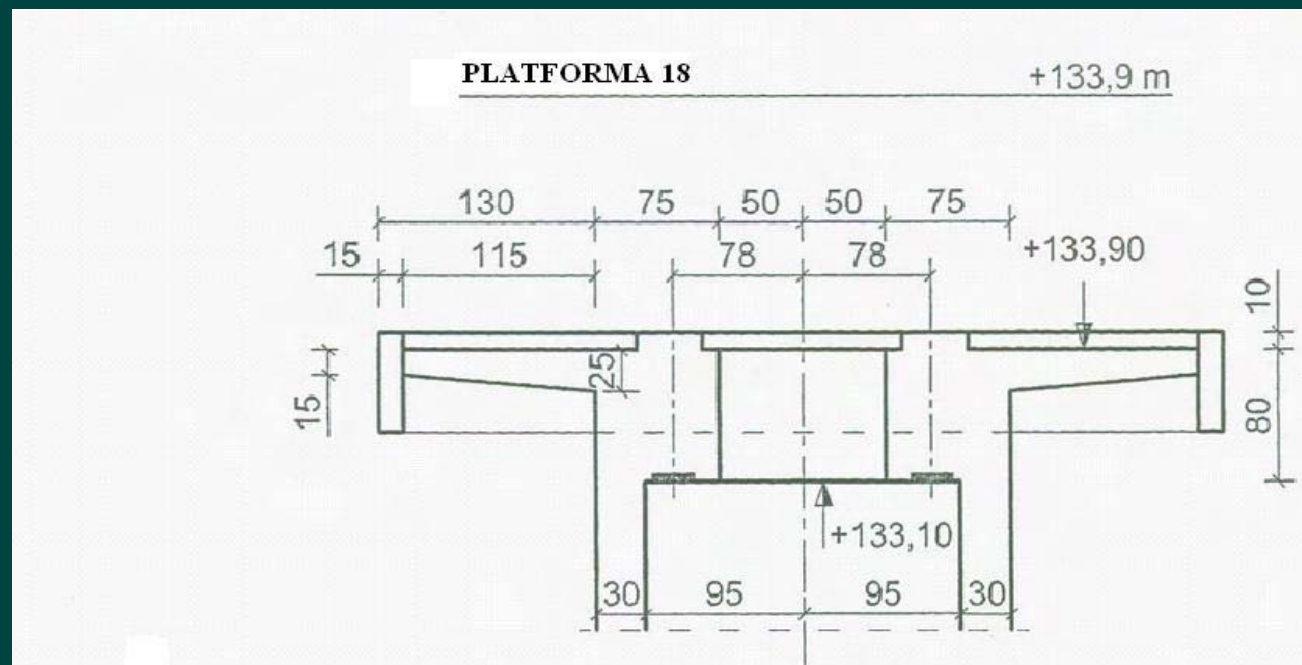
- armiranobetonski prsten za sidrenje gornjeg dijela tornja



OBLIKOVANJE I OSNOVNI DIJELOVI

VRH TORNJA

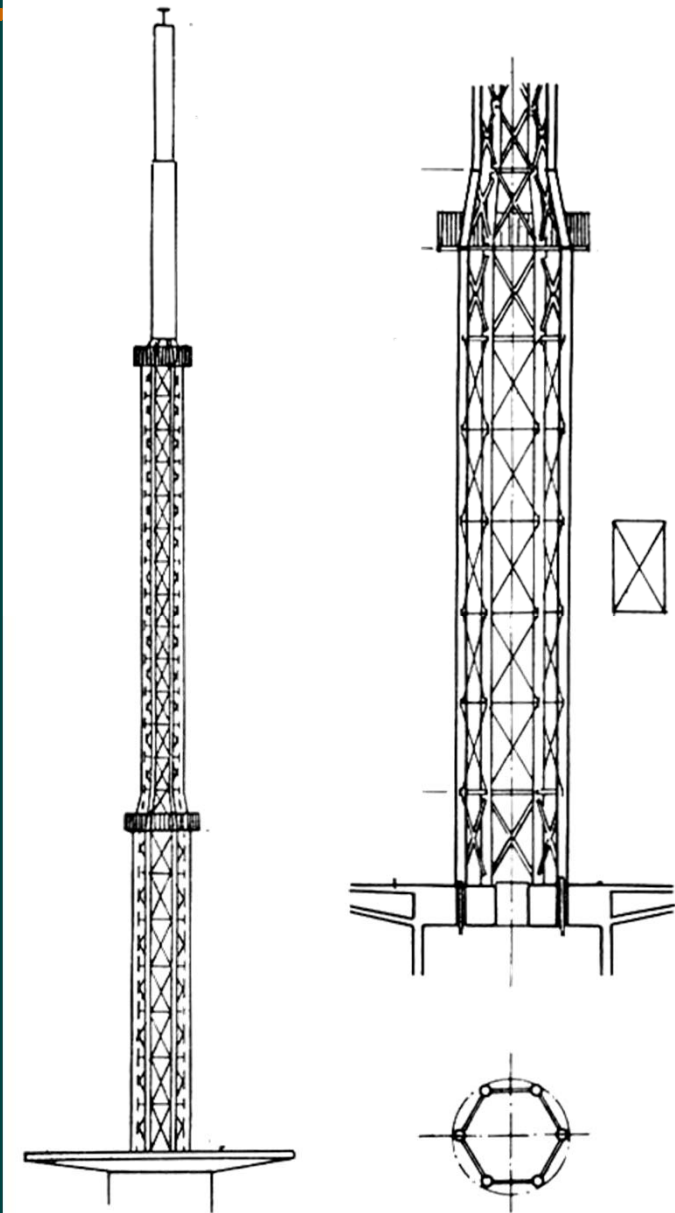
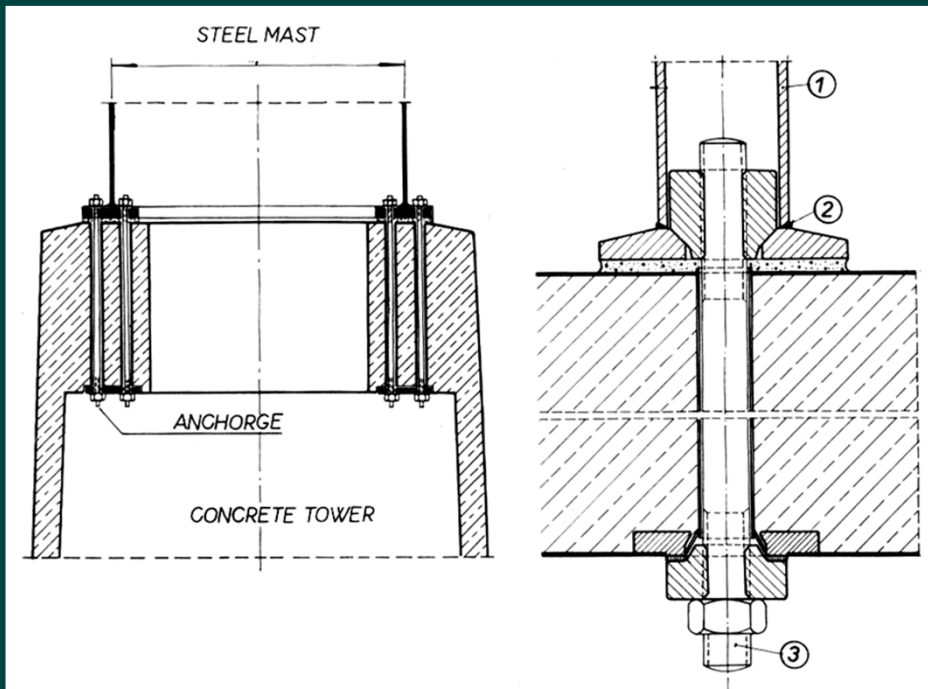
- armiranobetonski prsten za sidrenje čeličnog tornja



OBLIKOVANJE I OSNOVNI DIJELOVI

ČELIČNI JARBOLI NA BETONSKIM TORNJEVIMA

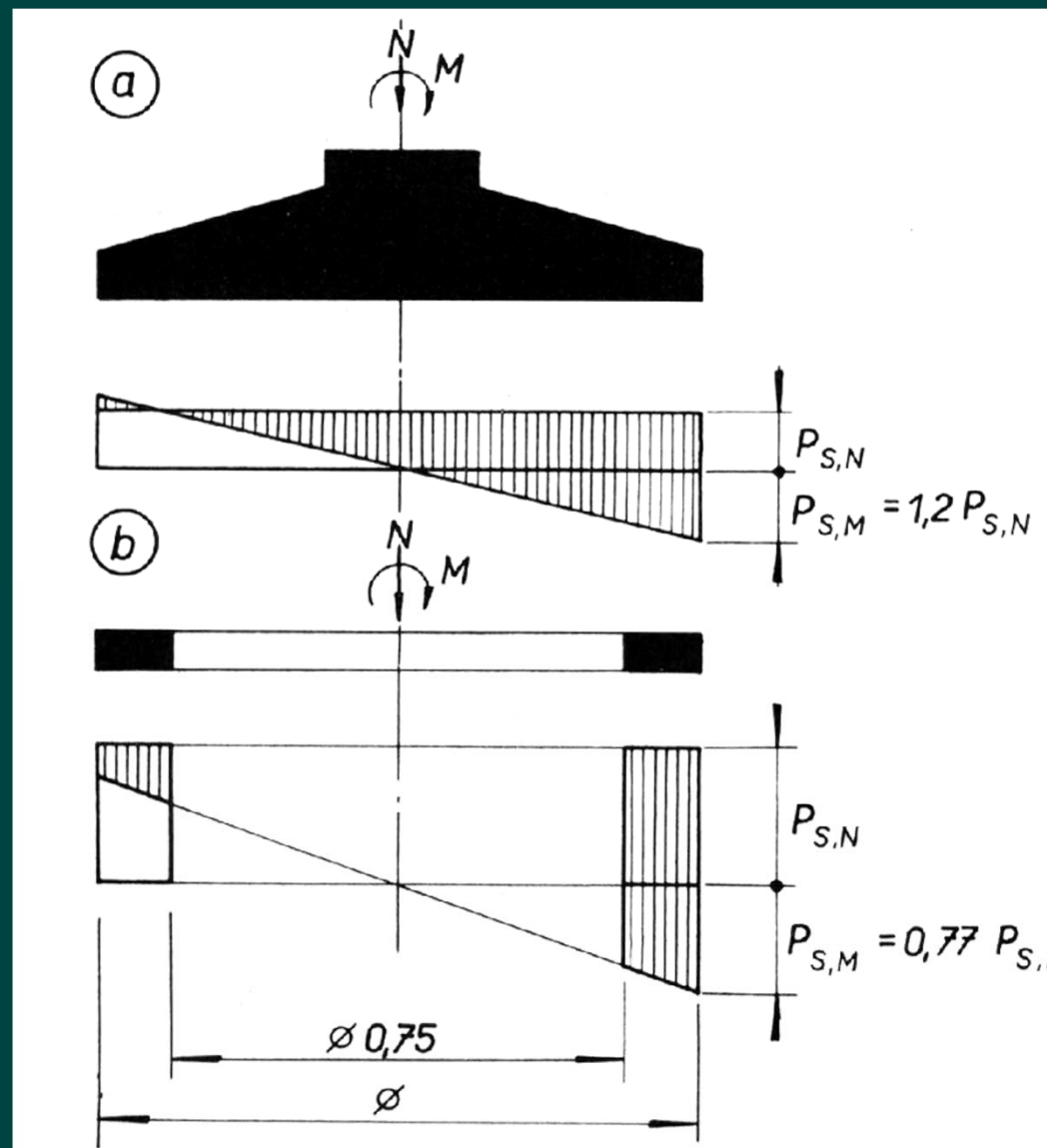
- Čelična rešetka (ili cijev) usidrena u betonski dio tornja
- poprečni presjek većinom šesterokut (heksagon)



TEMELJENJE TORNJJEVA

OPĆENITO

- dominantne sile na temelj određuju način temeljenja
- potrebna je zaštita od korozije
- imati u vidu djelovanje agresivnih voda



TEMELJENJE TORNJJEVA

DOKAZ EKSCENTRIČNOSTI OPTEREĆENJA

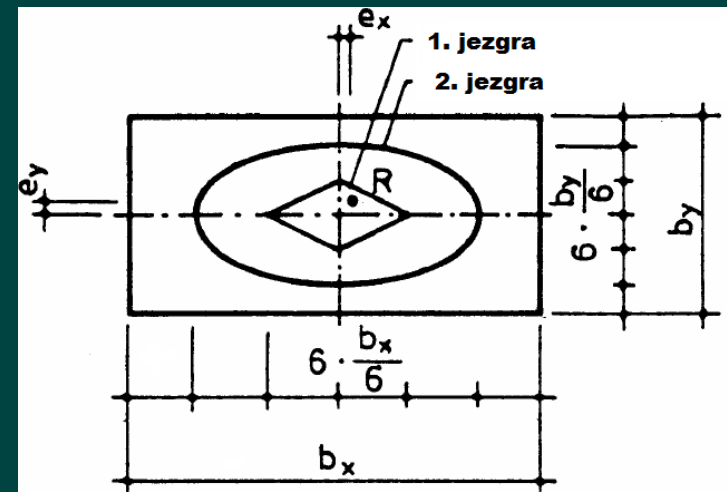
- Potrebno je dokazati da se za osnovna opterećenja
 - rezultantna sila nalazi u **1. jezgri** poprečnog presjeka temelja
 - odnosno da je cijela površina temelja u tlaku i da nema odizanja temelja od tla

$$\frac{e_x}{b_x} + \frac{e_y}{b_y} \leq \frac{1}{6}$$

- Za ostala opterećenja
 - dopušta se odizanje temelja,
 - ali se rezultanta sila mora nalaziti u **2. jezgri** poprečnog presjeka.

$$\left(\frac{e_x}{b_x}\right)^2 + \left(\frac{e_y}{b_y}\right)^2 \leq \frac{1}{9}$$

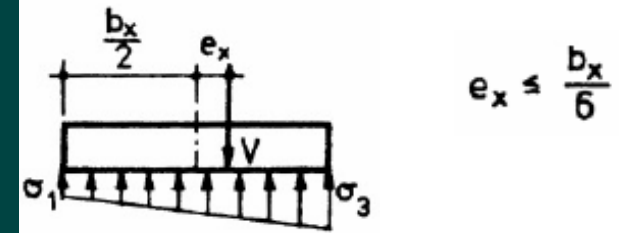
- **M_x** moment savijanja oko osi x
- **M_y** moment savijanja oko osi y
- **V** vertikalna sila na temelj
- **e_x** = M_x / V
- **e_y** = M_y / V



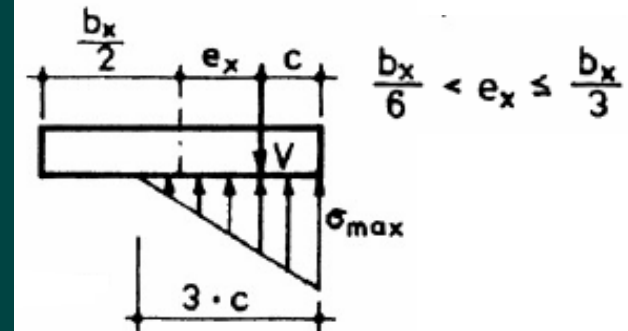
TEMELJENJE TORNJJEVA

DOKAZ EKSCENTRIČNOSTI OPTEREĆENJA

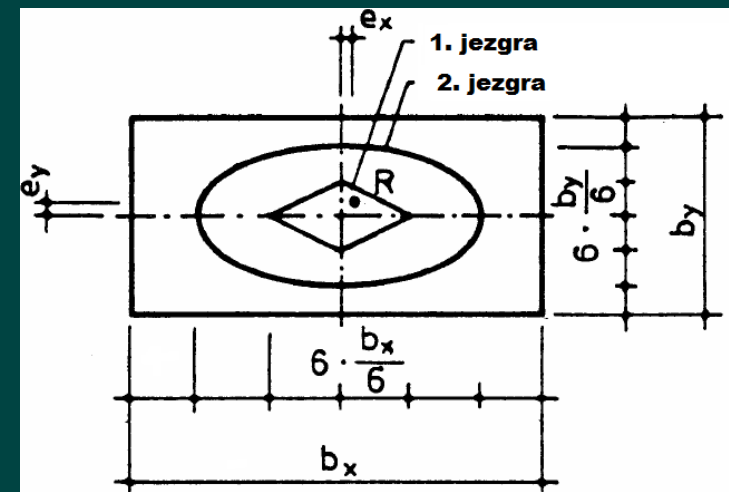
- Potrebno je dokazati da se za osnovna opterećenja
 - rezultantna sila nalazi u **1. jezgri** poprečnog presjeka temelja
 - odnosno da je cijela površina temelja u tlaku i da nema odizanja temelja od tla



- Za ostala opterećenja
 - dopušta se odizanje temelja,
 - ali se rezultanta sila mora nalaziti u **2. jezgri** poprečnog presjeka.



- M_x moment savijanja oko osi x
- M_y moment savijanja oko osi y
- V vertikalna sila na temelj
- $e_x = M_x / V$
- $e_y = M_y / V$



TEMELJENJE TORNJJEVA

DOKAZ NAPREZANJA NA TLO

- naprezanja na tlo moraju biti manja ili jednaka maksimalno dopuštenim napreznjima

- JEDNOOSNO SAVIJANJE** ($e_x = 0$ ili $e_y = 0$)

- a) čitav presjek je u TLAKU

$$a) e_x \leq \frac{b_x}{6}: \quad \sigma_{3,1} = \frac{V}{b_x \cdot b_y} \left(1 \pm \frac{6 \cdot e_x}{b_x} \right)$$

- b) presjek se dijelom odiže od tla

$$b) \frac{b_x}{6} < e_x \leq \frac{b_x}{3}: \quad \sigma_{\max} = \frac{2 \cdot V}{3 \cdot c \cdot b_y} \quad \sigma_{\min} = 0!$$

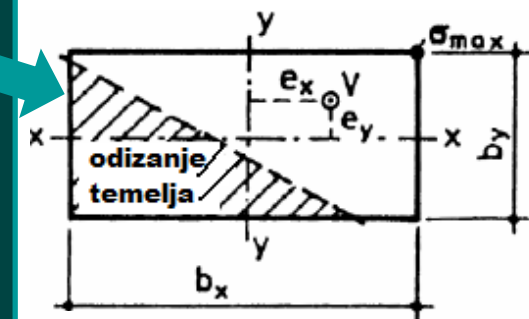
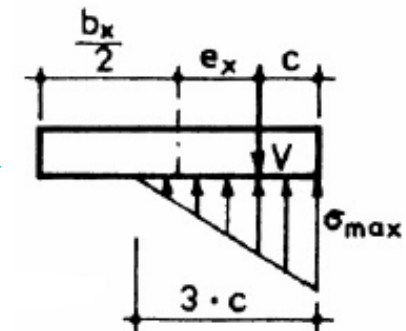
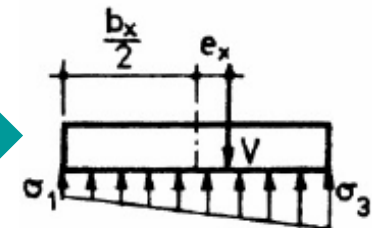
- DVOOSNO SAVIJANJE**

- c) čitav presjek je u TLAKU

$$c) \frac{e_x}{b_x} + \frac{e_y}{b_y} \leq \frac{1}{6}: \quad \sigma(x,y) = \frac{V}{b_x \cdot b_y} \left(1 \pm \frac{12 \cdot e_x \cdot y}{b_x^2} \pm \frac{12 \cdot e_y \cdot x}{b_y^2} \right)$$

- d) presjek se dijelom odiže od tla

$$d) \frac{e_x}{b_x} + \frac{e_y}{b_y} > \frac{1}{6} \quad \text{ i } \quad \left(\frac{e_x}{b_x} \right)^2 + \left(\frac{e_y}{b_y} \right)^2 \leq \frac{1}{9}$$



$$\sigma_{\max} = \frac{\mu \cdot V}{b_x \cdot b_y} \quad \mu - \text{iz tablica prema H\ddot{u}lsd\ddot{u}nker-u}$$

TEMELJENJE TORNJEVA

PRORAČUN NAPREZANJA ISPOD TORNJA

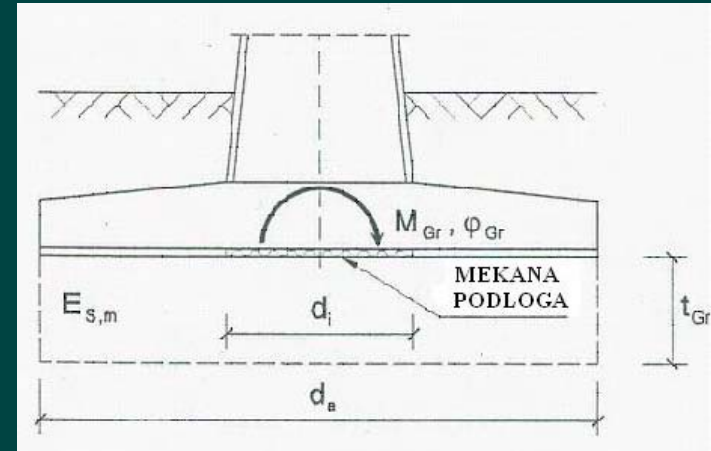
- ispod središnjeg dijela temelja se postavlja mekana podloga kako bi se pritisak na tlo prenio po betonskom prstenu vanjskog promjera d_a i unutarnjeg promjera d_i

➔ na tlo će djelovati manja naprezanja

- u slučaju jednake krutosti tla ispod cijele temeljne ploče, sila iz stijenki betonskog tornja širila bi se kroz temeljnu ploču najkraćim putem putom (kut 45°)

➔ na tlo bi djelovala veća naprezanja

- Površina kružnog prstena:
- Moment otpora poprečnog presjeka:
- Jezgra poprečnog presjeka:
- Ekscentricitet:
- Naprezanje na tlo pod karakterističnim opterećenjem:



$$A_{tem} = \pi \cdot (d_a^2 - d_i^2)$$

$$W_{tem} = \frac{I_p}{r} = \frac{\frac{\pi}{64} \cdot (d_a^4 - d_i^4)}{r}$$

$$K = W_{tem} / A_{tem}$$

$$e = \frac{M_k}{N_k} < K$$

$$\sigma_k = \frac{N_k}{A_{tem}} \pm \frac{M_k}{W_{tem}}$$

TEMELJENJE TORNJJEVA

UTJECAJ ZAKRETANJA TEMELJA

- Zakretanje temelja **trajnog karaktera** uslijed **stalnog opterećenja** zadaje se kao imperfekcija tornja (toranj je nagnut).

- Posebnu pažnju na zakretanje temelja uslijed **nejednolikog opterećenja** potrebno je posvetiti kod nevezanih tala.

- **Kratkotrajno zakretanje** temelja φ uslijed djelovanja **vjetra**:

$$\varphi = \frac{M_{Gr}}{c_s \cdot I_{Gr}}$$

- M_{Gr} moment savijanja na kontaktu temelja sa tlom
- I_{Gr} moment tromosti poprečnog presjeka temelja na spoju sa tlom
- c_s krutost tla na zakretanje

TEMELJENJE TORNJEVA

UTJECAJ ZAKRETANJA TEMELJA

- Za proračun vibracija i proračun deformacija za [GSU](#) potrebno je poznavati

otpor tla na kratkotrajno djelovanje sile:

- $E_{s,dyn}$ dinamički modul elastičnosti
- A_{Gr} površina temelja
- $f' = 0,25$ faktor oblika vibracija
- $t_{GR} = 0,25 \cdot \sqrt{A_{Gr}}$ djelotvorna dubina antimetričnog djelovanja

$$C_{s,dyn} = \frac{E_{s,dyn}}{f' \cdot \sqrt{A_{GR}}} = \frac{E_{s,dyn}}{t_{GR}}$$

- Za proračun deformacija po teoriji 2. reda za [GSN](#) potrebno je uzeti u obzir i zakretanje temelja.

- Navedeni utjecaj može se uzeti u obzir preko statičkog modula elastičnosti $E_{s,stat}$ umjesto dinamičkog modula.

- **Statički koeficijent podloge:**

- Ovisno o vrsti tla odnos dinamičkog i statičkog modula elastičnosti:

- Nevezana tla: $\approx 2 < E_{s,dyn} / E_{s,stat} < \approx 4$
- Vezana tla: $\approx 6 < E_{s,dyn} / E_{s,stat} < \approx 20$

$$C_{s, stat} = \frac{E_{s,stat}}{f' \cdot \sqrt{A_{GR}}} = \frac{E_{s,stat}}{t_{GR}}$$

TEMELJENJE TORNJJEVA

UTJECAJ ZAKRETANJA TEMELJA

- Krutost temelja na rotaciju modelira se sa oprugom sljedećih karakteristika:

$$c_{\varphi} = \frac{\partial M_{GR}}{\partial \varphi} = c_S \cdot I_{GR} = \frac{E_S \cdot I_{GR}}{t_{GR}} = \frac{4 \cdot E_S \cdot I_{GR}}{\sqrt{A_{GR}}}$$

- Vrijednost krutosti opruge za različite oblike temelja:

a) Kvadratni temelj

$$c_{\varphi} = 0,333 \cdot E_S \cdot a_{GR}^3$$

- duljina stranice a_{GR}
- djelotvorna dubina djelovanja $t_{GR} = 0,25 \cdot a_{GR}$

b) Kružni temelj

$$c_{\varphi} = \frac{E_S \cdot I_{GR}}{t_{GR}} = 0,125 \cdot E_S \cdot \sqrt{\pi} \cdot d_{GR}^3 = 0,222 \cdot E_S \cdot d_{GR}^3$$

- promjer d_{GR}
- djelotvorna dubina djelovanja $t_{GR} = 0,25 \cdot \sqrt{A_{GR}} = 0,125 \cdot \sqrt{\pi} \cdot d_{GR} = 0,222 \cdot d_{GR}$

c) Prstenasti temelj

$$c_{\varphi} = \frac{E_S \cdot I_{GR}}{t_{GR}} > 0,222 \cdot E_S \cdot \frac{d_a^4 - d_i^4}{d_a}$$

- unutarnji promjer d_i , vanjski promjer d_a
- djelotvorna dubina temelja procijenjena je na $t_{GR} < 0,222 \cdot d_a$

BETONSKI TORNJEVI

SADRŽAJ PREDAVANJA (2.dio)

- Proračun i dimenzioniranje
 - Općenito
 - Proračun prema teoriji 2. reda
 - Modeliranje konačnim elementima
 - Stabilnost tornjeva na mekom tlu
 - Približna provjera osjetljivosti na vrtloženje
 - Djelovanje vjetra
 - Pritisak vjetra
 - Hrvatski nacionalni dodatak
 - Rezultirajuće opterećenje
 - Statički i dinamički pritisak
 - Osnovni period oscilacija
 - Faktor udara
 - Aerodinamički faktor
 - Postupak proračuna
 - Analiza vibracija telekomunikacijskog tornja
 - Ostala promjenljiva djelovanja
 - Radni dijagrami materijala
 - Dijagrami interakcije
 - Proračun deformacija
 - Utjecaj otvora u poprečnom presjeku za GSN
 - Dokaz GSU
 - Tornjevi građeni od predgotovljenih elemenata



PRORAČUN TORNJEVA

OPĆENITO

□ Opterećenja tornjeva:

- vlastita težina,
- djelovanje vjetra,
 - dominantan utjecaj: jačina i smjer vjetra + oscilacije vjetra
- potresna opterećenja,
- temperaturne promjene,
- geometrijske imperfekcije građevine,
- slijeganje temeljnog tla

□ Ograničenje sila i naprezanja

- Faktori sigurnosti

□ Metode proračun:

- 2D i 3D MKE (FEM) proračuni

PRORAČUN TORNJJEVA

PRORAČUN PREMA TEORIJI 2. REDA

- prva faza: proračun po teoriji I. reda.
- druga faza: približni postupak za određivanje povećanja sila po teorije 2. reda:

- odnos modula elastičnosti čelika i betona:

$$\alpha_E = \frac{E_S}{E_{cm}}$$

- idealni moment tromosti kružnog prstena:

- d_a vanjski promjer prstena
- d_i unutarnji promjer prstena
- r_a vanjski polumjer prstena
- r_i unutarnji polumjer prstena
- t debljina prstena
- ρ_a koeficijent armiranja vanjske armature
- ρ_i koeficijent armiranja unutarnje armature

$$I_i = \frac{\pi}{64} \cdot (d_a^4 - d_i^4) + \pi \cdot \alpha_E \cdot (r_a^3 \cdot \rho_a + r_i^3 \cdot \rho_i) \cdot t$$

- faktor uvećanja momenta savijanja dobivenog prema teoriji I. reda:

- N vertikalna sila na temelj tornja
- h_F visina tornja
- E_{cm} srednja vrijednost sekantnog modula elastičnosti betona
- I_c srednja vrijednost momenta tromosti

$$\alpha^2 = \frac{N \cdot h_F^2}{E_{cm} \cdot I_c}$$

- moment prema teoriji 2. reda:

$$M_{Ed}^{II} = M_{Ed}^I \cdot (1 + 0,90 \cdot \alpha^2)$$

PRORAČUN TORNJEVA

MODELIRANJE KONAČNIM ELEMENTIMA

- za granično stanje nosivosti betonskog tornja potrebno je obuhvatiti
 - geometrijsku nelinearnost (teorija 2. reda) i
 - materijalnu nelinearnost

- Numerički model:
 - štapni model tornja sa razmakom čvorova
 - od $a \approx 1 \cdot \emptyset$ do $2 \cdot \emptyset$
 - gdje je $\emptyset$ promjer tornja
 - štapni elementi s linearno promjenjivim kružnim poprečnim presjekom
 - popustljivost tla ispod temelja na zakretanje modelirano je oprugom

PRORAČUN TORNJEVA

STABILNOST TORNJEVA NA MEKOM TLU

- na deformiranom statičkom sustavu (prema teoriji 2. reda !!) nastaje dodatni moment zakretanja:

$$M_1 = G \cdot h_s \cdot \sin \vartheta \cong G \cdot h_s \cdot \vartheta$$

- koji djeluje istodobno sa momentom savijanja od horizontalnog djelovanja:

$$M_2 = H \cdot h$$

- oba momenta djeluju na temelj kontaktne površine A , momentom tromosti I i modulom k_s uzrokujući naprezanja na tlo:

$$\Delta\sigma = \pm (M_1 + M_2) \cdot \frac{x}{I} = \pm k_s \cdot x \cdot \operatorname{tg} \vartheta \cong \pm k_s \cdot x \cdot \vartheta$$

- uvrštavanjem M_1 i M_2 dobivamo:

- u ovoj jednadžbi sa lijeve strane je djelovanje, a s desne otpornost

$$H \cdot h = (k_s \cdot I - G \cdot h_s) \cdot \vartheta$$

- stabilnost tornja je ostvarena, ako vrijedi:

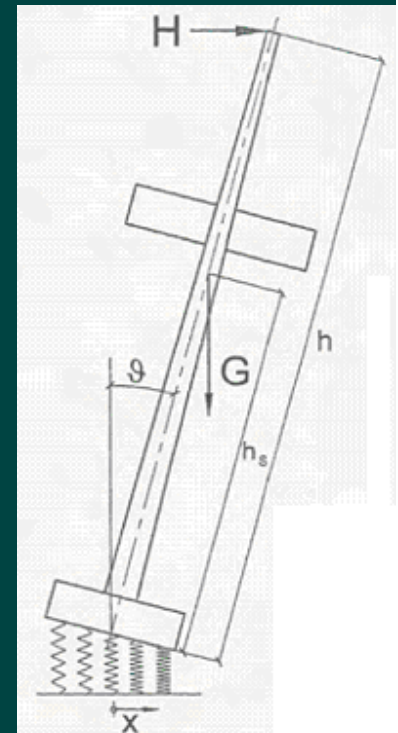
$$h_s < k_s \cdot \frac{I}{G}$$

što odgovara:

- s slijeganje (potrebno ga je prethodno procijeniti i to kao donju vrijednost za dugotrajno centrično opterećenje temelja)
 - k_s koeficijent posteljice

$$I/(s \cdot A) \leq G/(k_s \cdot A)$$

- ako postoji sumnja u rezultate plitkog temeljenja, potrebno je toranj duboko temeljiti



PRORAČUN TORNJEVA

PRIBLIŽNA PROVJERA OSJETLJIVOSTI NA VRTLOŽENJE

□ kritična brzina vjetra:

$$v_{\text{crit}} = d \cdot f / S$$

- $f = 1/T$ vlastita frekvencija
- $S =$ Strouhal-ov broj ($S=0,2$ za kružni cilindar)
- $d =$ vanjski promjer tornja u području vrtložne pobude (= $5/6$ visine tornja kod stožastog oblika)

□ Reynolds-ov broj:

$$R_e = d \cdot v_{\text{crit}} / \nu$$

- $\nu =$ kinematička viskoznost zraka ($1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)

□ Sila pobude:

$$p_{\text{lat}} = c_{\text{lat}} \cdot \rho / 2 \cdot v_{\text{crit}}^2 \cdot d \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

- c_{lat} aerodinamički koeficijent pobude ($0,2 \leq c_{\text{lat}} \leq 0,7$)
- ρ specifična težina zraka = $1,25 \text{ kg/m}^3$
- $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ kružna frekvencija

na duljini djelovanja od vrha tornja:

$$L_j \leq 12 \cdot d$$

□ Povećanje uslijed rezonancije:

$$C = \pi / \delta$$

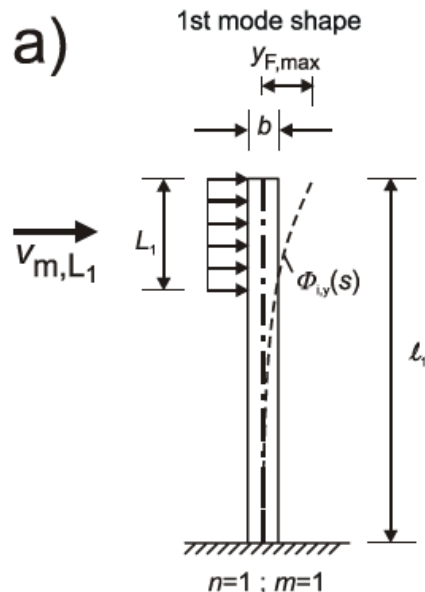
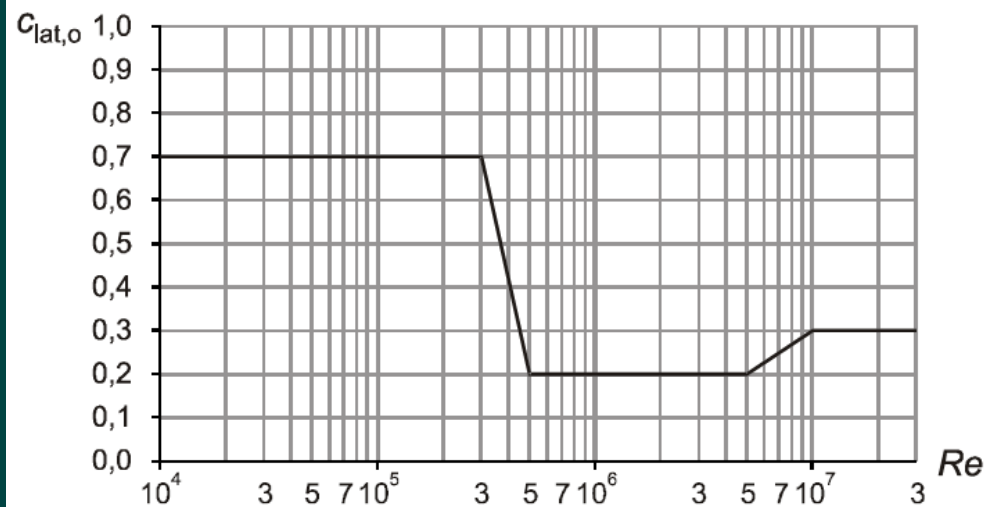
- $\delta =$ logaritamski dekrement prigušenja

□ Moment savijanja na gornjem rubu temelja:

$$M = C \cdot p_{\text{lat}} \cdot L_j \cdot (h_f - L_j / 2)$$

PRORAČUN TORNJEVA

PRIBLIŽNA PROVJERA OSJETLJIVOSTI NA VRTLOŽENJE



Critical wind velocity ratio

$$\frac{V_{crit,j}}{V_{m,Lj}} \leq 0,83$$

$$0,83 \leq \frac{V_{crit,j}}{V_{m,Lj}} < 1,25$$

$$1,25 \leq \frac{V_{crit,j}}{V_{m,Lj}}$$

c_{lat}

$$c_{lat} = c_{lat,0}$$

$$c_{lat} = \left(3 - 2,4 \cdot \frac{V_{crit,j}}{V_{m,Lj}} \right) \cdot c_{lat,0}$$

$$c_{lat} = 0$$

where:

$c_{lat,0}$ is the basic value of c_{lat} as given in Table E.2 and, for circular cylinders, in Figure E.2

$V_{crit,i}$ is the critical wind velocity (see Expression (E.1))

$V_{m,Lj}$ is the mean wind velocity (see 4.2) in the centre of the effective correlation length as defined in Figure E.3

PRORAČUN TORNJEVA

DJELOVANJE VJETRA: Pritisak vjetra

- prijedlog pritiska vjetra na tornjeve do visine 200 m prema njemačkim normama:

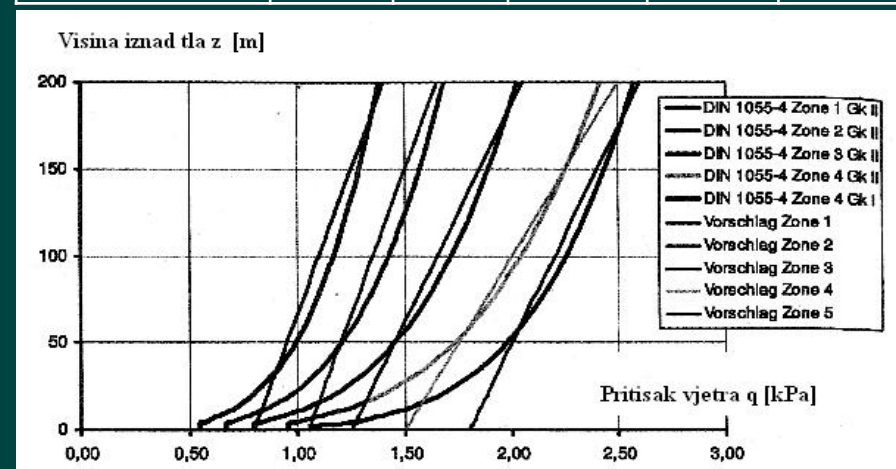
- vjetrovna zona 1: $q_i = 0,80 + 0,003 \cdot z_i$ [kPa]
- vjetrovna zona 2: $q_i = 1,05 + 0,003 \cdot z_i$ [kPa]
- vjetrovna zona 3: $q_i = 1,25 + 0,004 \cdot z_i$ [kPa]
- vjetrovna zona 4: $q_i = 1,50 + 0,005 \cdot z_i$ [kPa]
- vjetrovna zona 5: $q_i = 1,80 + 0,004 \cdot z_i$ [kPa]

Vjetrovna zona WZ	I	II	III	IV	V
v_{ref} [m/s]	22,5	25,0	27,5	30,0	32,5

- u Hrvatskoj djelovanje vjetra treba definirati odgovarajućim Nacionalnim dodatkom normi EN 1991-1-4

- preporuka: za brzinu vjetra od 35 m/s uzeti

$$q_i = 1,20 \cdot 1,80 + 0,004 \cdot h = 2,16 + 0,004 \cdot z_i$$



- povećanje pritiska vjetra prema DIN 1056, A.1.2:

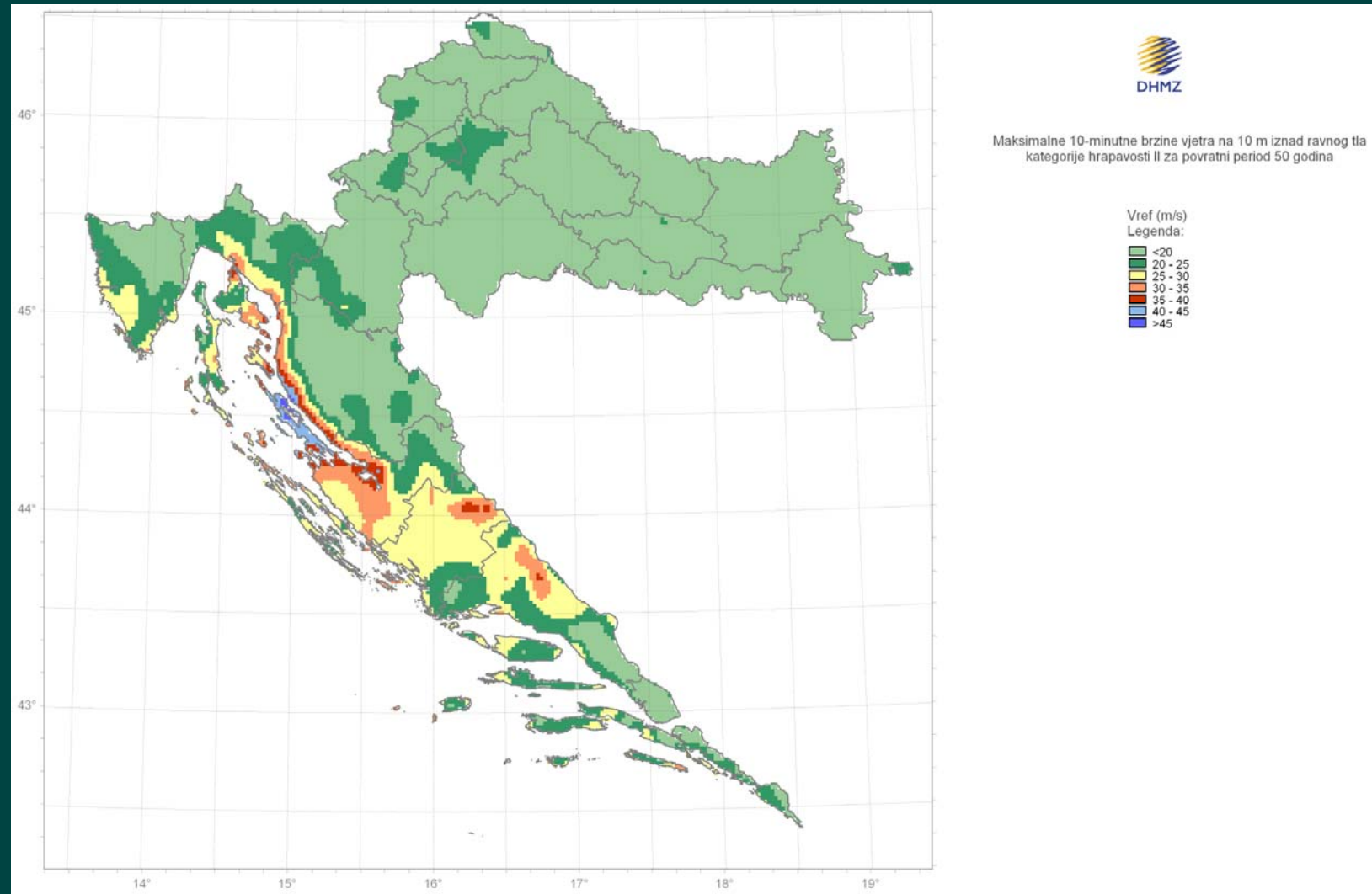
$$q_i = q_0 + q' \cdot z_i \quad [\text{kPa}]$$

- q_0 - pritisak vjetra na površini terena [kPa]
- z_i - visina poprečnog presjeka tornja iznad površine tla [m]
- q' - 98 % fraktila za srednju vrijednosti udara vjetra (pet sekundne prosječne vrijednosti)

PRORAČUN TORNJEVA

DJELOVANJE VJETRA: HR nacionalni dodatak

- Meteorološka podloga za nacionalni dodatak HRN EN 1991-1-4 za djelovanje vjetra



PRORAČUN TORNJEVA

DJELOVANJE VJETRA: Rezultirajuće opterećenje

- Rezultirajuće opterećenje vjetrom na poprečni presjek tornja:

$$W_i = \varphi_B \cdot c_{fi} \cdot q_i \cdot A_i$$

- φ_B faktor udara vjetra
- c_{fi} aerodinamički koeficijent
- q_i pritisak vjetra
- A_i pripadna površina

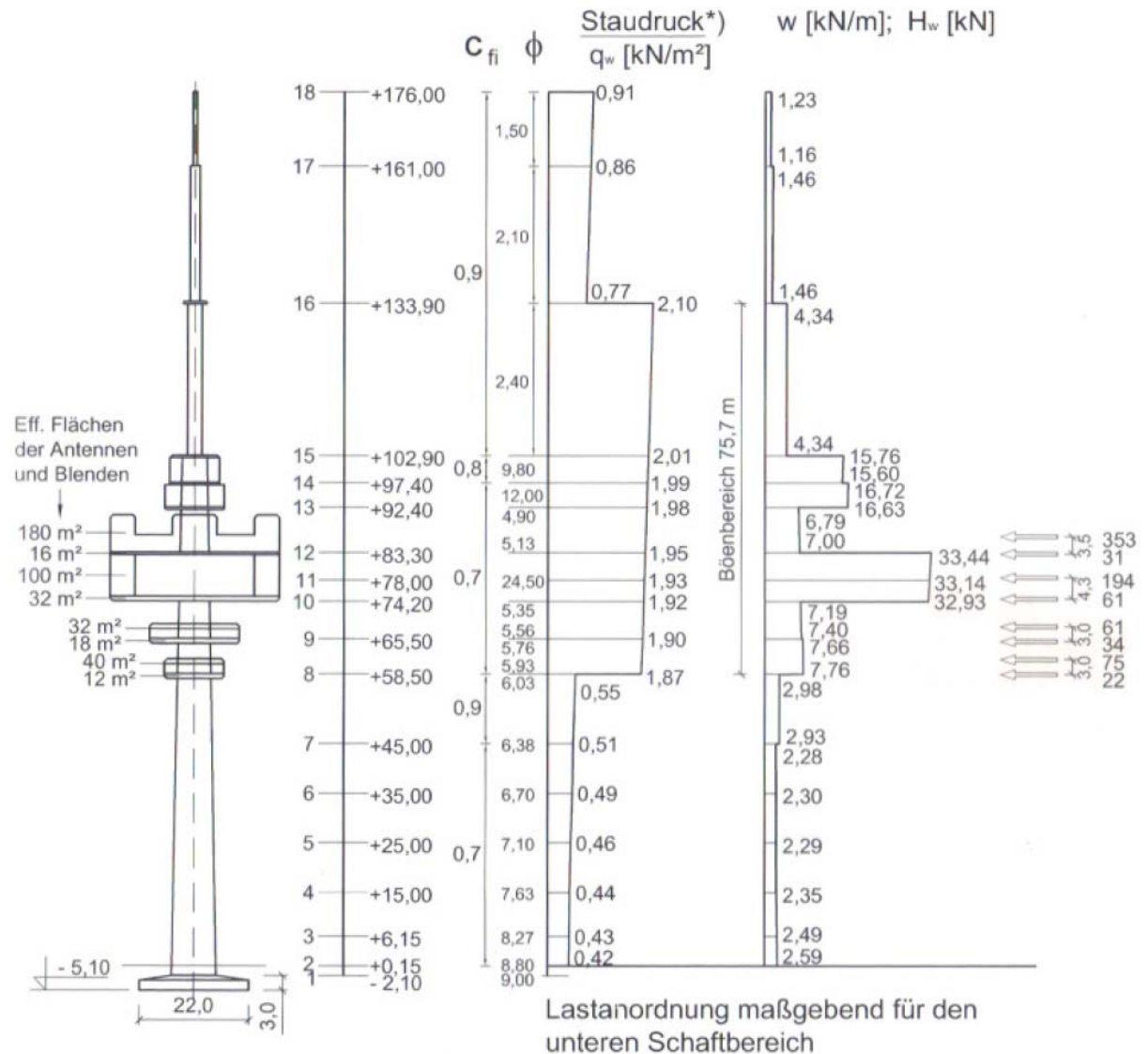


Bild 48. FTM Sülfeld – Windlasten

*) $\varphi_B = 1,95$

PRORAČUN TORNJEVA

DJELOVANJE VJETRA: Statički i dinamički pritisak

- **Statički pritisak** je određen kao srednja vrijednost deset-minutne brzine vjetra:

$$q_{i,stat} = \left[0,4 + 0,2 \cdot \frac{(z_i - 15)}{185} \right] \cdot q_i \geq 0,40 \cdot q_i$$

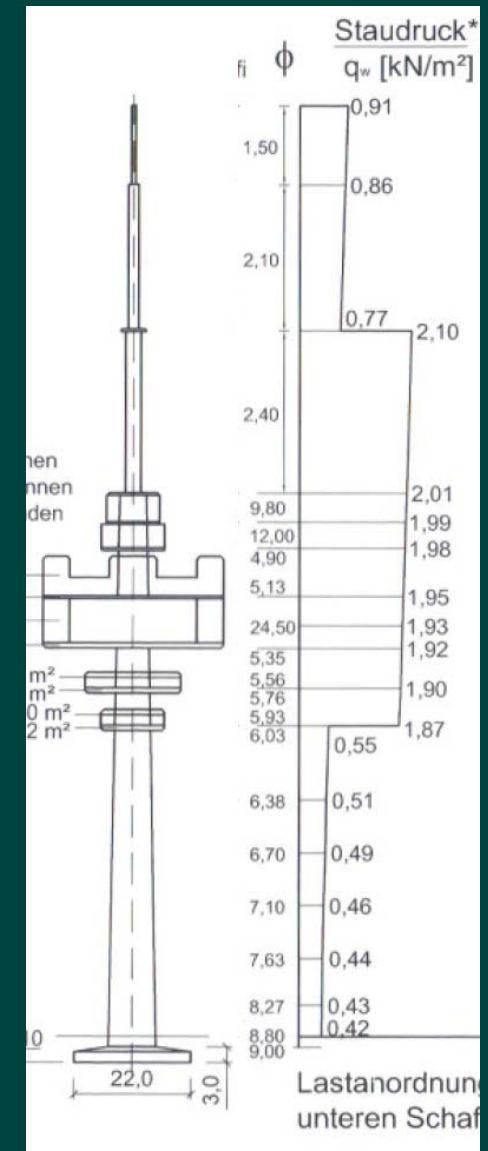
- *statički dio sile vjetra nije potrebno množiti sa faktorom udara vjetra*

- **Dinamički dio pritiska** vjetra množi se sa faktorom udara vjetra φ_B :

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

- **Ukupno djelovanje** je zbroj statičkog i dinamičkog djelovanja vjetra na visini tornja gdje djeluje udar vjetra, (70 m, provjeriti i $L_j=12d$ za silu pobude), a na ostalom dijelu djeluje $q_{i,stat}$ određen prema gornjoj jednadžbi

- *Temeljem višegodišnjih opažanja, djelovanje udara vjetra ograničeno je na duljinu od maksimalno 70 m*
- *Utjecaj udara vjetra se primjenjuje na različite visine (= $q_{i,dyn}$)*
- *U pravilu je najnepovoljnije nanošenje opterećenja na posljednjih 70 m visine tornja*



PRORAČUN TORNJEVA

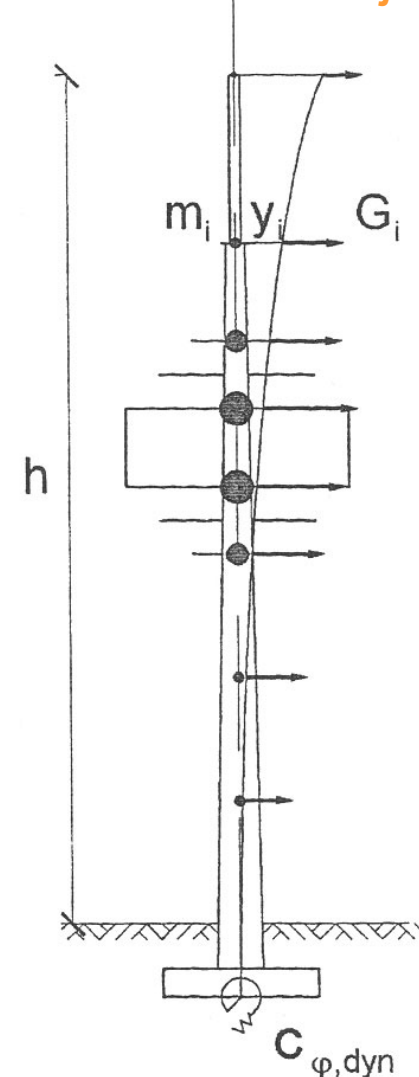
DJELOVANJE VJETRA: Osnovni period oscilacija

- Osnovni period oscilacija prema DIN 4131 (konzola - dno tornja upeto u temelj):

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

- G_i težina materijalne točke na tornju na udaljenosti y_i od osi temelja

Dinamički model tornja



PRORAČUN TORNJEVA

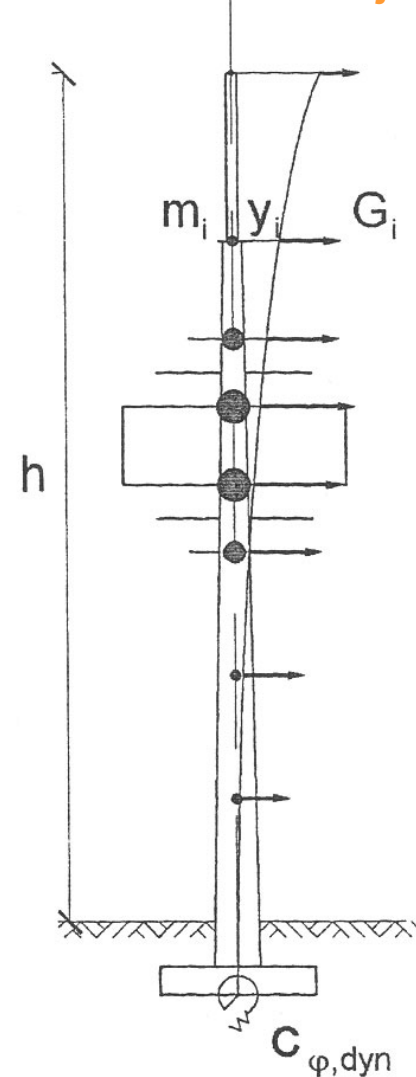
DJELOVANJE VJETRA: Faktor udara vjetra

- Faktor udara vjetra φ_B prema DIN 1056:

$$\varphi_B = \varphi_{B0} \cdot \eta$$

- osnovna vrijednost: $\varphi_{B0} = 1 + (0,042 \cdot T - 0,0018 \cdot T^2) \cdot \delta^{-0,63}$
- logaritamski dekrement prigušenja δ ,
 $\delta = 0,04$ za armirani beton za GSU
- koeficijent η : $\eta = 1,05 - \frac{\eta}{1000} \geq 1,0$

Dinamički model tornja



PRORAČUN TORNJEVA

DJELOVANJE VJETRA: Aerodinamički faktor

- Aerodinamički faktor prema DIN 1056, A. 1.3.:

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

- $c_{f0,i}$ osnovna vrijednost ad faktora za kružni armiranobetonski poprečni presjek:

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

- ψ faktor umanjenja

- h visina betonskog dijela tornja
- d vanjski promjer na polovici visine

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

- A pripadna površina na odsječku i :

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

- Djelovanje vjetra na odsječak i tornja:

$$W_i = \varphi_B \cdot c_{fi} \cdot q_i \cdot A_i$$

PRORAČUN TORNJEA

DJELOVANJE VJETRA: Postupak proračuna

1. određivanje osnovnog perioda oscilacija modela sa jednim stupnjem slobode pri čemu je sva masa smještena na visini radne platforme
2. prethodno dimenzioniranje na temelju izračunatog φ_B - faktora udara vjetra
3. točnije određivanje osnovnog perioda vibracija temeljem energetske metode (prema DIN 4131)
4. konačno određivanje φ_B - faktora udara vjetra
5. provjera osjetljivosti na vibracije
 - Moment savijanja na gornjem rubu temelja:

$$M = C \cdot p_{\text{lat}} \cdot L_j \cdot (h_f - L_j/2)$$

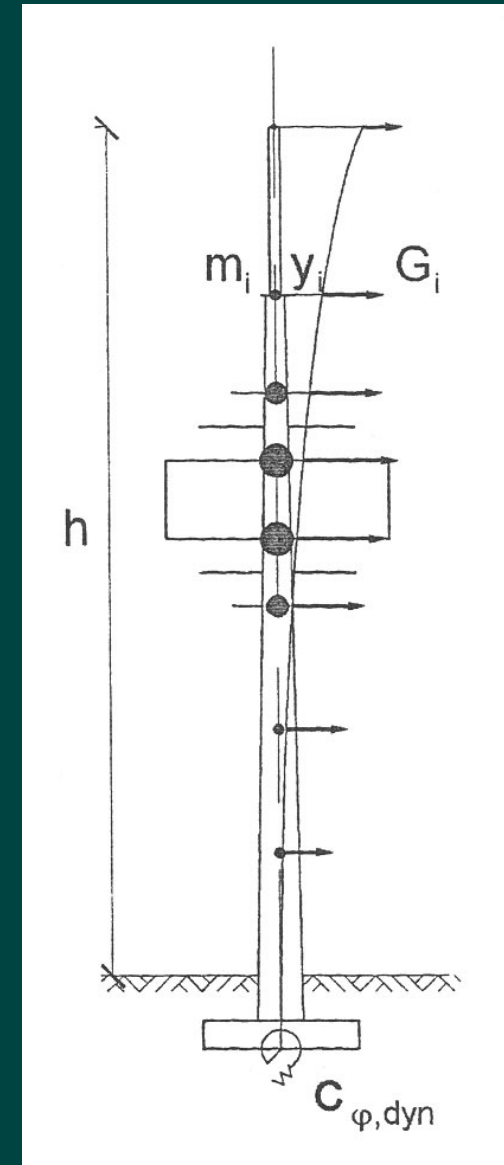
→ provjera naprezanja

□ u betonu

$$\Delta\sigma_c = M/W$$

□ i armaturi

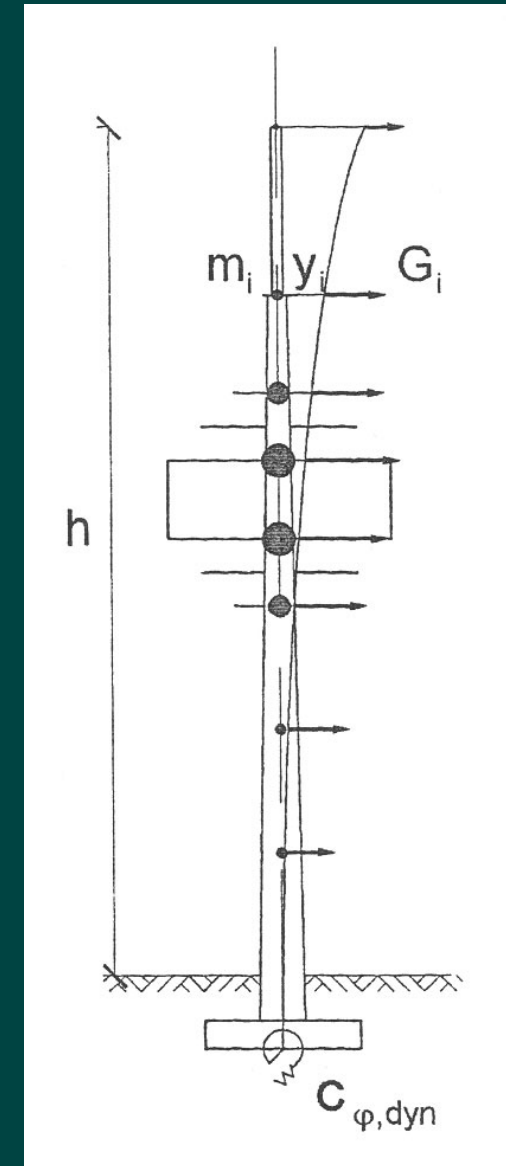
$$\Delta\sigma_s = \Delta\sigma_c(\text{na razini armature}) \times E_s/E_{cm}$$



PRORAČUN TORNJEVA DJELOVANJE VJETRA:

Analiza vibracija telekomunikacijskog tornja

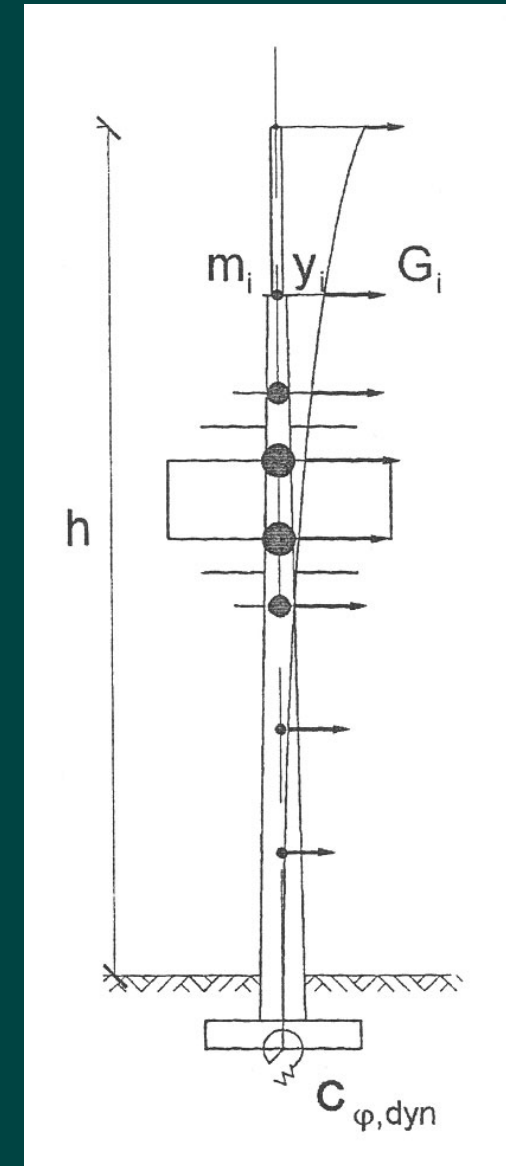
1. statički model s dinamičkim modulom elastičnosti
2. u modelu je potrebno uzeti
 - vlastitu težinu tornja i
 - nazovi-stalni dio korisnog opterećenja;
 - opterećenje se nanosi kao horizontalne koncentrirane sile G_i na štapnom modelu tornja
3. određivanje linije progibanja s ordinatama y_i na štapnom modelu
4. određivanje osnovnog perioda oscilacija prema DIN 4131 (slajd 33)
5. faktor udara vjetra φ_B prema DIN 1056 (slajd 34)



PRORAČUN TORNJEVA DJELOVANJE VJETRA:

Analiza vibracija telekomunikacijskog tornja

1. statički model s dinamičkim modulom elastičnosti
2. u modelu je potrebno uzeti
 - vlastitu težinu tornja i
 - nazovi-stalni dio korisnog opterećenja;
 - opterećenje se nanosi kao horizontalne koncentrirane sile G_i na štapnom modelu tornja
3. određivanje linije progibanja s ordinatama y_i na štapnom modelu
4. određivanje osnovnog perioda oscilacija prema DIN 4131 (slajd 33)
5. faktor udara vjetra φ_B prema DIN 1056 (slajd 34)



PRORAČUN TORNJEVA

OSTALA PROMJENLJIVA DJELOVANJA

□ Korisno opterećenje

■ Korisno opterećenje unutar tornja

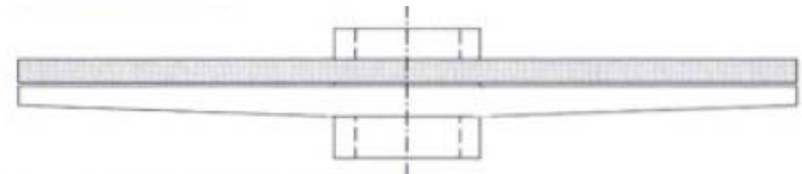
- opterećenje opremom ili korisno opterećenje na stubištu
- ovo opterećenje se nanosi kao linijsko opterećenje po jedinici visine tornja
- djeluje sa ekscentricitetom e_N

■ Korisno opterećenje na platformama

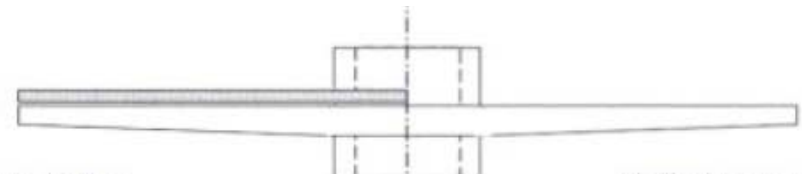
- opterećenje antena ili
- korisno opterećenje

□ Opterećenje snijegom na platformama

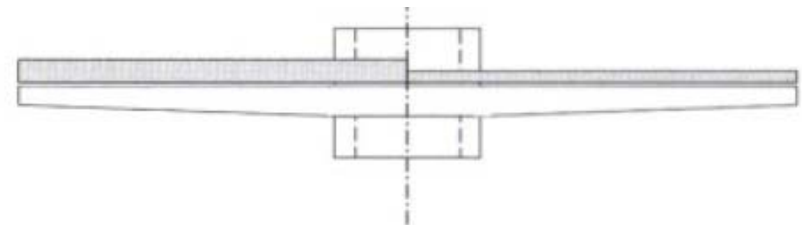
a) Puno opterećenje cijele platforme



b) Pola opterećenja jedne polovice platforme



c) Pola opterećenja cijele platforme + pola opterećenja jedne polovice platforme



Raspored korisnog opterećenja na platformi

PRORAČUN TORNJEVA

OSTALA PROMJENLJIVA DJELOVANJA

□ Temperaturno djelovanje

- nije potrebno promatrati deformacije uslijed jednostranog zagrijavanja tornja izloženog djelovanju sunca prema DIN 1056
 - faktor kombinacije za djelovanje temperature sa vjetrom iznosi nula za granično stanje nosivosti GSN)
- temperaturni gradijent u stijenci tornja zbog različitih klimatskih uvjeta prema DIN 1056, 7.6.1.
 - $\Delta T = \pm 15^{\circ} \text{ C}$
 - iz toga slijedi termički gradijent deformacije:

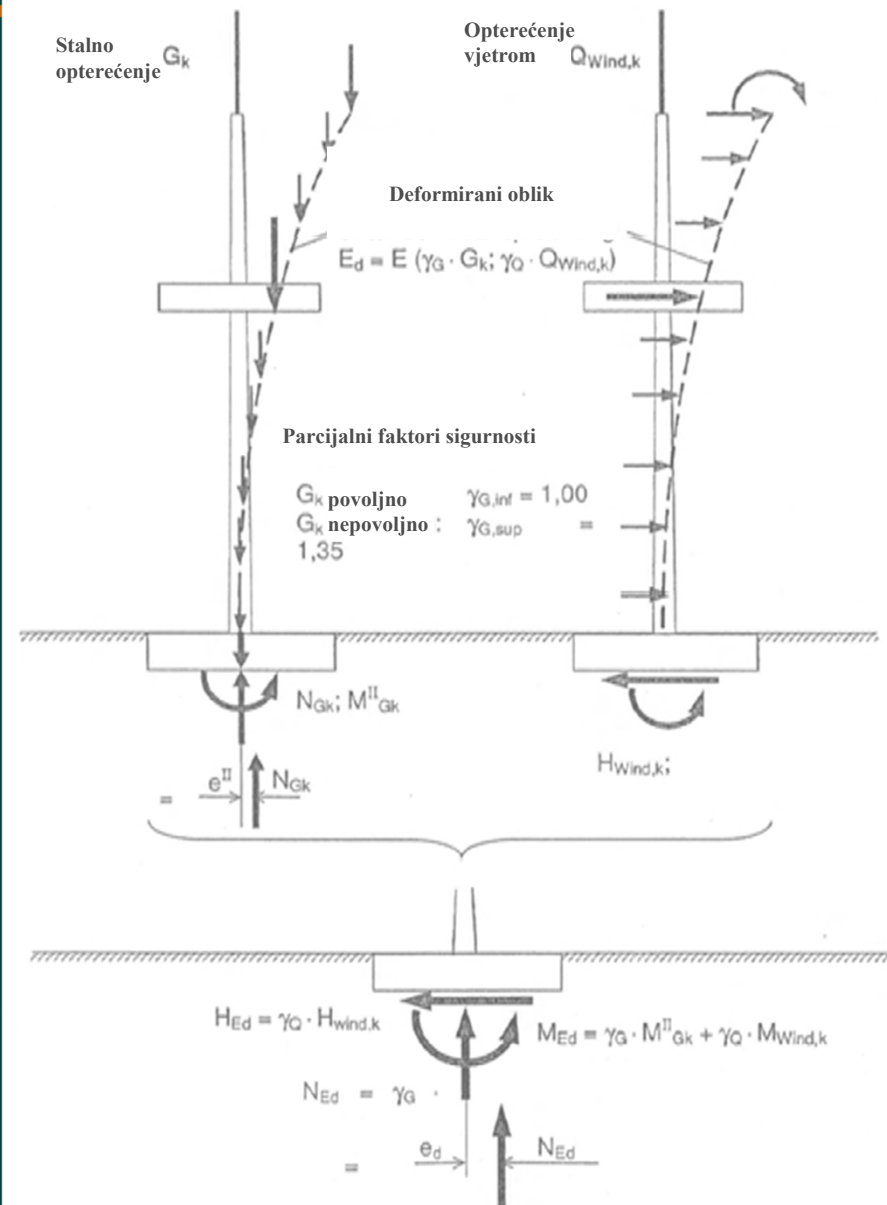
$$\varepsilon_T = \pm \alpha_T \cdot \frac{\Delta T}{2} = \pm 15 \cdot \frac{10^{-5}}{2} = \pm 0,075$$

PRORAČUN TORNJEVA

KOMBINACIJE DJELOVANJA

- 1.) Kombinacija max E_d
 - Maksimalna vertikalna sila
 $N_{Sd, \max} (1,35 \cdot G + 1,50 \cdot Q)$
 - maksimalni moment savijanja
 $M_{Sd, \max} (1,50 \cdot Q_w)$
- 2.) Kombinacija min E_d
 - Minimalna vertikalna sila
 $N_{Sd, \min} (1,00 \cdot G)$
 - maksimalni moment savijanja
 $M_{Sd, \max} (1,50 \cdot Q_w)$

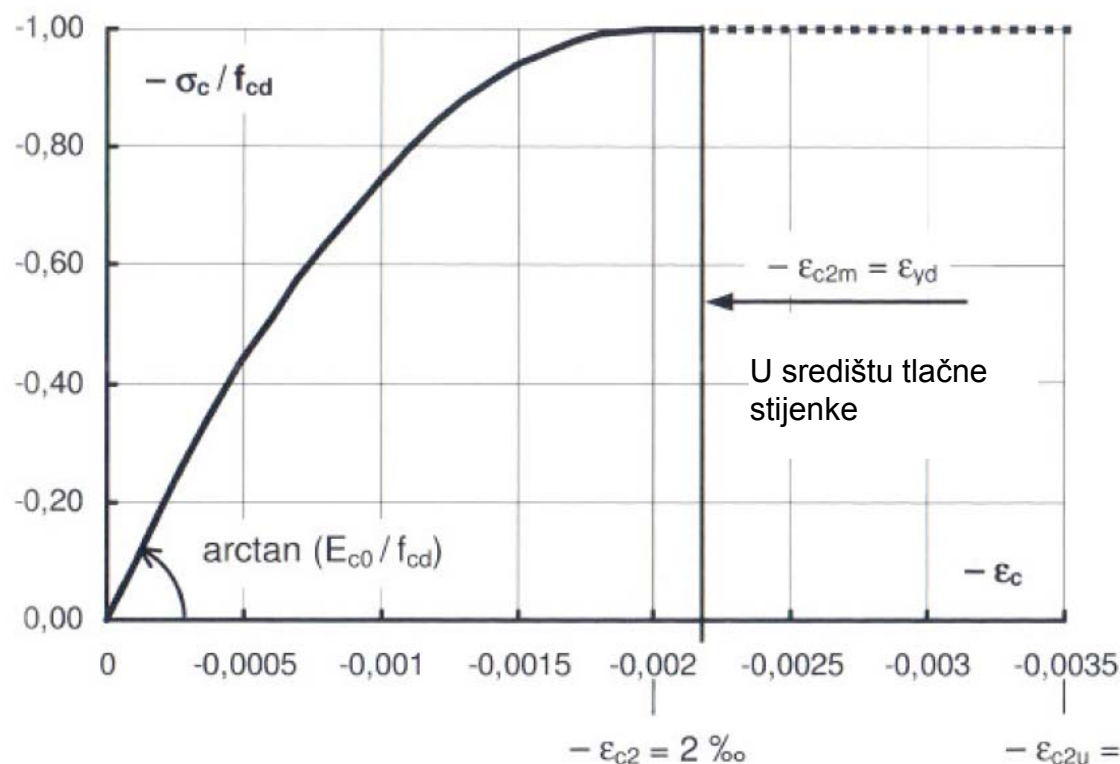
Primjer određivanja sila na temelj



PRORAČUN TORNJEVA

RADNI DIJAGRAMI MATERIJALA

□ Beton: proračunski dijagram



a) B35 nach DIN 1056:

$$\frac{\beta_R}{\gamma_{b2}} = \frac{23}{1,50} = 15,33 \text{ MPa}$$

$$E_{b0} = 1000 \cdot \beta_R / \gamma_{b2} \\ = 1000 \cdot 23 / 1,50 = 15.333 \text{ MPa}$$

$$-\epsilon_{c2m} = -\epsilon_{c2} = 2,0 \text{ ‰}$$

$$\left(< \frac{\beta_s}{\gamma_s \cdot E_s} = \frac{500}{1,25 \cdot 210.000} \right)$$

b) C 30/37 nach DIN 1045-01, 9:

$$f_{cd} = \alpha \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 0,85 \cdot \frac{30}{1,50} = 17,00 \text{ MPa}$$

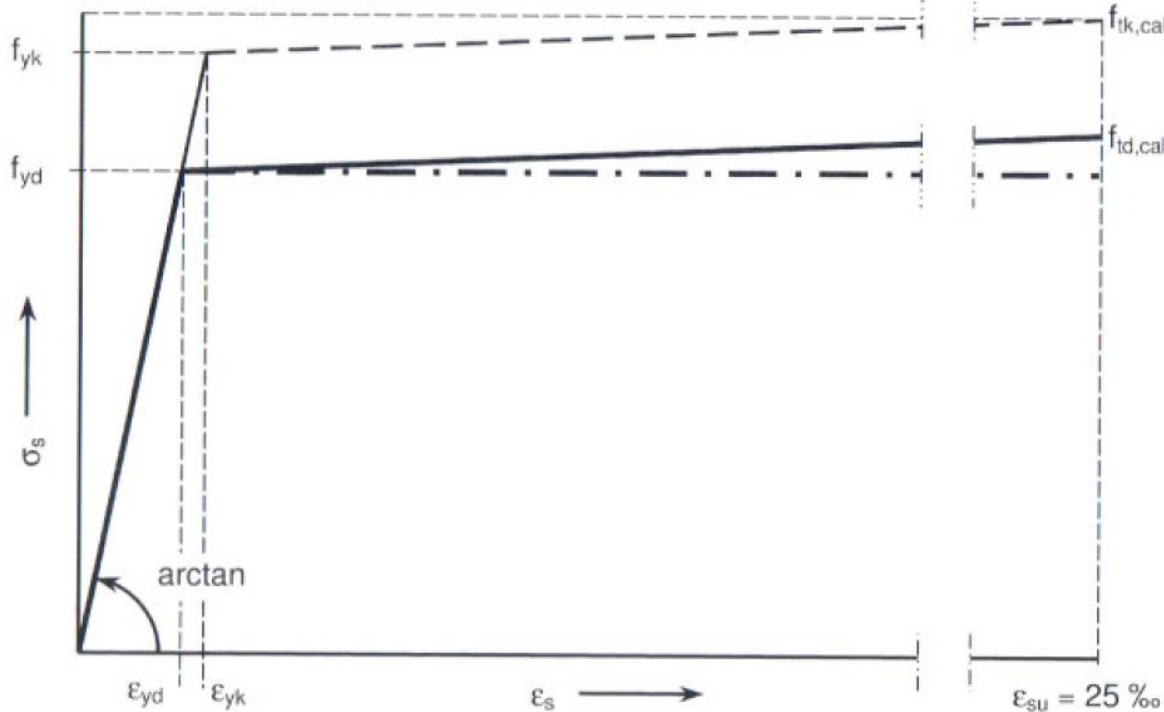
$$E_{c0} = 1000 \cdot f_{cd} = 1000 \cdot 17,0 = 17.000 \text{ MPa}$$

$$-\epsilon_{c2m} = \epsilon_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s \cdot E_s} = \frac{500}{1,15 \cdot 200.000} \\ = 2,174 \text{ ‰}$$

PRORAČUN TORNJEVA

RADNI DIJAGRAMI MATERIJALA

□ Čelik: proračunski dijagram



a) Nach DIN 1056:

$$\frac{\beta_s}{\gamma_{s2}} = \frac{500}{1,25} = 400 \text{ MPa}$$

$$E_s = 210.000 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{sy} = \frac{\beta_s}{\gamma_{s2} \cdot E_s} = \frac{400}{210} = 1,905 \text{ ‰} (< 2 \text{ ‰})$$

$$\epsilon_{su} = 5 \text{ ‰}$$

b) Nach DIN 1045-01, 9:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 434,8 \cong 435 \text{ MPa}$$

$$E_s = 200.000 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{434,8}{200} = 2,174 \text{ ‰} (> 2 \text{ ‰})$$

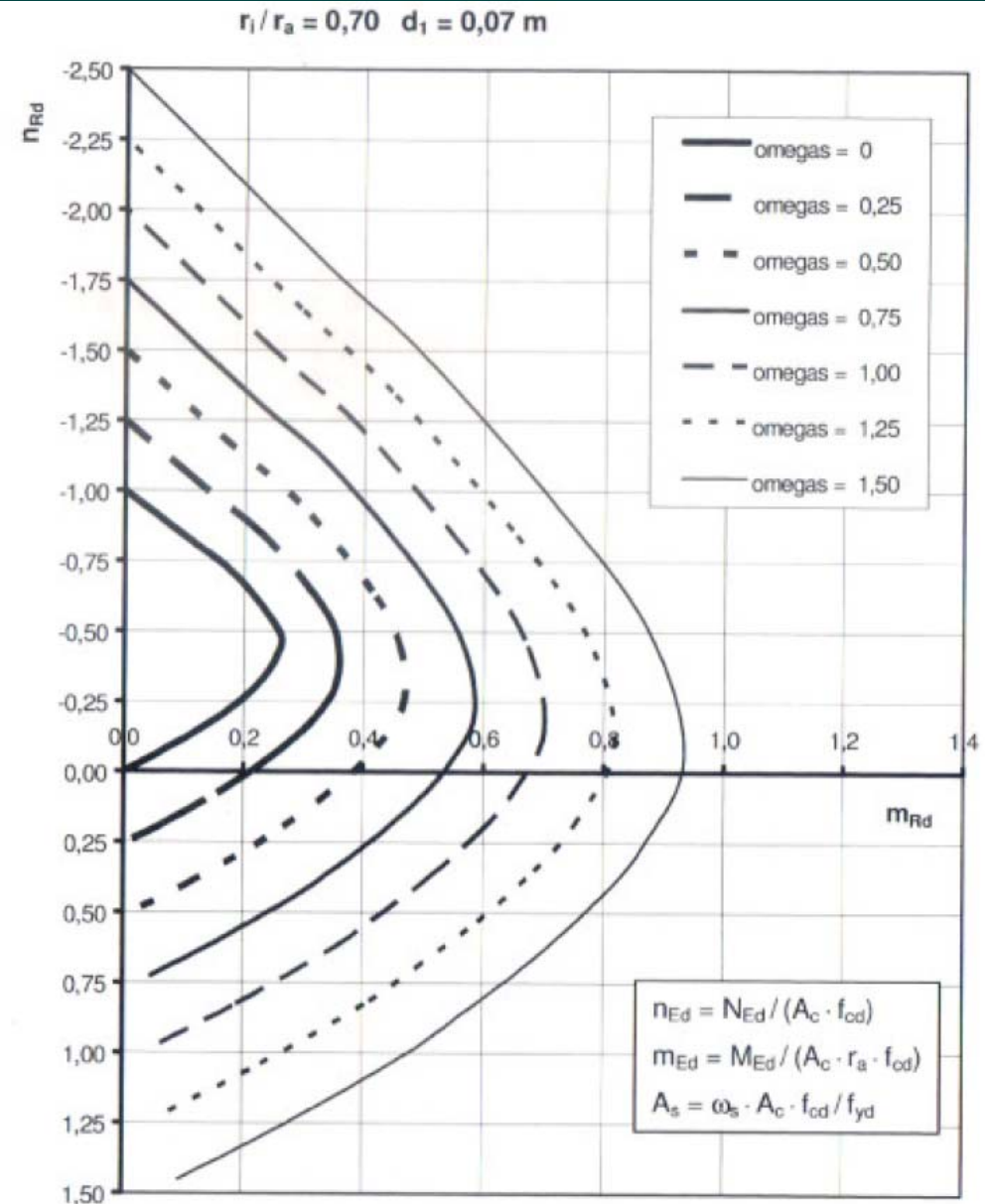
$$\epsilon_{su} = 25 \text{ ‰}$$

$$f_{td,cal} = \frac{f_{tk,cal}}{\gamma_s} = \frac{525}{1,15} = 456,5 \text{ MPa}$$

PRORAČUN TORNJEVA

DIJAGRAMI INTERAKCIJE N-M

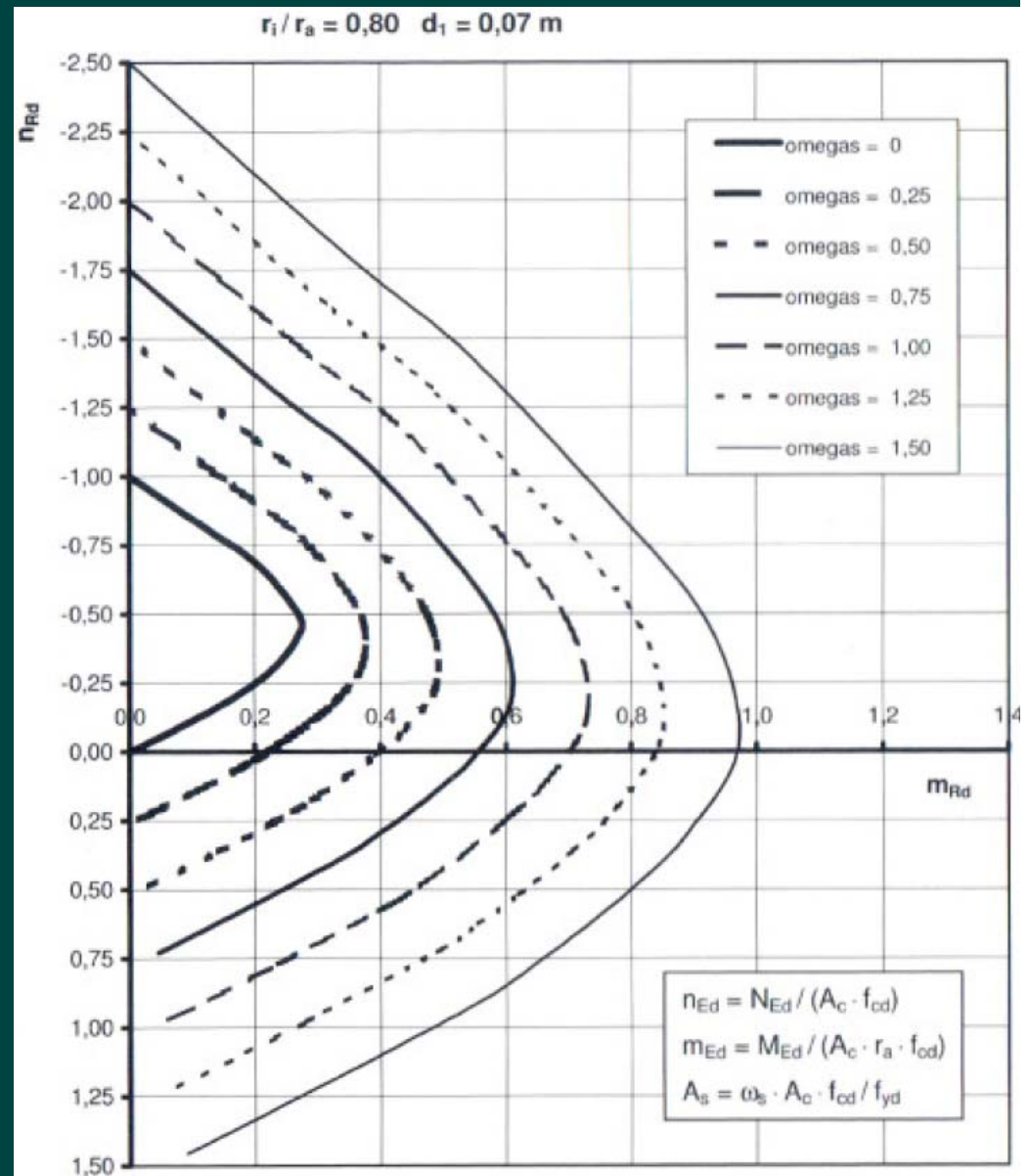
- Kružni prstenasti presjek
 - s odnosom unutrašnjeg i vanjskog radijusa 0,7,
 - debljinom stijenke 0,07 m,
 - za razrede betona C12/45 do C50/60



PRORAČUN TORNJEVA

DIJAGRAMI INTERAKCIJE N-M

- Kružni prstenasti presjek
 - s odnosom unutrašnjeg i vanjskog radijusa 0,8,
 - debljinom stijenke 0,07 m,
 - za razrede betona C12/45 do C50/60



PRORAČUN TORNJEVA

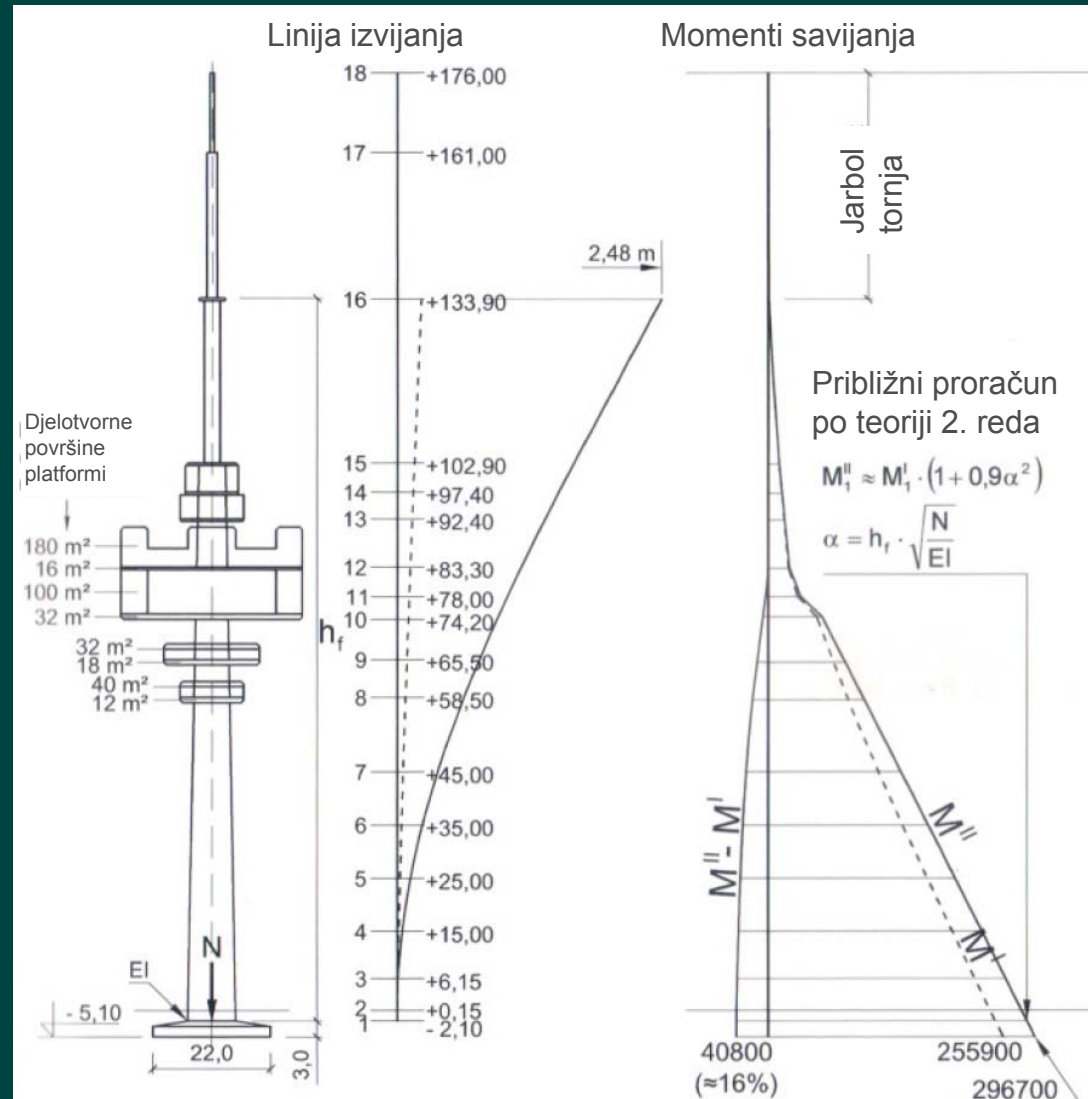
PRORAČUN DEFORMACIJA

□ Proračun prema teoriji 2. reda:

1. štapni model sa imperfekcijama
2. radni dijagram naprezanje – deformacija betona i čelika uključujući i vlačno očvršćenje
3. kritična kombinacija stalnog i promjenljivog djelovanja

□ Imperfekcije:

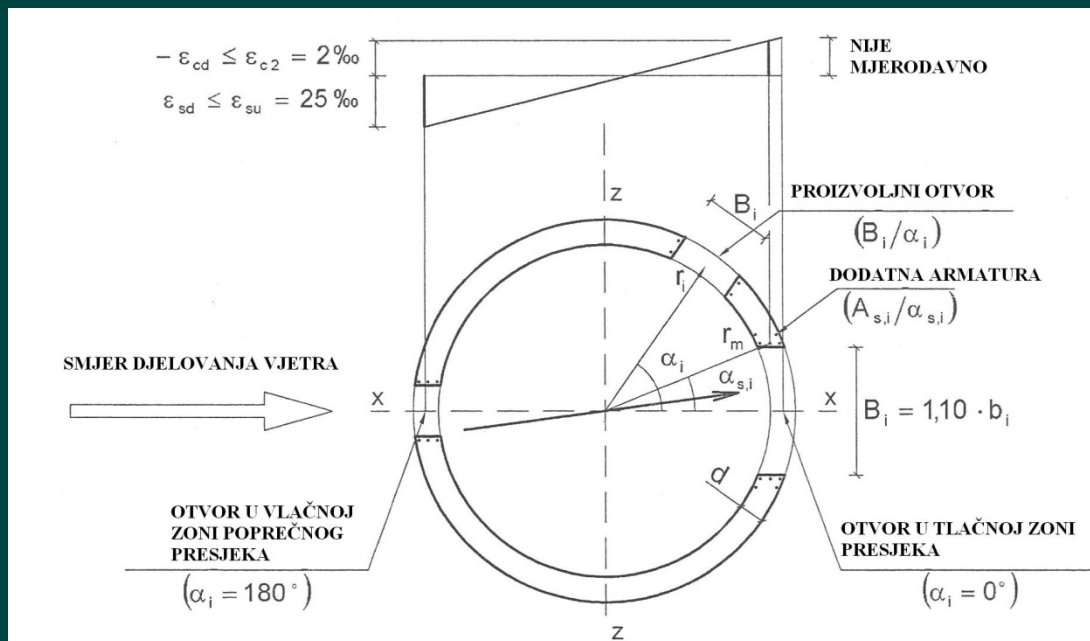
- a) netočnost izvedbe – nagib vertikalne osi od:
 $\varphi_0 = 1 / 500 = 0,002$
- b) nejednoliko slijeganje temelja ovisno o karakteristikama tla
- c) deformacije uslijed jednostranog zagrijavanja tornja sunčevim zrakama nije potrebno uzeti u obzir



PRORAČUN TORNJEVA

UTJECAJ OTVORA U POPREČNOM PRESJEKU (GSN)

- uzimanje u obzir otvora i dodatne armature oko otvora



- definiraju se uvjeti ravnoteže na poprečnom presjeku (N, M) koji omogućavaju iterativno određivanje konačnih deformacija poprečnog presjeka:

$$\sum_i \left[\frac{(\sigma_{ci} + \sigma_{si} \cdot \rho_s) \cdot A_{ci} - \sigma_{ci} \cdot B_i \cdot d}{B_i \cdot d + \sigma_{si} \cdot A_{si}} \right] \stackrel{!}{=} N_{Ed}$$

$$\sum_i \left[\frac{(\sigma_{ci} + \sigma_{si} \cdot \rho_s) \cdot A_{ci} \cdot \cos \alpha_i - \sigma_{bi} \cdot B_i \cdot d \cdot \cos \alpha_i + \sigma_{si} \cdot A_{si} \cdot \cos \alpha_i}{B_i \cdot d \cdot \cos \alpha_i + \sigma_{si} \cdot A_{si} \cdot \cos \alpha_i} \right] \cdot r_m \stackrel{!}{=} M_{z,E}$$

$$\sum_i \left[\frac{(\sigma_{ci} + \sigma_{si} \cdot \rho_s) \cdot A_{ci} \cdot \sin \alpha_i - \sigma_{bi} \cdot B_i \cdot d \cdot \sin \alpha_i + \sigma_{si} \cdot A_{si} \cdot \sin \alpha_i}{B_i \cdot d \cdot \sin \alpha_i + \sigma_{si} \cdot A_{si} \cdot \sin \alpha_i} \right] \cdot r_m \stackrel{!}{=} 0$$

PRORAČUN TORNJEVA

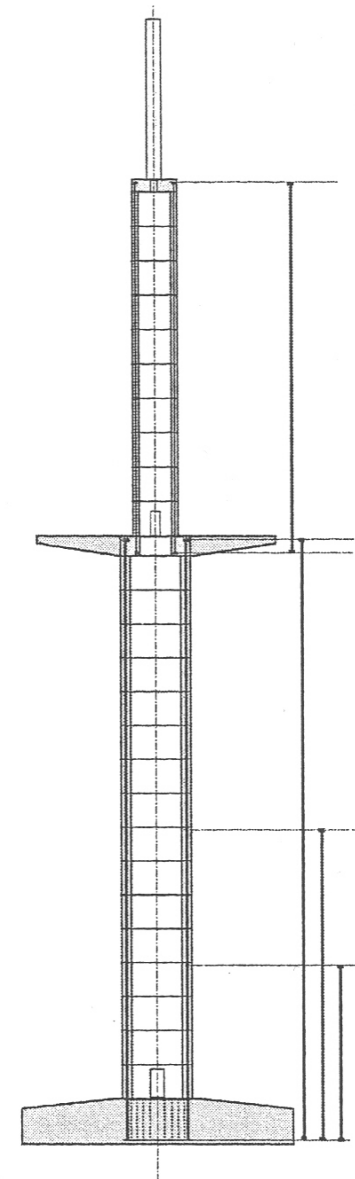
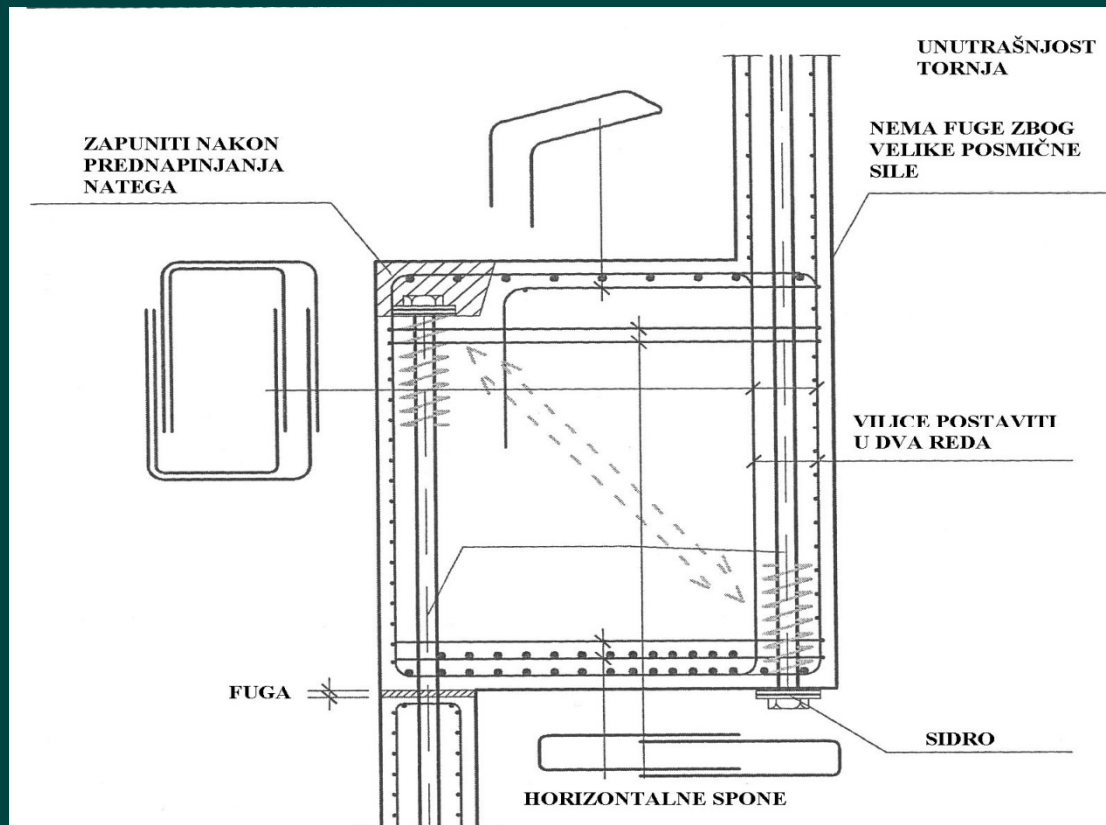
DOKAZ GSU

- Prema DIN 1045-1 za armiranobetonski toranj bez prednapinjanja:
- Ograničenje širina pukotina:
 - Ovisno o klasi izloženosti i zahtjevu investitora:
 1. klasa D , dokaz širine pukotina $w=0,2$ mm za čestu kombinaciju
 2. Klasa E, dokaz širine pukotina $w=0,3$ mm za nazovi-stalnu kombinaciju djelovanja
- Ograničenje deformacija:
 - kut zakretanja zbog uporabljivosti antene mora biti $\leq 0,5^\circ$ za čestu kombinaciju djelovanja: $1,0 \cdot G + 1,0 \cdot Q + 0,50 \cdot W$

PRORAČUN TORNJEVA

TORNJEVI GRAĐENI OD PREDGOTOVLJENIH ELEMENATA

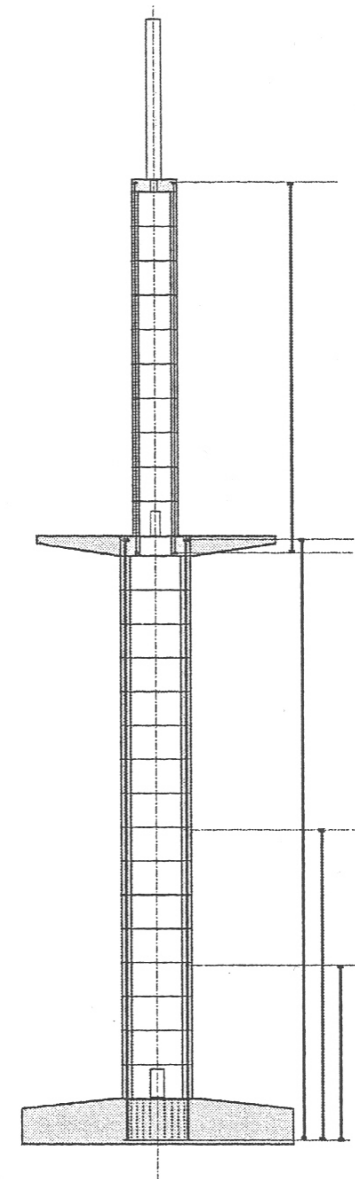
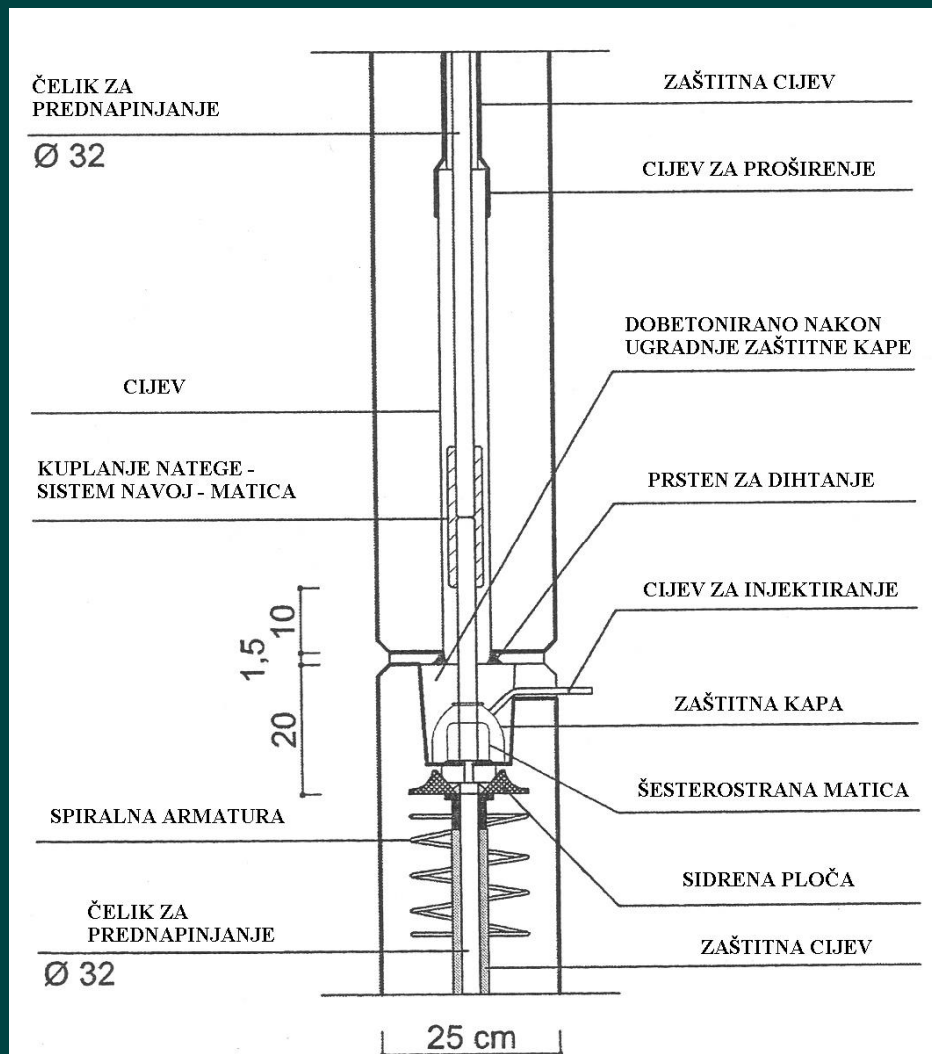
- Temelj
 - monolitan
 - u temelj su usidrene natege za prednapinjanje
 - tim nategama se unosi tlačna sila
- Armatura segmenta tornja sa prstenom



PRORAČUN TORNJEVA

TORNJEVI GRAĐENI OD PREDGOTOVLJENIH ELEMENATA

- Detalj spoja predgotovljenih armiranobetonskih segmenata



PRORAČUN TORNJEVA

TORNJEVI GRAĐENI OD PREDGOTOVLJENIH ELEMENATA

- U području unosa sila ispod i iznad mjesta prednapinjanja i podmetača nastaju **poprečne vlačne sile** u radijalnom smjeru:

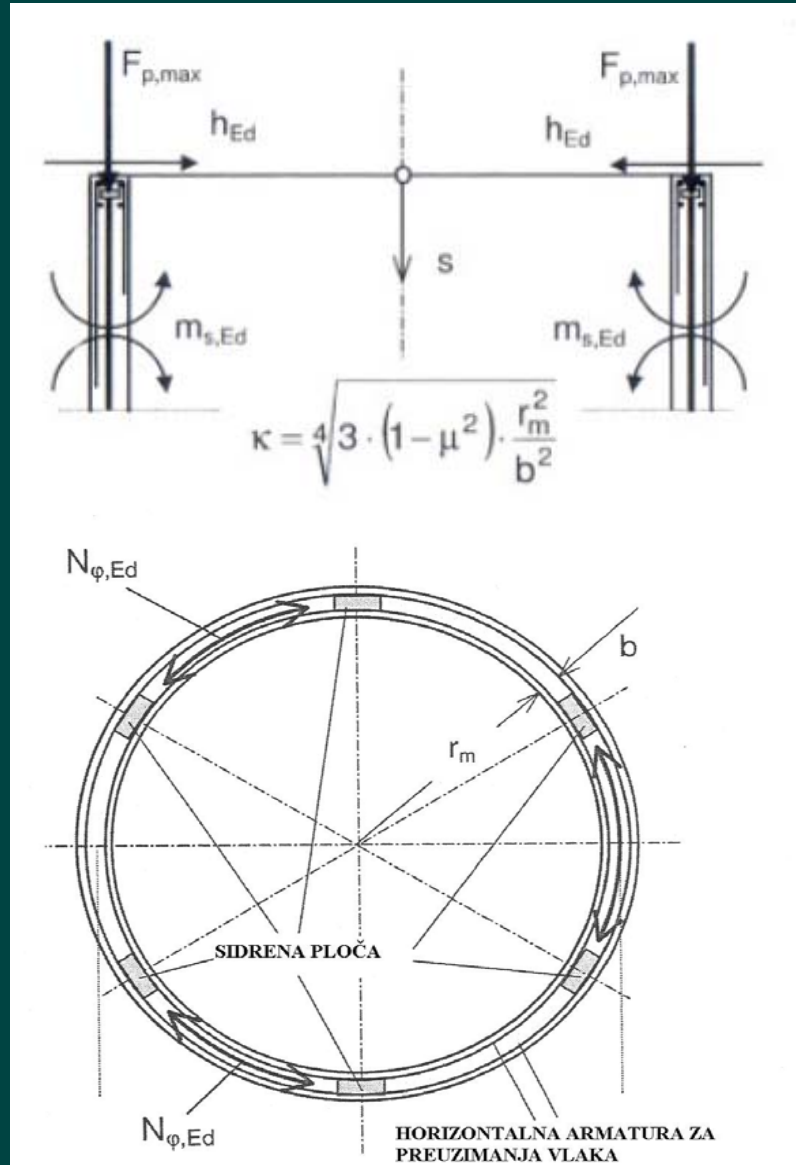
$$N_{\varphi,Ed} \leq 0,10 \cdot F_{p,max}$$

- To izaziva radijalne sile h_{Ed} ,

$$h_{Ed} = N_{\varphi,Ed} / r_m$$

koje na rubovima ljuske prouzrokuju momente savijanja $m_{s,Ed}$:

$$m_{s,Ed} = -h_{Ed} \cdot r_m \cdot e^{-\kappa \cdot s / r_m} \cdot \sin(\kappa \cdot s / r_m)$$



SPECIJALNE INŽENJERSKE GRAĐEVINE SLJEDEĆE PREDAVANJE



LJUSKE