





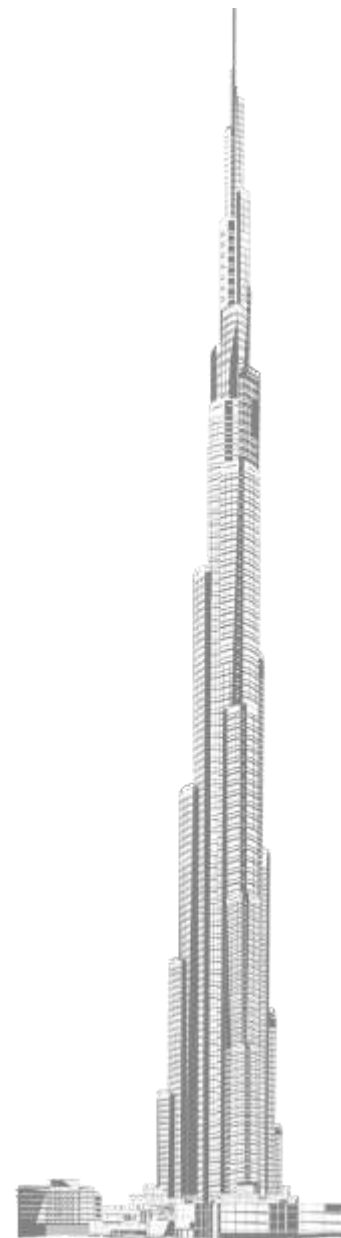
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Zavod za konstrukcije

Visoke građevine

Outrigger konstrukcije

doc.dr.sc. Goran Puž, dipl.ing.građ.
doc.dr.sc. Anđelko Vlašić, dipl.ing.građ.



Predavanje 9:

1. Uvod
2. Načelo outrigger sustava
3. Fizikalno ponašanje outrigger sustava
4. Proračun horizontalnog pomaka
5. Optimalizacija
6. Primjer iz prakse



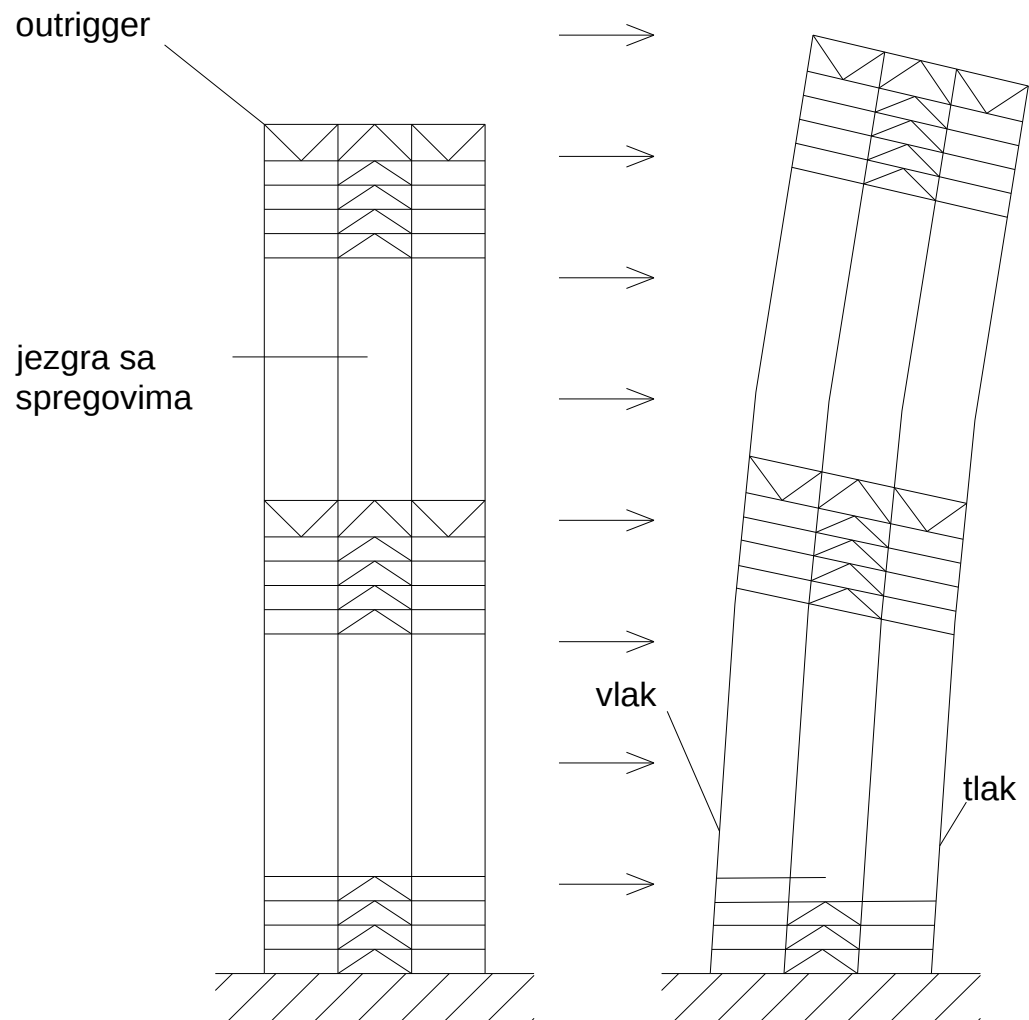
Uvod

- outrigger – izravni prijevod: potpora za čamac da se ne prevrne



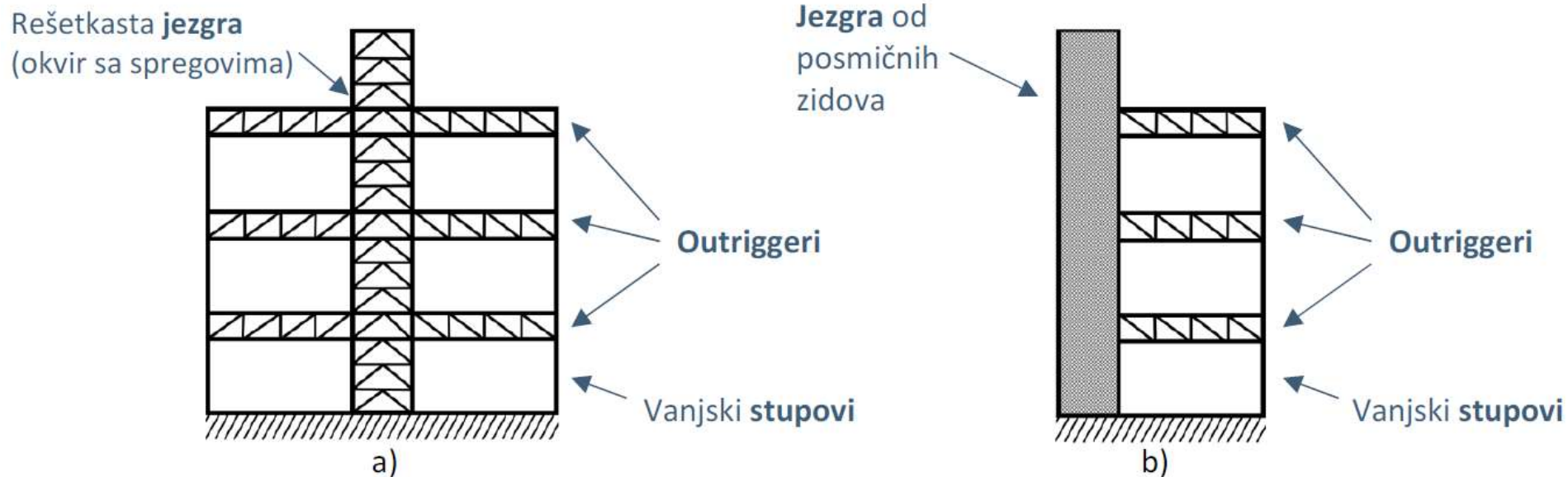
Uvod

- Klasični pristup odupiranja horizontalnim silama srednje visokih zgrada je posmična jezgra smještena oko dizala i stepenica.
- Dopunska horizontalna otpornost se postiže kruto spojenim okvirima smještenim oko jezgre.
- Međutim, kada je zgrada viša od 150m, spregnuta jezgra sama po sebi nema dovoljnu krutost da bi zadržala horizontalni pomak (drift) od vjetrova u prihvatljivim granicama.
- Zato je razvijen outrigger konstrukcijski sustav koji rješava ovaj problem



Uvod

- konstrukcijski sustav čine središnja jezgra sa spregovima koju može sačinjavati:
 - okvir sa spregovima
 - posmični zidovi i horizontalne konzolne rešetke
 - nosači, koji povezuju jezgru s vanjskim stupovima.



Slika 1.a) Outrigger sustav sa središnjom jezgrom

b) Outrigger sustav sa vanjskom jezgrom

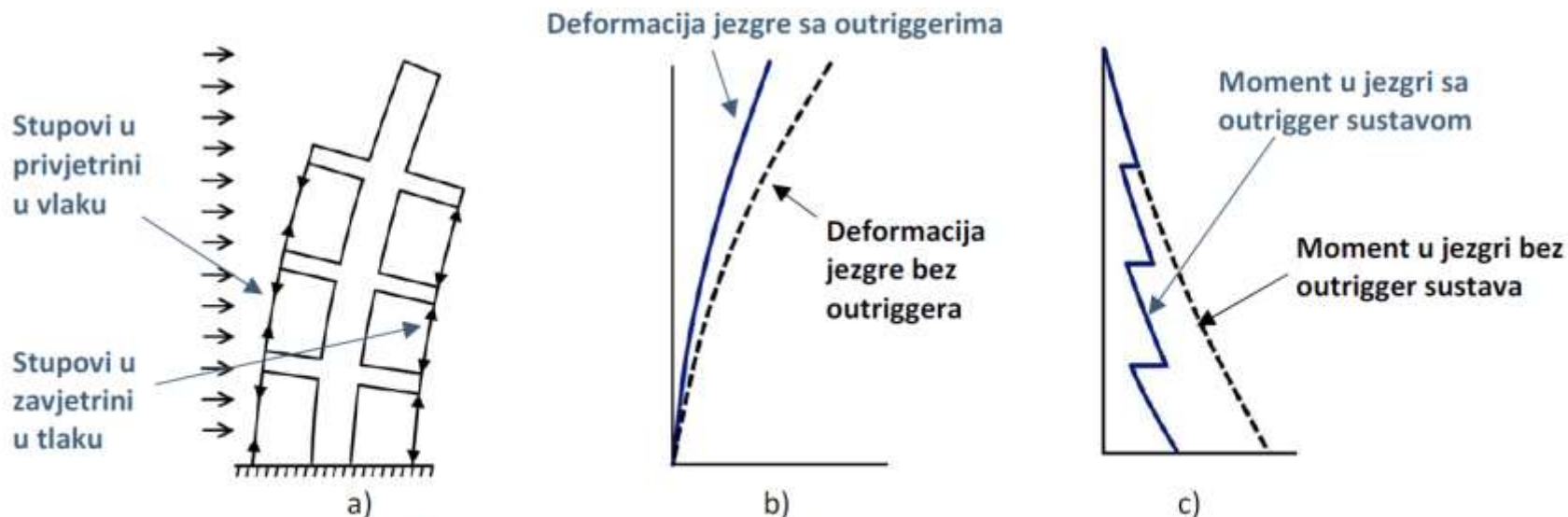
Načelo outrigger sustava

Osnovno konstrukcijsko ponašanje sustava je vrlo jednostavno.

Uslijed horizontalnog djelovanja, zgrada se savija.

U ovom slučaju rotaciju jezgre smanjuju outriggeri sa vlakom u stupovima smještenim u privjetrini i tlakom u stupovima u zavjetrini (slika 2.a).

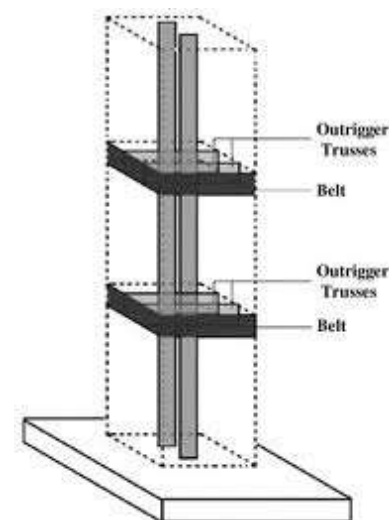
Tako se smanjuju horizontalni pomaci (rotacija) i moment savijanja u jezgri, u odnosu na nosivi sustav samo slobodno-stojeće jezgre (slika 2.b,c).



Slika 2. a) Osnovno konstrukcijsko ponašanje outrigger sustava,
 b) Horizontalni pomaci outrigger konstrukcije,
 c) Momentni dijagram outrigger konstrukcije

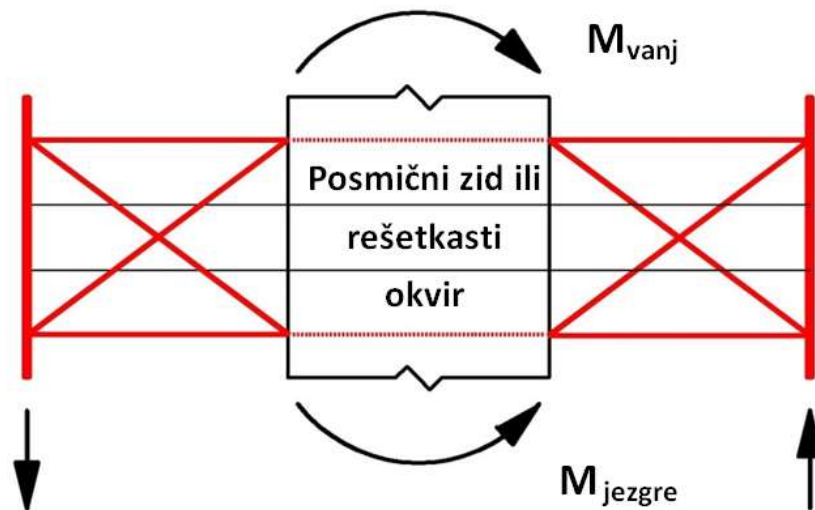
Načelo outrigger sustava

- Vanjski moment savijanja se ne prenosi samo preko jezgre, već se dio momenta iz jezgre preuzima pomoću outriggera i prenosi preko uzdužnih sila (tlak i vlak) u vanjskim stupovima.
- Kao rezultat, povezivanjem jezgre sa vanjskim stupovima povećana je efektivna širina konstrukcije.
- Konstrukcija se ponaša kao djelomično spregnuta konzola.
- Vanjski moment savijanja se prenosi preko jezgre, ali i preko sprega sila u vanjskim stupovima.



Načelo outrigger sustava

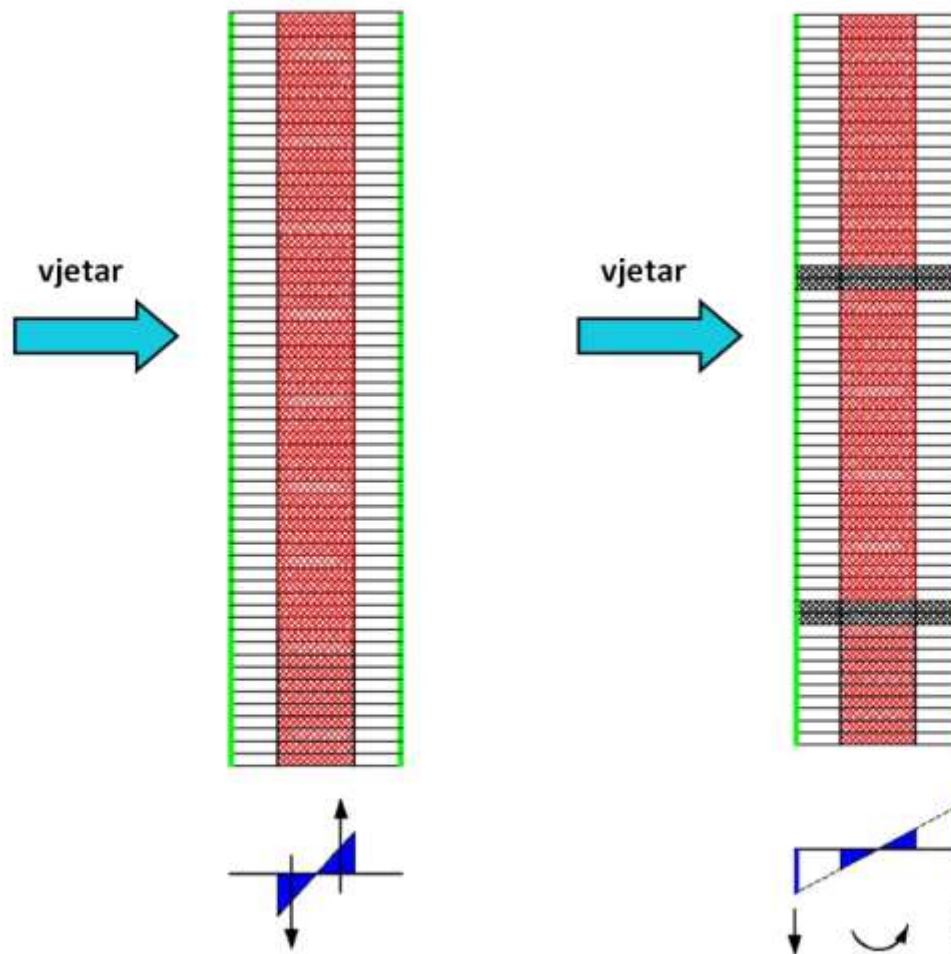
- Moment u jezgri se može promatrati kao vertikalni spreg sila na krajevima jezgre ili kao horizontalni spreg sila ograničen visinom outriggera.



Slika 3. Prijenos sila u outrigger sustavu

Načelo outrigger sustava

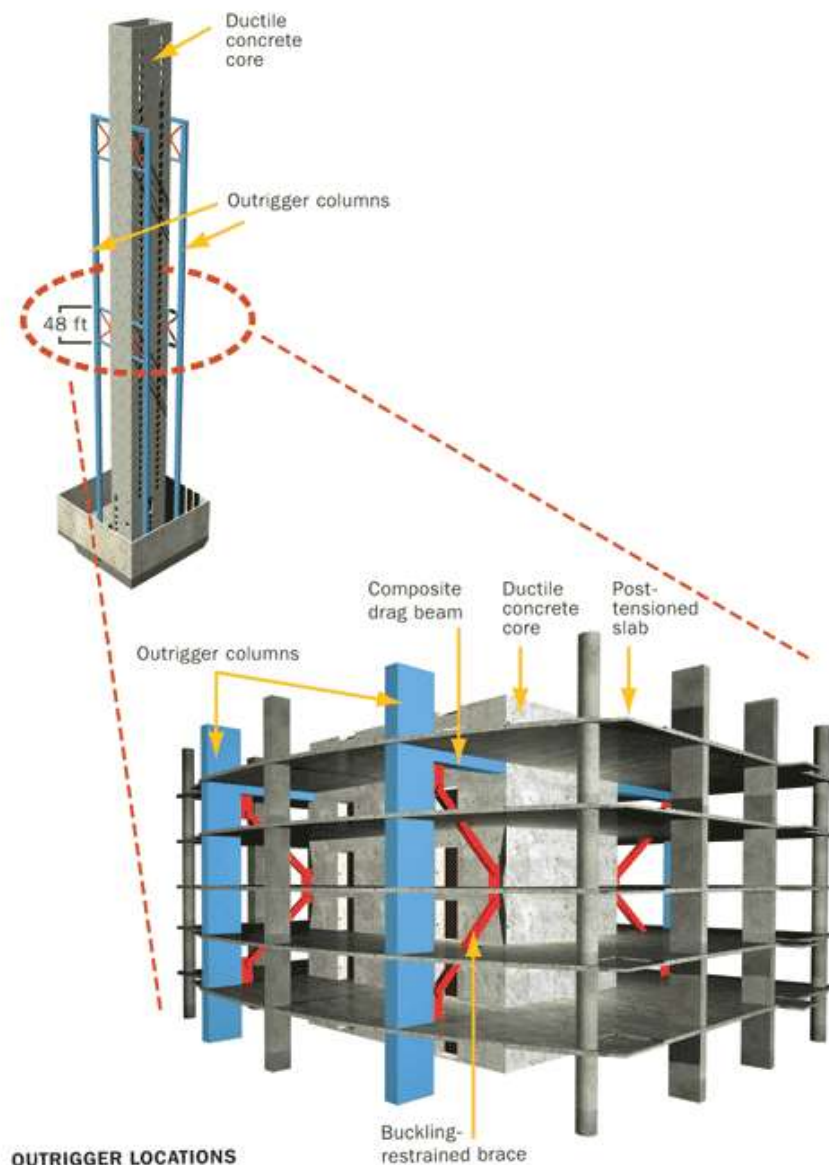
- Veličina ukupnog momenta savijanja koji djeluje na zgradu ostaje ista, ali se njegovo djelovanje preraspodjeljuje na jezgru i vanjske stupove.
- Raspodjela vertikalnih naprezanja u jezgri i vanjskim stupovima uslijed opterećenja vjetrom je prikazana na slici 4.
- Iz slike se jasno vidi povećanje efektivne širine konstrukcije i smanjenje naprezanja u jezgri.



Slika 4. Raspodjela vertikalnih naprezanja uslijed horizontalnog djelovanja vjetra
a) samo jezgra, b) outrigger sustav

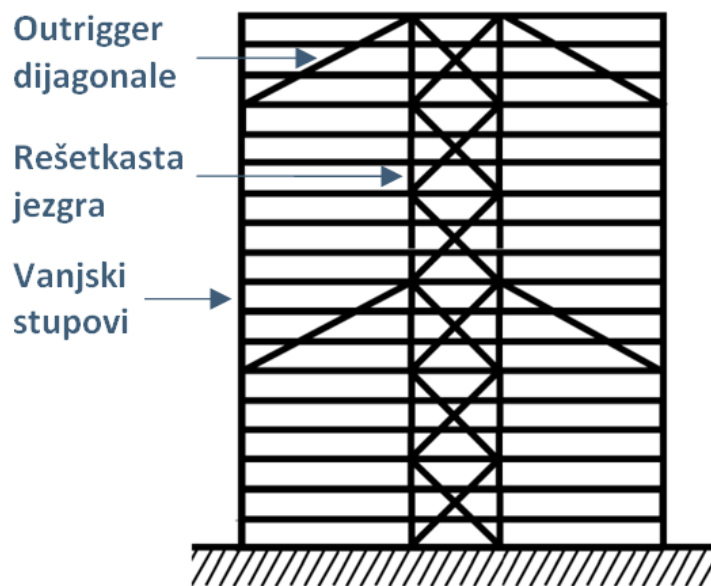
Načelo outrigger sustava

- Da bi sustav bio što više učinkovit, outrigger se mora ponašati kao beskonačno kruti disk.
- Ovisno o prikladnosti spajanja sa jezgrom outriggeri mogu biti rešetke, mega spregovi, posmični zidovi ili nosači.
- Da bi outriggeri bili dovoljno savojno i posmično kruti, izvode se visoki barem jedan ili dva kata. Međutim ekonomska granica visine tih konzola je reda četiri do pet katova.

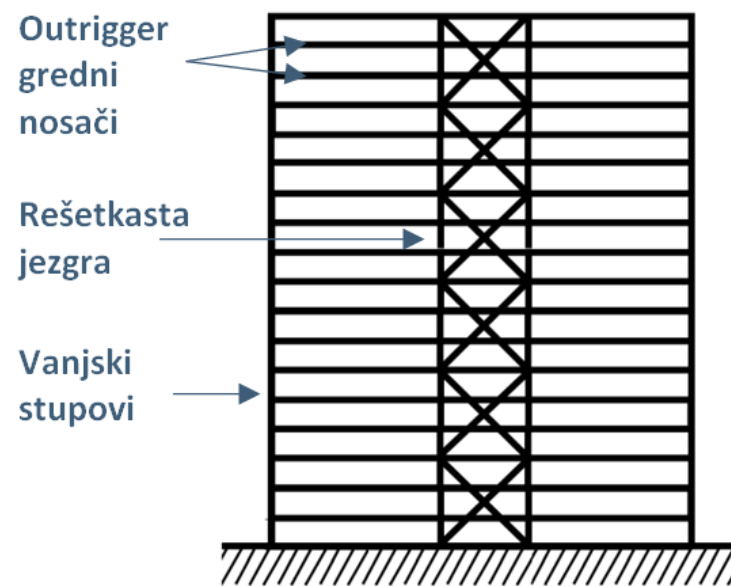


Načelo outrigger sustava

- Zbog zauzimanja prostora ti katovi su obično servisni katovi za smještaj svih instalacija i tehnološke opreme za funkcioniranje zgrade. Također, moguće je upotrijebiti dijagonale koje se protežu kroz više katova kao na slici 6.a. Konačno, moguće je i gredne nosače na svakom katu pretvoriti u outriggere, tako da se kruto spoje na jezgru (slika 6.b).



Slika 6 a) Dijagonale kao outriggere



b) Gredni nosači kao outriggere

Načelo outrigger sustava

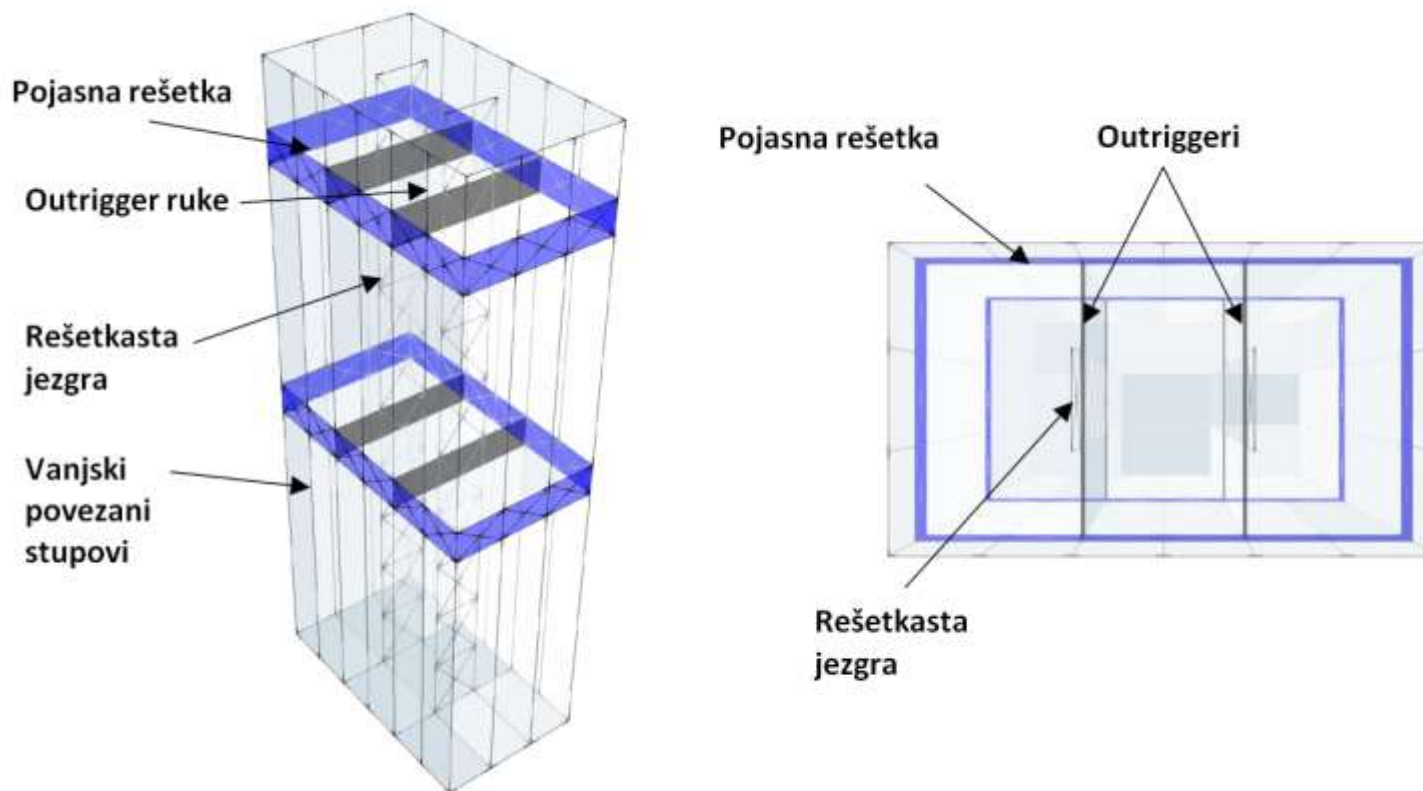
- Da se postigne veća učinkovitost, uobičajeno je u prijenos momenta uključiti i ostale stupove smještene po obodu zgrade. To se postiže povezivanjem svih obodnih stupova horizontalnom pojasnom rešetkom ili krutim zidovima smještanjem po obodu zgrade na razini outriggera
- Učinkovitost sustava bitno ovisi o međusobnoj vezi outriggera sa jezgrom i obodnim stupovima.
- Ako su tlocrtne dimenzije zgrade velike, ovaj konstrukcijski sustav omogućuje i mnogo veće visine (zbog većeg kraka sila).
- Važno je napomenuti da iako je outrigger veoma efikasan u povećavanju savojne krutosti, on ne povećava otpornost zgrade na posmik, koji mora biti prenijet najvećim dijelom pomoću jezgre.

Zgrada može biti ukrućena jednim setom outriggera na vrhu, a svaki dodani set dodatno je ukrućuje, ali sa sve manjim efektom

utrošak gradiva i teškoće izvedbe, kao i smanjena iskoristivost prostora navode konstruktore na pažljivo optimaliziranje broja i rasporeda outriggera u konstrukciji visoke građevine

Načelo outrigger sustava

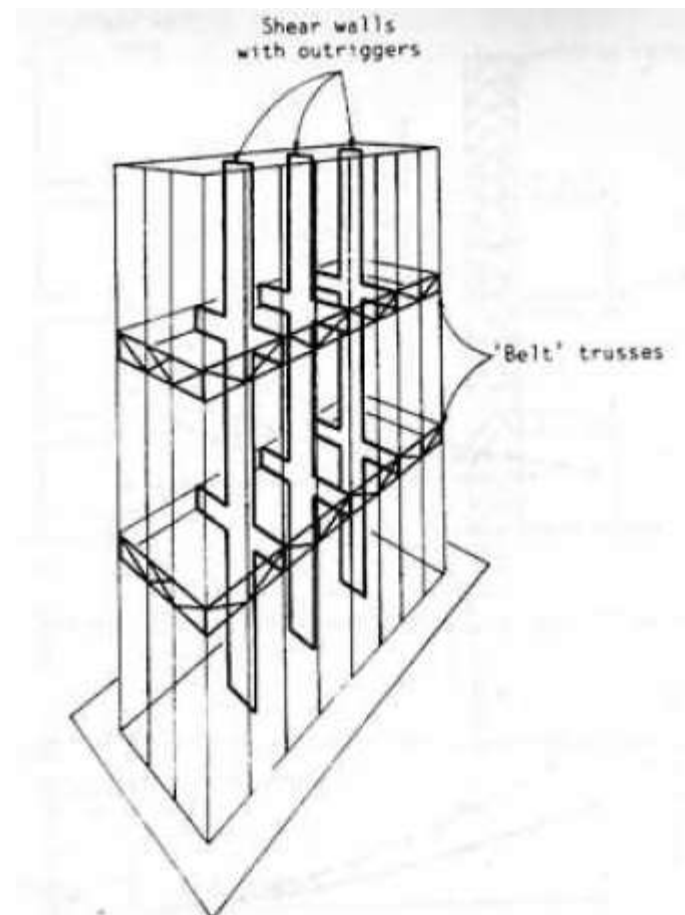
- Outrigger sustavi mogu biti postavljeni u jednom ili dva smjera.
- Ako je tlocrt zgrade pravokutan, outriggeri mogu biti neophodni u kraćem smjeru kao što je prikazano na na slici.



Slika 7. Outrigger sustav sa pojasnom rešetkom; a) prostorni prikaz, b) tlocrt

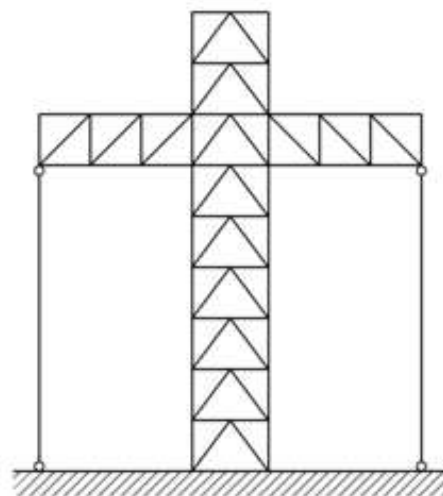
Fizikalno ponašanje outrigger sustava

- Mnogi konstrukcijski sustavi, kao što su sustav povezanih posmičnih zidova i zidnih okvira, zbog svoje tlocrtne pravilnosti po visini omogućuju primjenu metode kontinuuma.
- Outrigger konstrukcijski sustav, nije pogodan za metodu kontinuuma i mora se analizirati diskretnim postupkom.
- Odabrana je metoda kompatibilnosti, u kojem se rotacija jezgre na razinama outriggera izjednačuje sa rotacijom odgovarajućih outriggera.
- Za razumijevanje ponašanja sustava promatra se konstrukcija sa outriggerom i pojasnom rešetkom smještenom na razini outriggera.

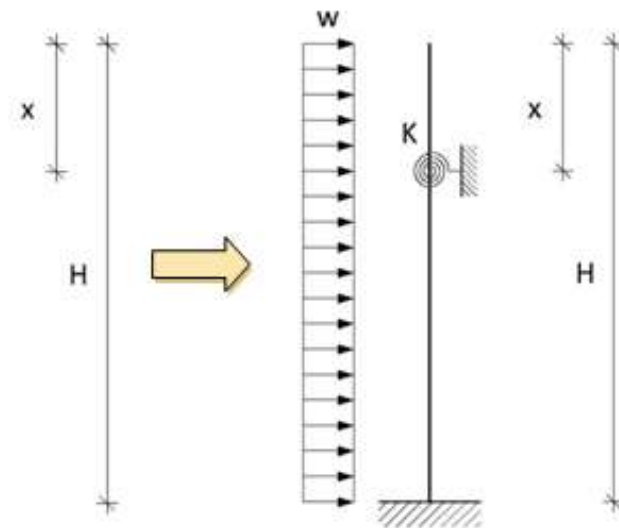


Fizikalno ponašanje outrigger sustava

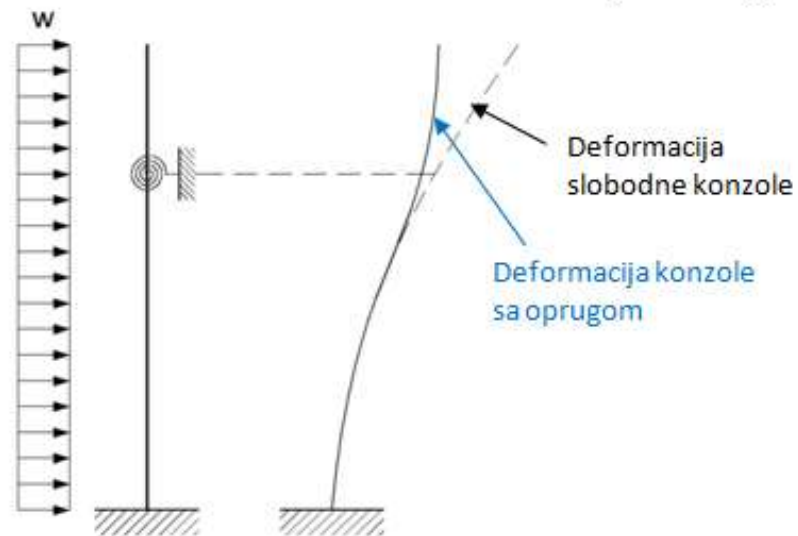
- Radi analitičkog pojednostavnjenja, kumulativni učinak svih stupova predstavlja se sa dva ekvivalentna stupa (slika 8.a).
- Povezano djelovanje outriggera stvara obrnuti spreg sila što rezultira točkom infleksije u deformacijskoj liniji.
- Ovaj zaokret u zakrivljenosti reducira moment savijanja u jezgri, a samim time i horizontalni pomak na vrhu građevine (drift).
- Učinak odupiranja outriggera i stupova se može prikazati pomoću ekvivalentne rotacijske opruge krutosti K (glavna svrha outriggera je smanjiti rotaciju jezgre) (Slika 8.b).



Slika 8 a) Sustav za analizu



b) Konzola pridržana rotacijskom oprugom
na mjestu outriggera

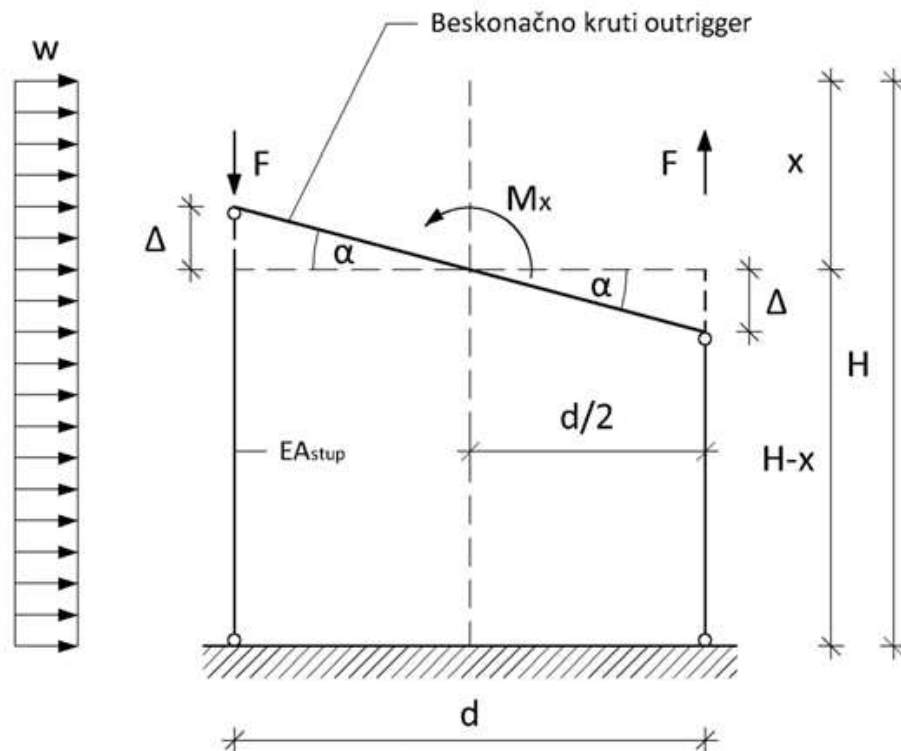


Slika 8 c) Deformacija konzole sa rotacijskom oprugom

**Fizikalno ponašanje
outrigger sustava**

Fizikalno ponašanje outrigger sustava

- Na slici 9 može se vidjeti deformacija sustava i osnovne oznake.
- Pretpostavlja se da su outriggeri kruti ($EI = \infty$), a vanjski stupovi zglibno oslonjeni na oba kraja tako da su izloženi samo uzdužnim silama (vlaku i tlaku).
- Pretpostavlja se da je $d/2$ razmak stupova do centra jezgre, α kut rotacije jezgre u vertikalnoj ravnini, a $d/2 \cdot \alpha$ uzdužna deformacija stupova.



Slika 9 Oznake i pretpostavke sustava

Fizikalno ponašanje outrigger sustava

Uzdužna (aksijalna) sila u stupovima iznosi:

$$F = \frac{A \cdot E}{H - x} \cdot \frac{d}{2} \cdot \alpha$$

gdje je:

F - uzdužna sila u stupovima (tlak/vlak) (kN)

A - površina poprečnog presjeka stupova (m²)

E - modul elastičnosti stupova (kN/m²)

$H - x$ – visina stupova do razine outriggera (m), gdje je:

H – visina zgrade (m)

x – udaljenost outriggera od vrha zgrade (m)

d – razmak između stupova (m)

α – kut rotacije outriggera (odnosno konzole na razini outriggera)

Redukcijski moment od sila u stupovima:

$$M = F \cdot d = \frac{A \cdot E}{H - x} \cdot \frac{d^2}{2} \cdot \alpha = K \cdot \alpha$$

gdje je $K = \frac{A \cdot E}{H - x} \cdot \frac{d^2}{2}$ (kNm) krutost rotacijske opruge (zajednički učinak outriggera i stupova).

Moment savijanja koji se može preuzeti oprugom (stupovima) je funkcija krutosti opruge (stupova) K i kuta rotacije outriggera odnosno konzole na njenoj poziciji α .

Proračun horizontalnih pomaka sustava

- Pojednostavljeni postupak zorno prikazuje učinak outriggera, ali uz uvođenje idealizacije - seta pretpostavki:
 - jezgra je jednolika po visini (jednake krutosti)
 - stupovi po visini imaju jednoliku krutost
 - outriggeri su jednoliki (beskonačne krutosti)

Zanima nas utjecaj položaja outriggera na veličinu drifta. Sustav se promatra kao vertikalna konzola upeta u temelje, pridržana sa rotacijskom oprugom (outriggerom) koju variramo po visini. Uvjet kompatibilnosti zaokreta na visini $z=L$:

$$\theta_W - \theta_S = \theta_L$$

gdje je:

θ_W - zaokret konzole uslijed jednolikog poprečnog opterećenja w (rad).

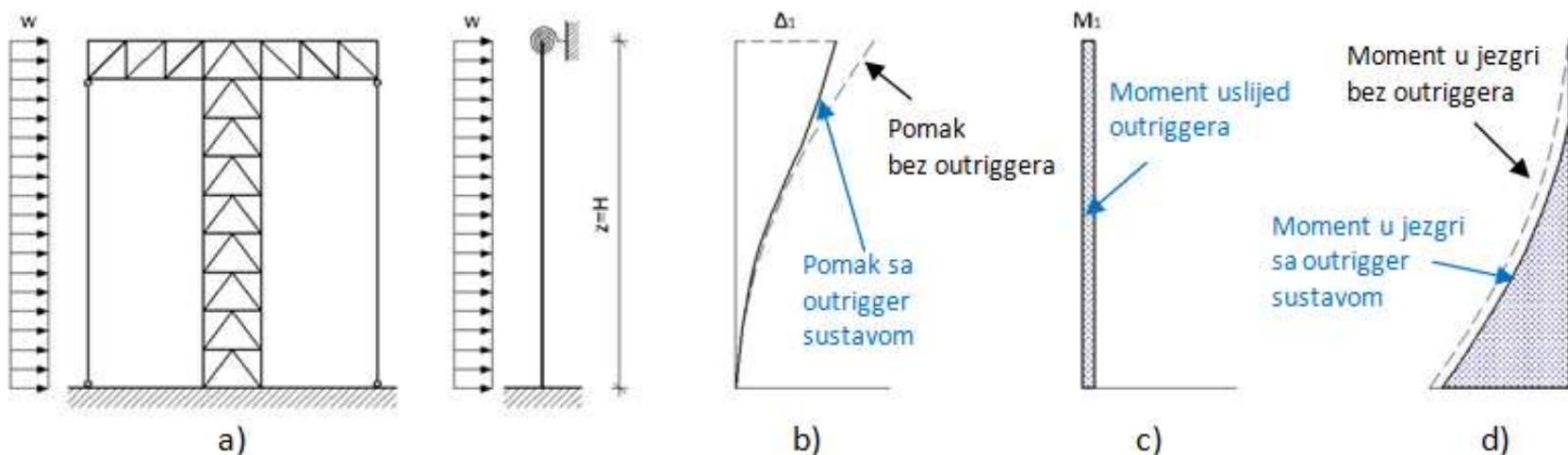
θ_S - dio zaokreta koji preuzima opruga na visini z (rad).

Negativni predznak pokazuje da je zaokret konstrukcije (konzole) uslijed postojanja opruge u suprotnom smjeru od rotacije uzrokovane vanjskim opterećenjem w .

θ_L - stvarni zaokret konstrukcije (konzole) na visini $z=L$ (rad).

Proračun horizontalnih pomaka sustava

Slučaj 1: Outrigger smješten na vrhu; $z=H, x=0$



Slika 10.: **Slučaj 1:** Outrigger smješten na vrhu, $z=H$

Zakret slobodne konzole modula elastičnosti E , momenta tromosti I , visine H uslijed jednolikog poprečnog opterećenja w na udaljenosti x od vrha:

$$\theta_w = \frac{w}{6 \cdot E \cdot I} (x^3 - H^3)$$

Na visini $x=0$:

$$\theta_w = \frac{w \cdot H^3}{6 \cdot E \cdot I}$$

Proračun horizontalnih pomaka sustava

Ako su M_1 moment savijanja i K_1 krutost rotacijske opruge na visini $z=H$, jednadžba kompatibilnosti zaokreta i moment savijanja koji se realizira u outriggerima (oprugi) glasi:

$$\frac{w \cdot H^3}{6 \cdot E \cdot I} - \frac{M_1 \cdot H}{E \cdot I} = \frac{M_1}{K_1} \quad \rightarrow \quad M_1 = \frac{\frac{w \cdot H^3}{6 \cdot E \cdot I}}{\frac{1}{K_1} + \frac{H}{E \cdot I}}$$

Rezultirajući pomak na vrhu konzole (ukupni drift) (dobiven superpozicijom):

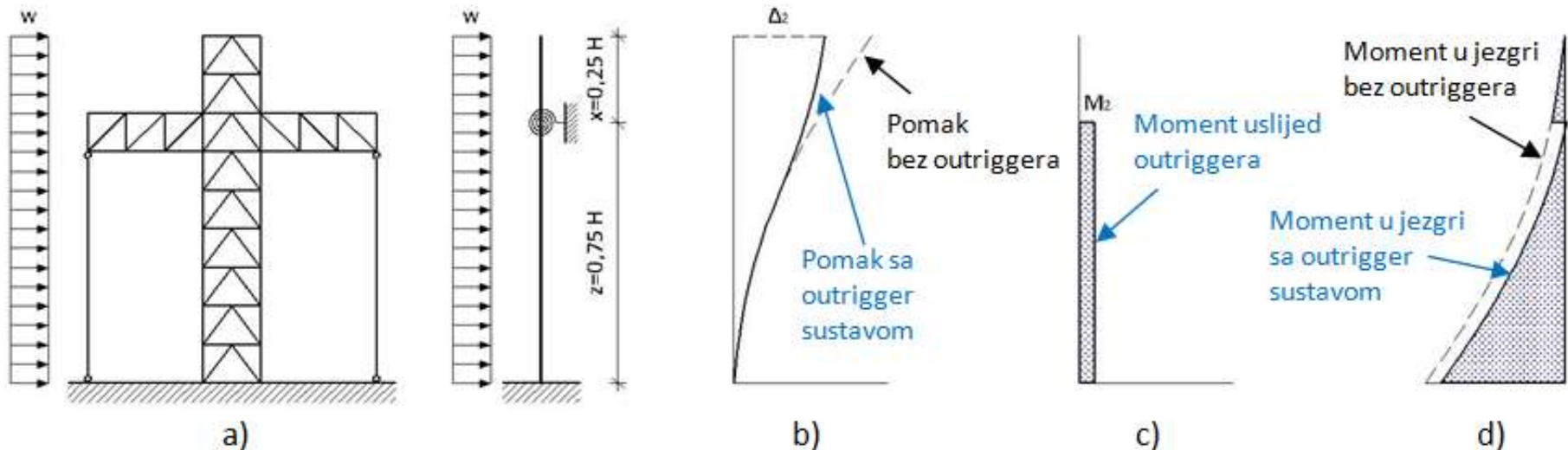
$$\Delta_1 = \Delta_w - \Delta_{opruga} = \frac{w \cdot H^4}{8 \cdot E \cdot I} - \frac{M_1 \cdot H^2}{2 \cdot E \cdot I} = \frac{H^2}{2 \cdot E \cdot I} \cdot \left(\frac{w \cdot H^2}{4} - M_1 \right)$$

Proračun horizontalnih pomaka sustava

Slučaj 2:

- Outrigger smješten na

$$z=0,75 \cdot H, \quad x=0,25 \cdot H$$



Slika 11. **Slučaj 2:** Outrigger smješten na na $z=0,75 \cdot H$, [2]

Zaokret slobodne konzole modula elastičnosti E , momenta tromosti I , visine H uslijed jednolikog poprečnog opterećenja w na udaljenosti x od vrha:

$$\theta_w = \frac{w}{6 \cdot E \cdot I} (x^3 - H^3)$$

Proračun horizontalnih pomaka sustava

Na visini $x=0,25 \cdot H$:

$$\theta_w = \frac{w}{6 \cdot E \cdot I} \left(\frac{H^3}{64} - H^3 \right) = \frac{63}{64} \cdot \frac{w \cdot H^3}{6 \cdot E \cdot I}$$

Ako su M_2 moment savijanja i K_2 krutost rotacijske opruge na visini $z=3 \cdot H/4$, jednačba kompatibilnosti zaokreta glasi:

$$\frac{w \cdot H^3}{6 \cdot E \cdot I} \cdot \frac{63}{64} - \frac{M_1}{E \cdot I} \cdot \frac{3 \cdot H}{4} = \frac{M_2}{K_2}$$

Uz $K_2 = \frac{4}{3} \cdot K_1$, izraz za moment savijanja u otriggerima na visini $z=3 \cdot H/4$ glasi:

$$M_2 = \frac{\frac{63}{64} \cdot \frac{w \cdot H^3}{6 \cdot E \cdot I}}{\frac{1}{\frac{4}{3} K_1} + \frac{1}{E \cdot I}} = 1,31 \cdot M_1$$

Horizontalni pomak na vrhu konzole (ukupni drift) (dobiven superpozicijom):

$$\Delta_2 = \frac{w \cdot H^4}{8 \cdot E \cdot I} - \frac{M_2 \cdot 3 \cdot H}{4 \cdot E \cdot I} \cdot \left(H - \frac{3 \cdot H}{8} \right) = \frac{H^2}{2 \cdot E \cdot I} \cdot \left(\frac{w \cdot H^2}{4} - 1,23 \cdot M_1 \right)$$

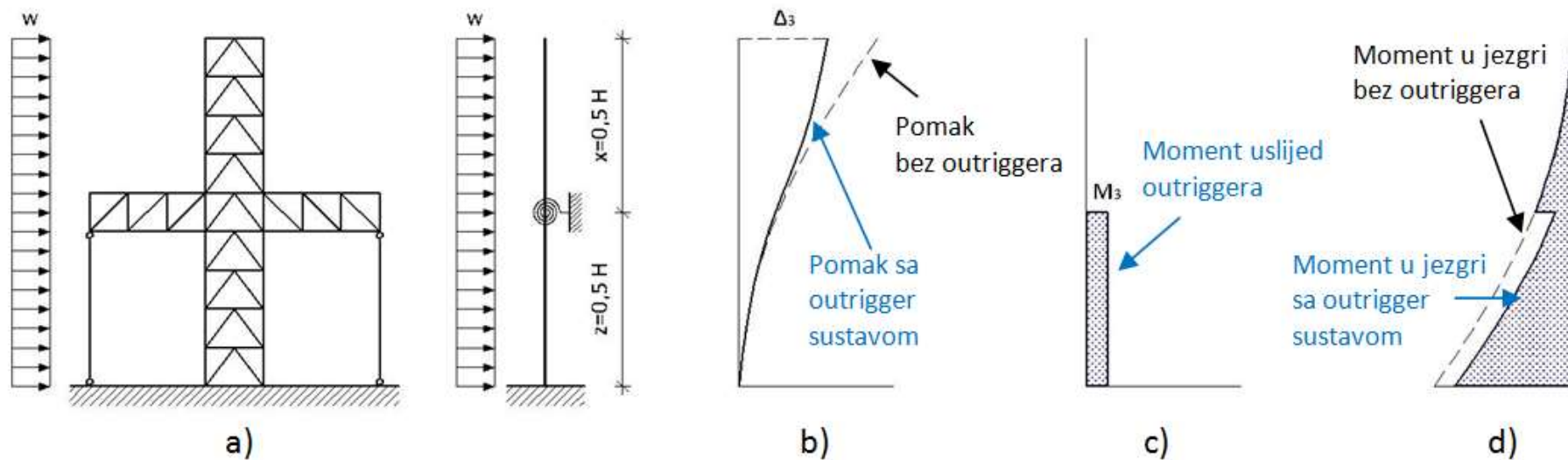
Proračun horizontalnih pomaka sustava

Slučaj 3:

- Outrigger smješten

na $z=0,5 \cdot H$,

$x=0,5 \cdot H$



Slika 12. Slučaj 3: Outrigger smješten na $z=0,5 \cdot H$

Proračun horizontalnih pomaka sustava

Jednadžba kompatibilnosti zaokreta glasi:

$$\frac{7 \cdot w \cdot H^3}{48 \cdot E \cdot I} - \frac{M_3 \cdot H}{2 \cdot E \cdot I} = \frac{M_3}{K_3}$$

uz $K_3 = 2 \cdot K_1$, izraz za moment savijanja u otrigerima na visini $z=0,5 \cdot H$ glasi:

$$M_3 = \frac{7}{4} \cdot \frac{\frac{w \cdot H^3}{6 \cdot E \cdot I}}{\frac{1}{K_1} + \frac{H}{E \cdot I}} = 1,75 \cdot M_1$$

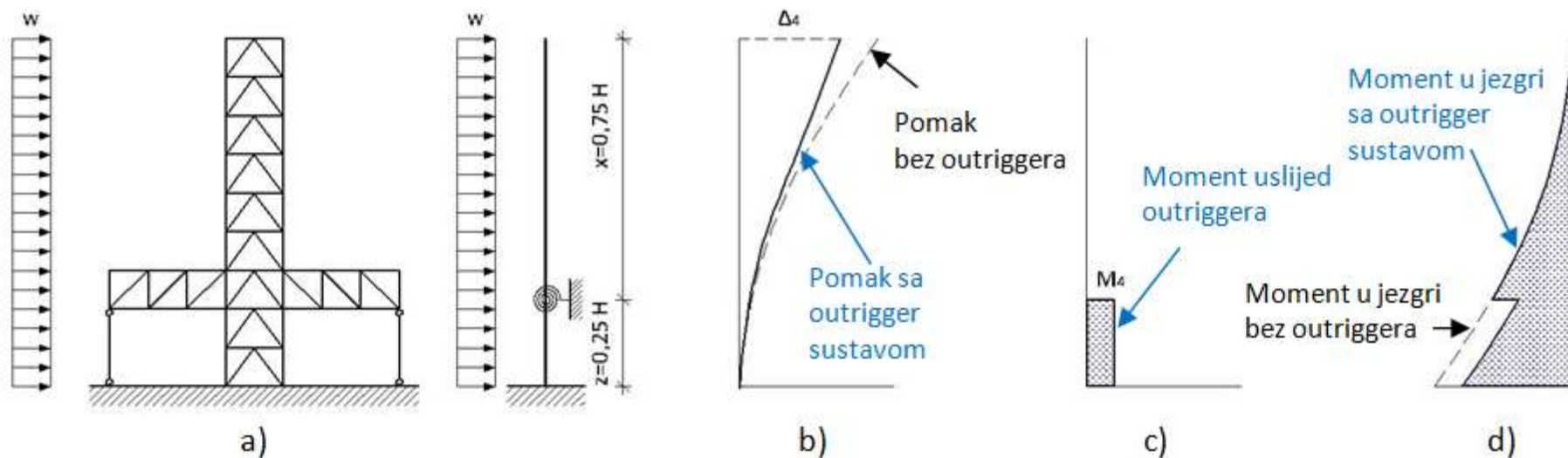
Horizontalni pomak na vrhu konzole (ukupni drift) (dobiven superpozicijom):

$$\Delta_3 = \frac{w \cdot H^4}{8 \cdot E \cdot I} - \frac{M_3 \cdot H}{2 \cdot E \cdot I} \cdot \left(H - \frac{H}{4} \right) = \frac{H^2}{2 \cdot E \cdot I} \cdot \left(\frac{w \cdot H^2}{4} - 1,31 \cdot M_1 \right)$$

Proračun horizontalnih pomaka sustava

Slučaj 4:

- Outrigger smješten na $z=0,25 \cdot H$, $x=0,75 \cdot H$



Slika 13. Slučaj 4: Outrigger smješten na $z=0,25 \cdot H$

Jednadžba kompatibilnosti zaokreta glasi:

$$\frac{37}{64} \cdot \frac{w \cdot H^3}{6 \cdot E \cdot I} - \frac{M_4 \cdot H}{4 \cdot E \cdot I} = \frac{M_4}{K_4}$$

Proračun horizontalnih pomaka sustava

uz $K_4 = 4 \cdot K_1$, izraz za moment savijanja u otriggerima na visini $z=0,25 \cdot H$ glasi:

$$M_4 = \frac{37}{16} \cdot \frac{\frac{w \cdot H^3}{6 \cdot E \cdot I}}{\frac{1}{K_1} + \frac{H}{E \cdot I}} = 2,3 \cdot M_1$$

Horizontalni pomak na vrhu konzole (ukupni drift) (dobiven superpozicijom):

$$\Delta_4 = \frac{w \cdot H^4}{8 \cdot E \cdot I} - \frac{M_4 \cdot H}{4 \cdot E \cdot I} \cdot \left(H - \frac{H}{8} \right) = \frac{H^2}{2 \cdot E \cdot I} \cdot \left(\frac{w \cdot H^2}{4} - M_1 \right)$$

Iz analize je vidljiv utjecaj položaja opruge (outriggera) na veličinu horizontalnog pomaka na vrhu konzole (ukupni drift). Najveća redukcija horizontalnog pomaka je ostvarena smještanjem outriggera na polovicu visine. Također može se vidjeti i utjecaj položaja opruge (outriggera) na dijagram momenta savijanja u jezgri, odnosno reducirajućeg momenta kao spreg sila u stupovima. Najveća redukcija momenta preokretanja je u slučaju kad je outrigger smješten najbliže dnu (2,31M), ali pritom se moment savijanja konzole reducira samo na visini $0,25 \cdot L$.

Optimalizacija sustava približnim metodama proračuna

- pojednostavljujemo sustav na osnovne nosive elemente za promatrano opterećenje, koje je također pojednostavljeno u odnosu na realnost
- u konkretnom slučaju:
 - Stupovi po obodu zamijenjeni jednim elementom
 - Opterećenje vjetrom kontinuirano po visini
- optimalizacija provedena metodama tehničke mehanike
- provjere pokazuju iskoristivost načelnih zaključaka i za realne slučajeve opterećenja od vjetra i potresa
- idealizirani sustav pomaže kod projektiranja – raspoređivanja nosivih elemenata u konceptualnoj fazi projekta
- na odabir položaja outriggera bitno utječu i drugi parametri, prvenstveno potreba za smještanjem opreme u zgradu (tehnološke etaže)

Primjer iz prakse – Dubai Tower, Doha

- neboder - toranj visok 438 m s vršnim šiljkom (spire) visine 36 m, iz 2012.
- namjena: poslovna, stambena, hotel
- 90 nadzemnih etaža, 5 podzemnih etaža



Dubai Tower, Doha – primjer strukture s outriggerima

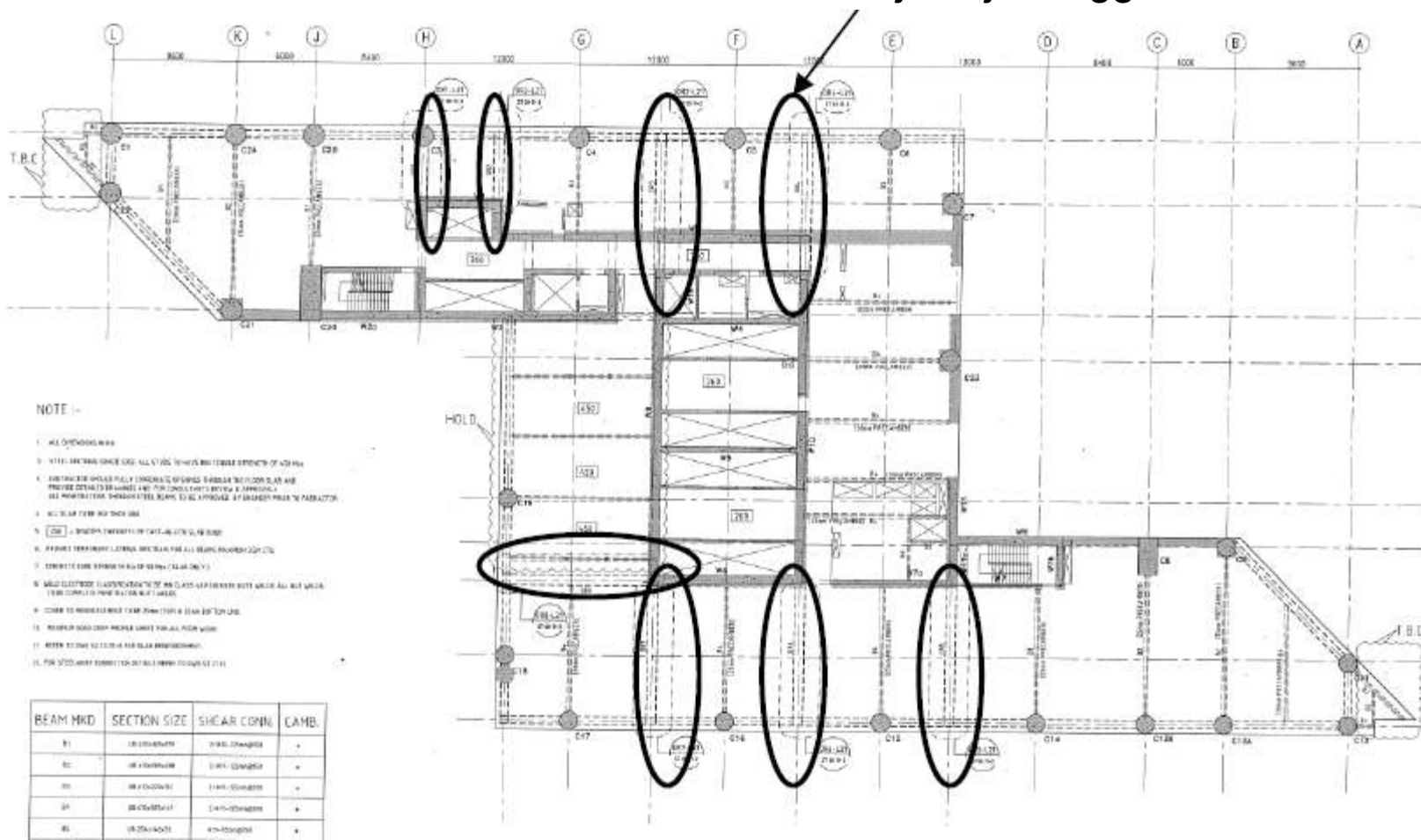
- otpornost na bočne sile osigurana snažnom jezgrom u kombinaciji sa spregnutim outriggerima i obodnim pojasnim rešetkama na visini servisnih etaža
- obodni stupovi aktivirani u prijenosu bočne sile vjetra serijom spregnutih (čelik – beton) outriggera



Dubai Tower, Doha – primjer strukture s outriggerima

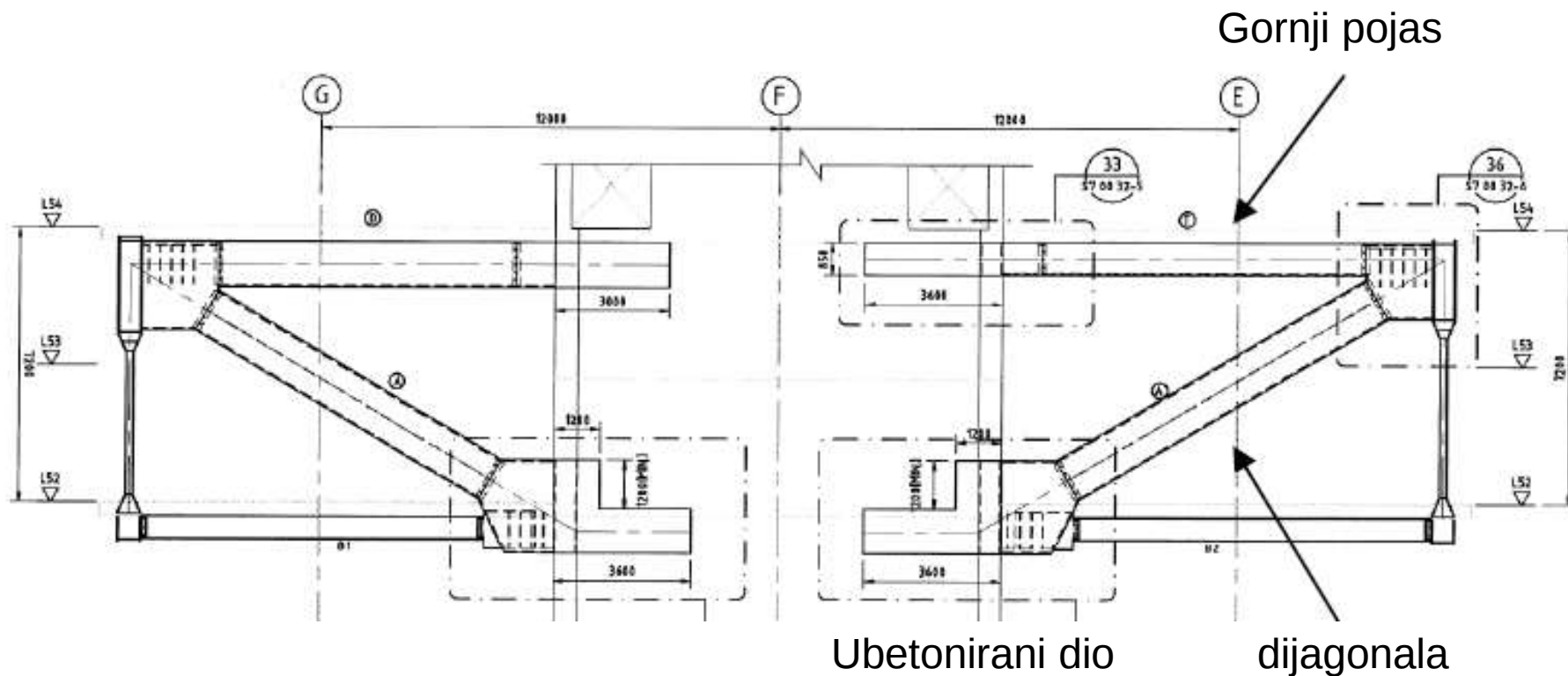
- osnovni sustav: jezgra od betona visoke čvrstoće + spregnuti outriggeri na razini etaža 21-23, 52-54 (na slici) i 86-88

Smještaj outriggera - zaokruženo



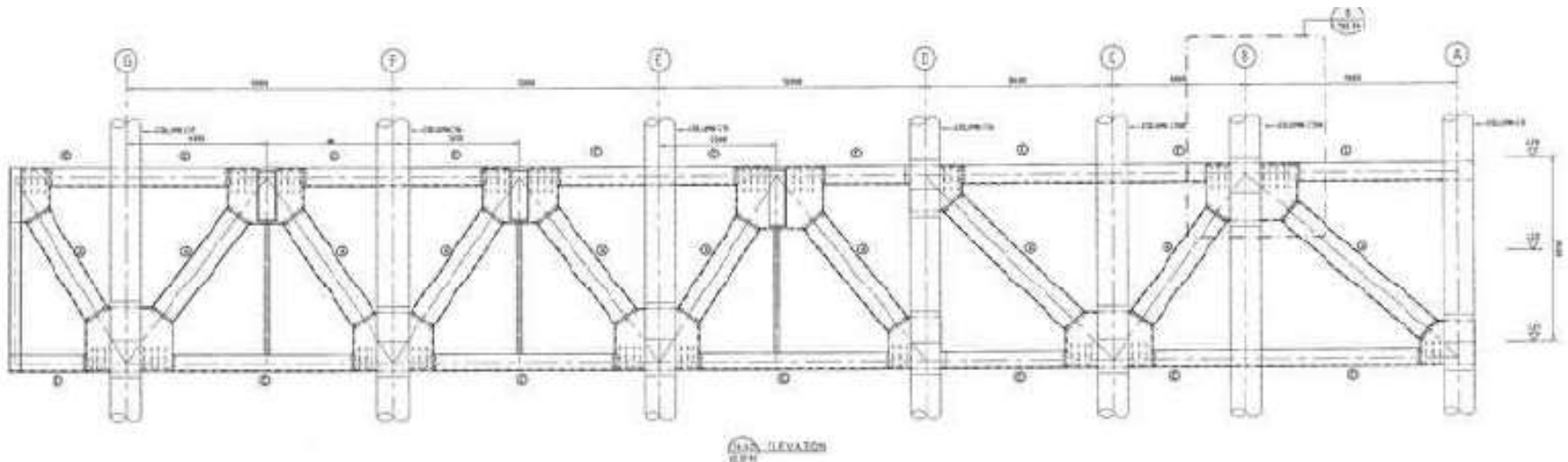
Dubai Tower, Doha – primjer strukture s outriggerima

- outriggeri (slika) i obodne rešetke su sandučasti čelični nosači visine od 800 mm do 1500 mm i široki 600 mm do 800 mm, ispunjeni betonom čvrstoće do 80MPa
- hrptovi sanduka: čelične ploče debljine do 50 mm



Dubai Tower, Doha – primjer strukture s outriggerima

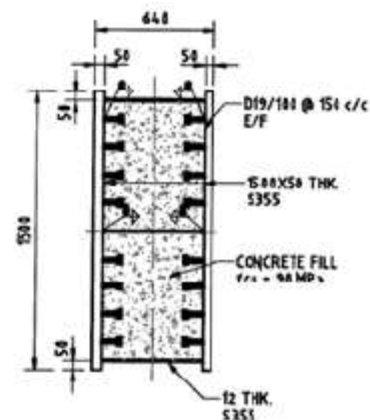
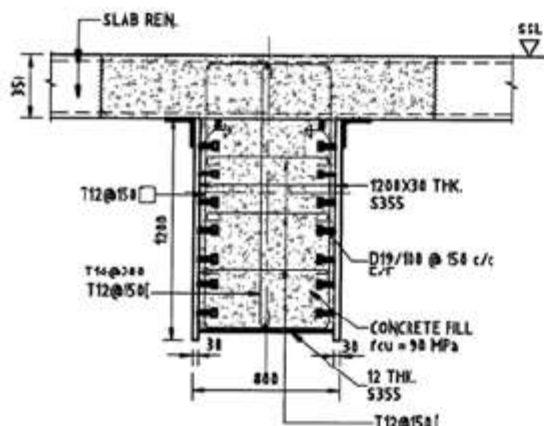
- Konstruktor tornja tvrdi: *Glavna prednost outrigger sustava, u usporedbi sa cijevnim sustavom sa središnjom jezgrom je povećanje krutosti građevine bez potrebe da za blisko postavljenim stupovima po obodu koji su arhitektonski nepoželjni. Dodatno, pojasevi po obodu jednoliko raspodjeljuju sile, povećavajući efikasnost sustava*



Obodni pojas i vanjski stupovi

Dubai Tower, Doha – primjer strukture s outriggerima

- Konstruktor tornja o prednostima spregnutog presjeka outriggera:
- Fleksibilnost u pogledu provođenja instalacija,
- odgođeno spajanje dijagonala omogućuje smanjenje efekata skupljanja i puzanja betona



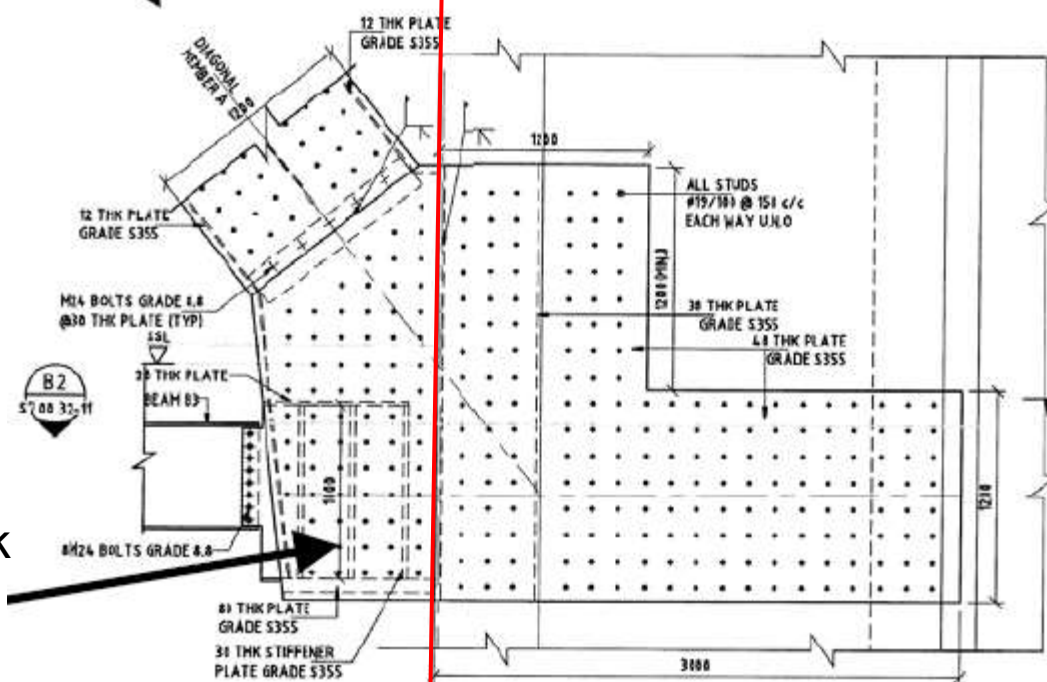
Gornji pojas i dijagonala outriggera, visina nosača
oko 1500 mm

Dubai Tower, Doha – primjer strukture s outriggerima

- spoj jezgre i dijagonale pomoću čeličnih ploča debljine 40 mm koje su ubetonirane u zidove jezgre na duljini od 3 m

Tlačna sila

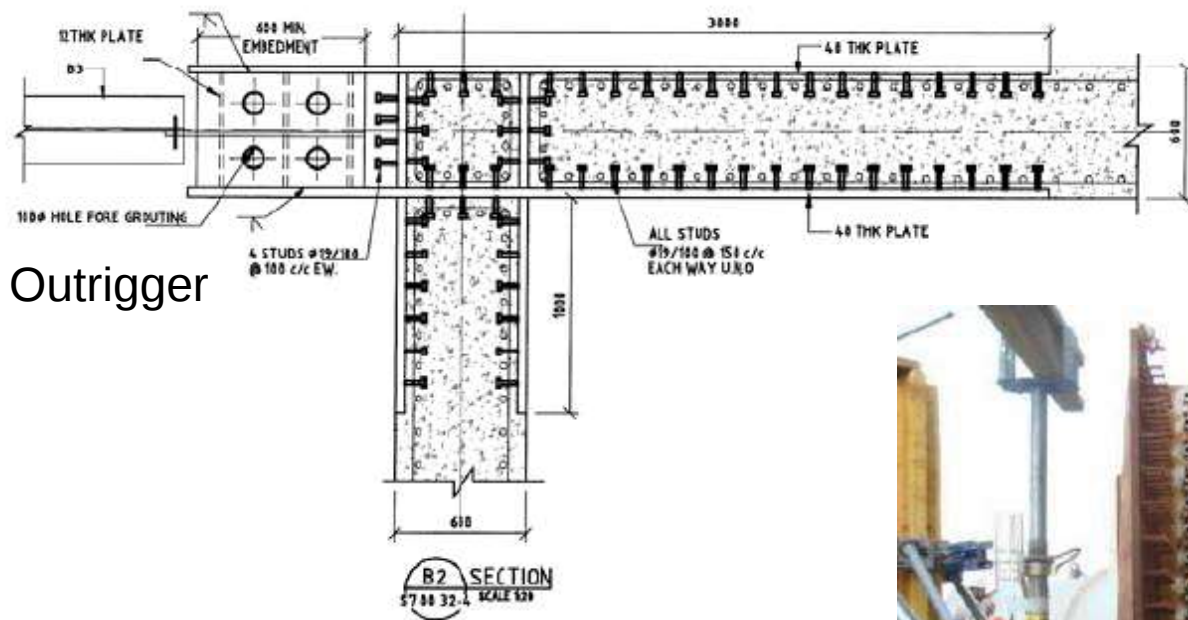
Ubetonirani dio – jezgra zgrade



Papuča za priključak
donje pojasnice

Dubai Tower, Doha – primjer strukture s outriggerima

- detalji spoja outrigger nosača u jezgru



Outrigger

Zid jezgre

Zid jezgre

