

PROJEKTOVANJE I GRAĐENJE BETONSKIH KONSTRUKCIJA 2

4

V.prof dr Branko Milosavljević, dipl.građ.inž.

Prof.dr Snežana Marinković, dipl.građ.inž.



Dejstvo vetra

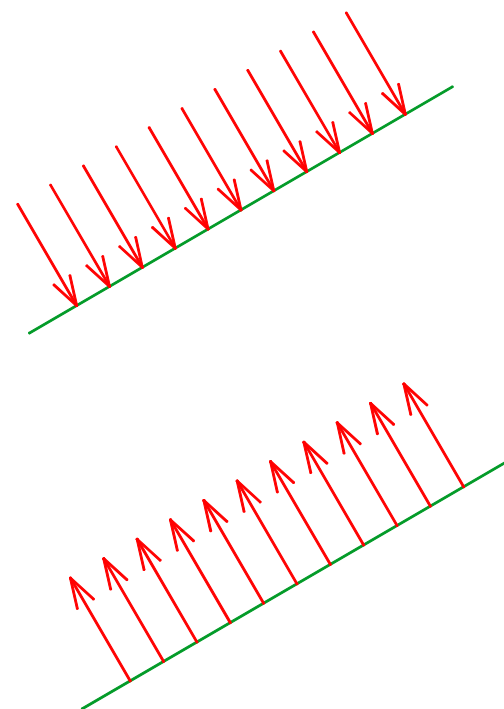
Proračun prema EN1991-1- 4.

Klasifikovano kao povremeno dejstvo.

Dejstvo upravno na površinu objekta.

Može biti pozitivno (pritiskujuće)

Ili negativno (sišuće).



Pritisak vetra, kao funkcija brzine vetra se sastoji od srednje i fluktuirajuće komponente.

Srednja brzina vetra v_m je funkcija osnovne brzine vetra v_b .

$$V_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot V_{b,O}$$

$V_{b,O}$ Fundamentalna vrednost osnovne brzine vetra (karakteristična desetominutna srednja brzina vetra, nezavisna od pravca vetra i doba godine, merena na 10 m iznad nivoa tla na otvorenom zemljanom terenu, sa niskom vegetacijom, kao što je trava, sa izolovanim preprekama koje su razdvojene za najmanje 20 visina prepreke).

C_{dir} koeficijent pravca (prep. vrednost 1.0)

C_{season} koeficijent sezonskog delovanja (prep. vrednost 1.0)

Srednja brzina vetra $v_m(z)$ na visini z iznad terena, zavisi od hrapavosti i topografije terena, kao i od osnovne brzine vetra v_b :

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

gde je:

$c_r(z)$ koeficijent hrapavosti,

$c_o(z)$ koeficijent topografije, koji se usvaja kao 1,0, ukoliko nije drugačije određeno

$$c_r(z) = k_r \ln(z/z_0), \quad z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

$$c_r(z) = c_r(z_{min}), \quad z \leq z_{min}$$

z_0 dužina hrapavosti, data u tabeli

k_r koeficijent terena: $k_r = 0.19(z_0 / z_{0,II})^{0.07}$

$z_{max} = 200$

z_{min} dato u tabeli

| Kategorija terena | | Zo | Zmin |
|-------------------|---|-------------|------|
| | | m | m |
| 0 | More ili obalno područje izloženo otvorenom moru | 0,003 | 1 |
| I | Jezera ili ravničarska i horizontalna površina sa zanemarljivom vegetacijom i bez prepreka | 0,01 | 1 |
| II | Površina sa niskom vegetacijom, kao što je trava i izolovanim preprekama (drveće, zgrade), koje su udaljene za najmanje 20 visina prepreke | 0,05 | 2 |
| III | Površina sa redovnom prekrivenošću vegetacijom ili zgradama, ili, pak, izolovanim preprekama koje su udaljene za najviše 20 visina prepreke (kao što su sela, prigradski tereni, neprekidna šuma) | 0,3 | 5 |
| IV | Površina, na kojoj je najmanje 15% površine prekriveno zgradama, čija prosečna visina prelazi 15 m | 1,0 | 10 |

Udarni pritisak vetra

Udarni pritisak vetra na visini z , $q_p(z)$, funkcija je srednja brzina vetra $v_m(z)$, a uključuje i fluktuaciju brzine preko intenziteta turbulencije $I_v(z)$:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \rho \cdot v_m^2(z) / 2, \quad \text{gde je } \rho \text{ gustina vazuha}$$

$I_v(z)$ je definisan odnosom standardne devijacije turbulencije $\sigma_v = k_r v_b$, i srednje brzine vetra $v_m(z)$:

$$I_v(z) = \sigma_v / v_m(z) = k_r v_b / c_r(z) v_b = 1 / \ln(z/z_0)$$

Ukoliko se osnovni pritisak vetra definiše kao:

$$q_b = \rho \cdot v_b^2 / 2,$$

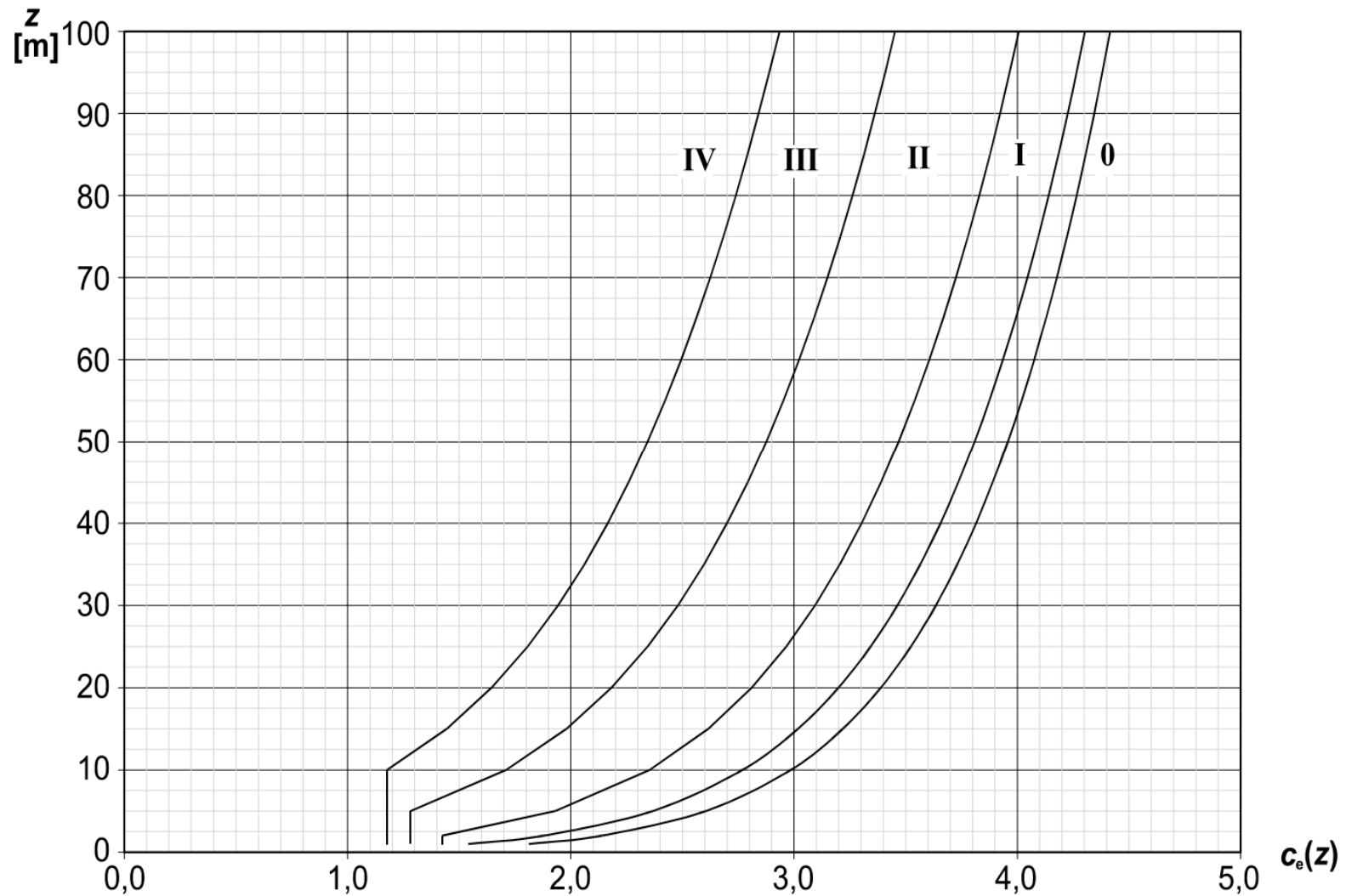
udarni pritisak vetra se može izraziti u funkciji osnovnog pritiska, kao:

$$q_b(z) = c_e(z) q_b,$$

gde je $c_e(z)$ koeficijent izloženosti.

Udarni pritisak vetra

U EN1991-1-4 dat je dijagram zavisnosti koeficijent izloženosti $c_e(z)$ od visine z , za sve kategorije terena ($c_o(z) = 1, k_t = 1$).



Pritisak vetra na površine objekta

Pritisak vetra na spoljnje površine w_e :

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

gde je:

$q_p(z_e)$ udarni pritisak vetra na referentnoj visini za spoljašnji pritisak z_e
 c_{pe} koeficijent spoljašnjeg pritiska

Analogno, pritisak vetra na unutrašnje površine w_i :

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

Pritisak vetra na površine objekta

Sile vetra F_w koje deluju na konstrukciju ili element:

spoljašnje: $F_{w,e} = c_s c_d \sum w_e \cdot A_{ref}$

unutrašnje: $F_{w,i} = \sum w_i \cdot A_{ref}$

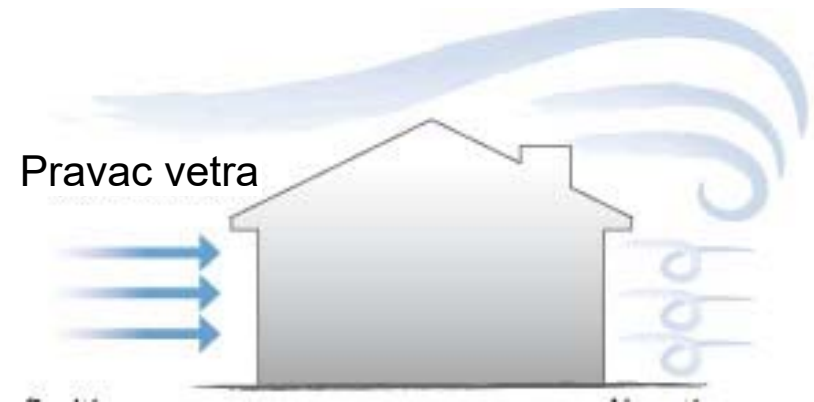
gde je

$c_s c_d$

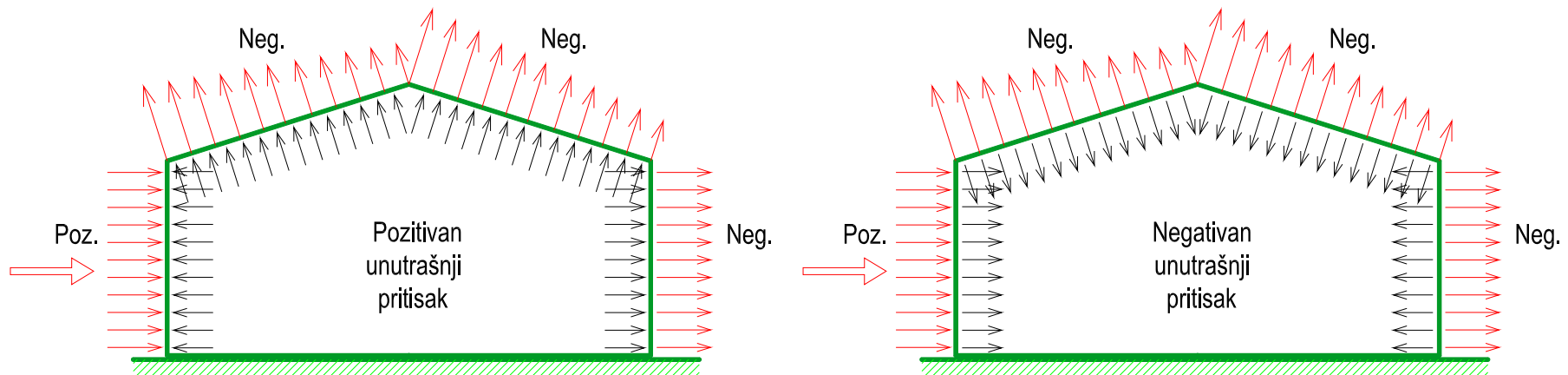
koeficijent konstrukcije

A_{ref}

referentna površina na koju deluje vetar



Pri proračunu ukupne horizontalne rezultante sila vetra na konstrukciju sile od unutrašnjeg pritiska se potiru.



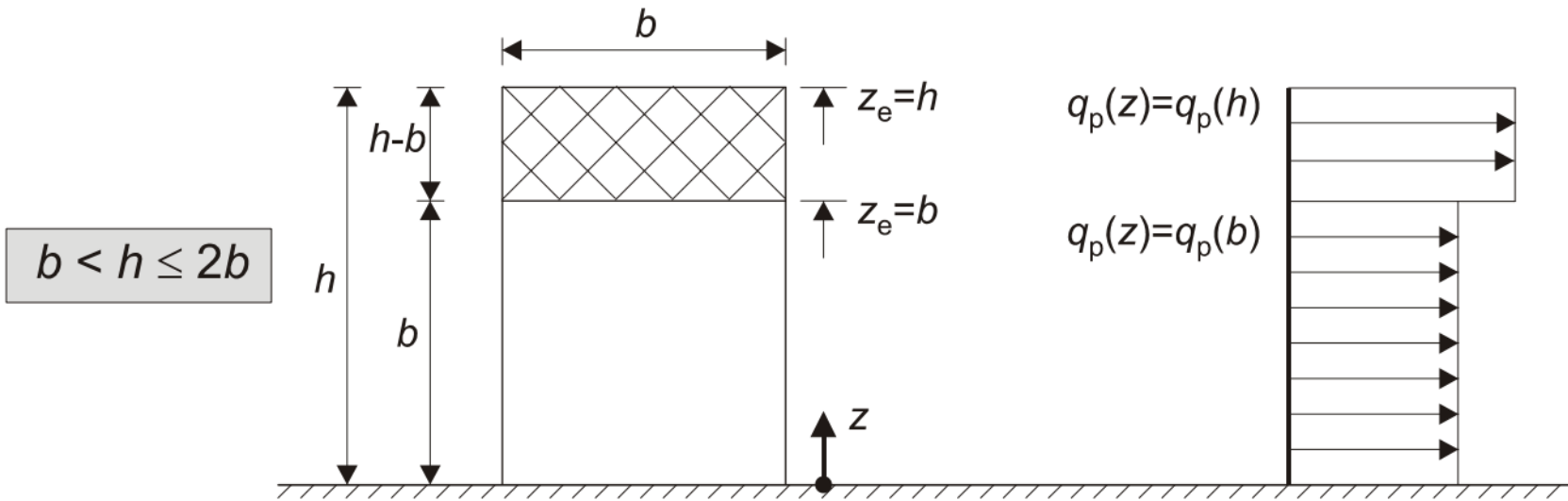
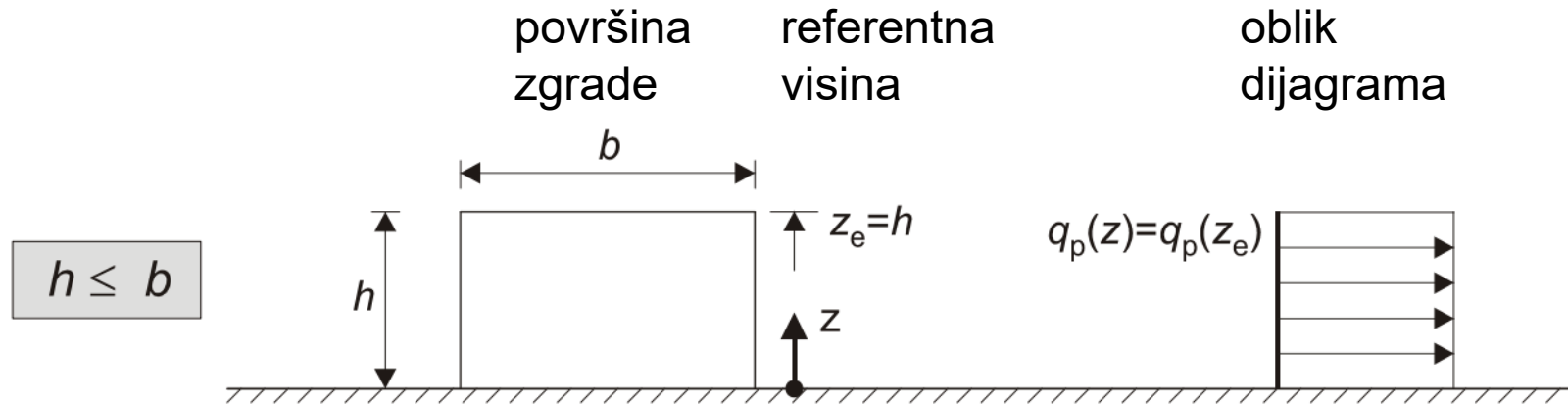
Pritisak vetra na površine objekta

Koeficijent konstrukcije $c_s c_d$

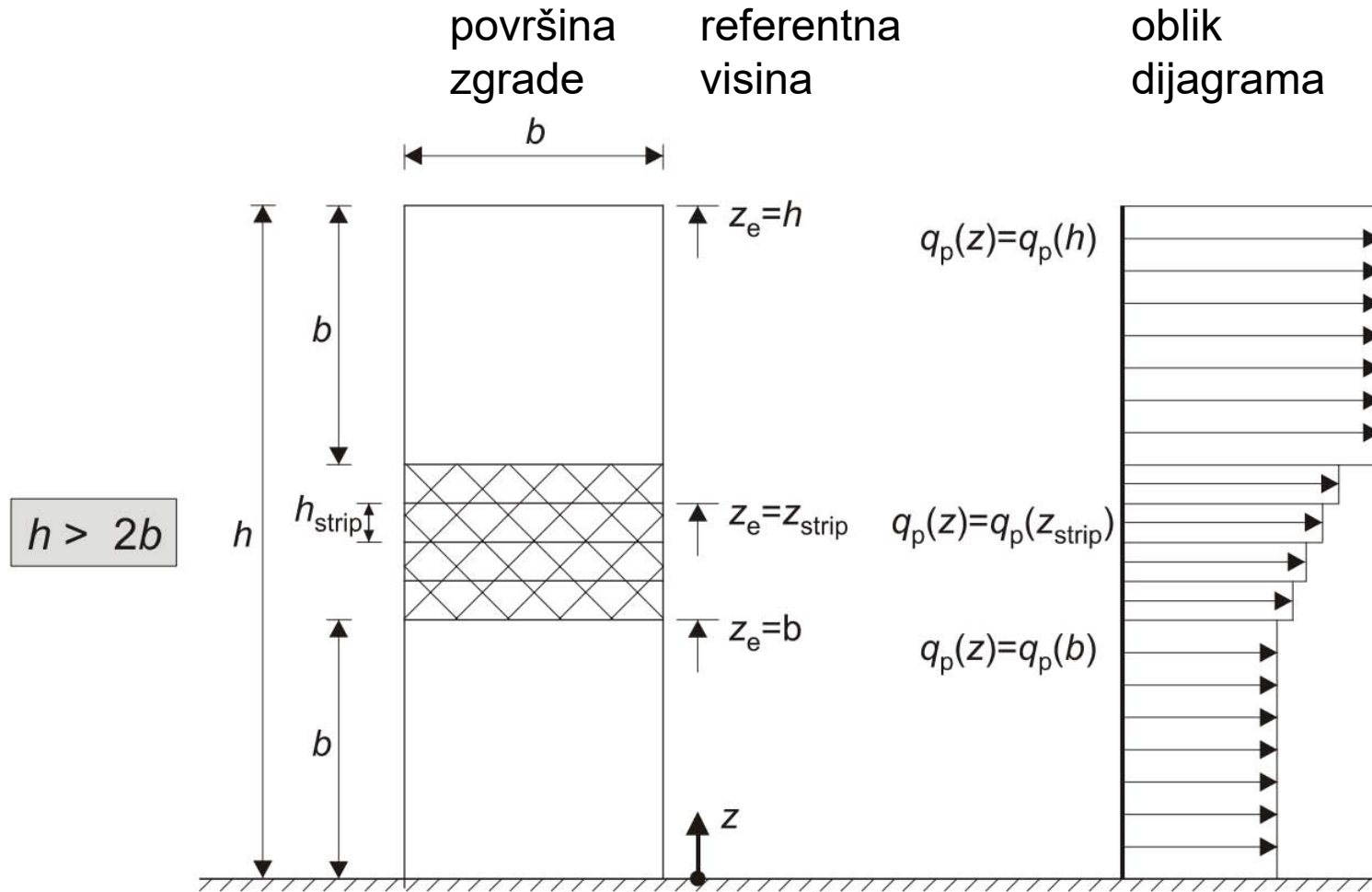
Za koeficijent konstrukcije, definisan kao proizvod $c_s c_d$, **usvaja se vrednost 1.0** u sledećim slučajevima:

- za zgrade, sa visinom manjom od 15 m,
- za ramovske konstrukcije zgrada koje imaju noseće zidove (*structural walls*), a koje su manje visine od 100 m i čija je visina manja od četvorostruke dubine u pravcu vetra (*in-wind depth*),
- za dimnjake kružnog poprečnog preseka, čija je visina manja od 60 m, kao i od vrednosti 6,5 puta prečnik,
- za fasadne i krovne elemente, koji imaju sopstvenu frekvenciju veću od 5 Hz.

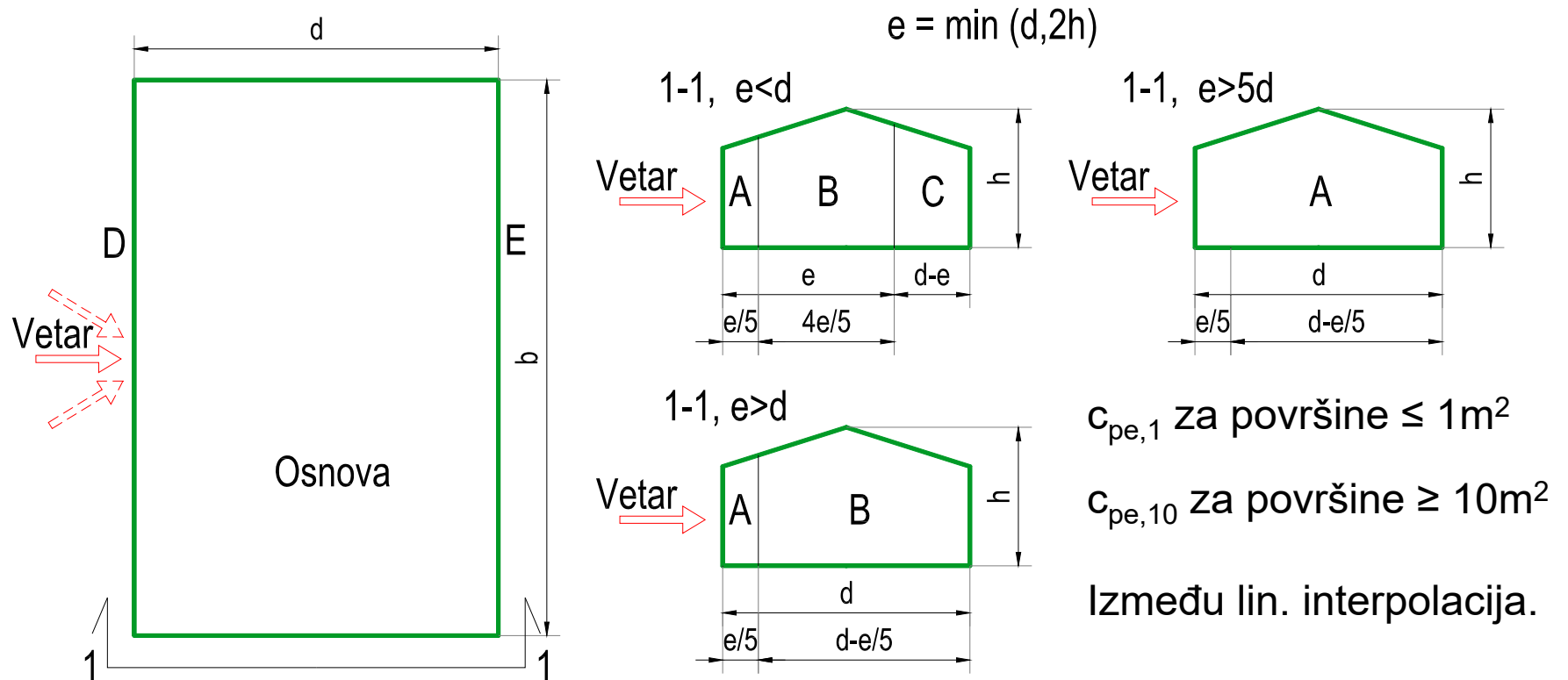
Raspodela pritisak vetra po visini objekta



Raspodela pritisak vetra po visini objekta

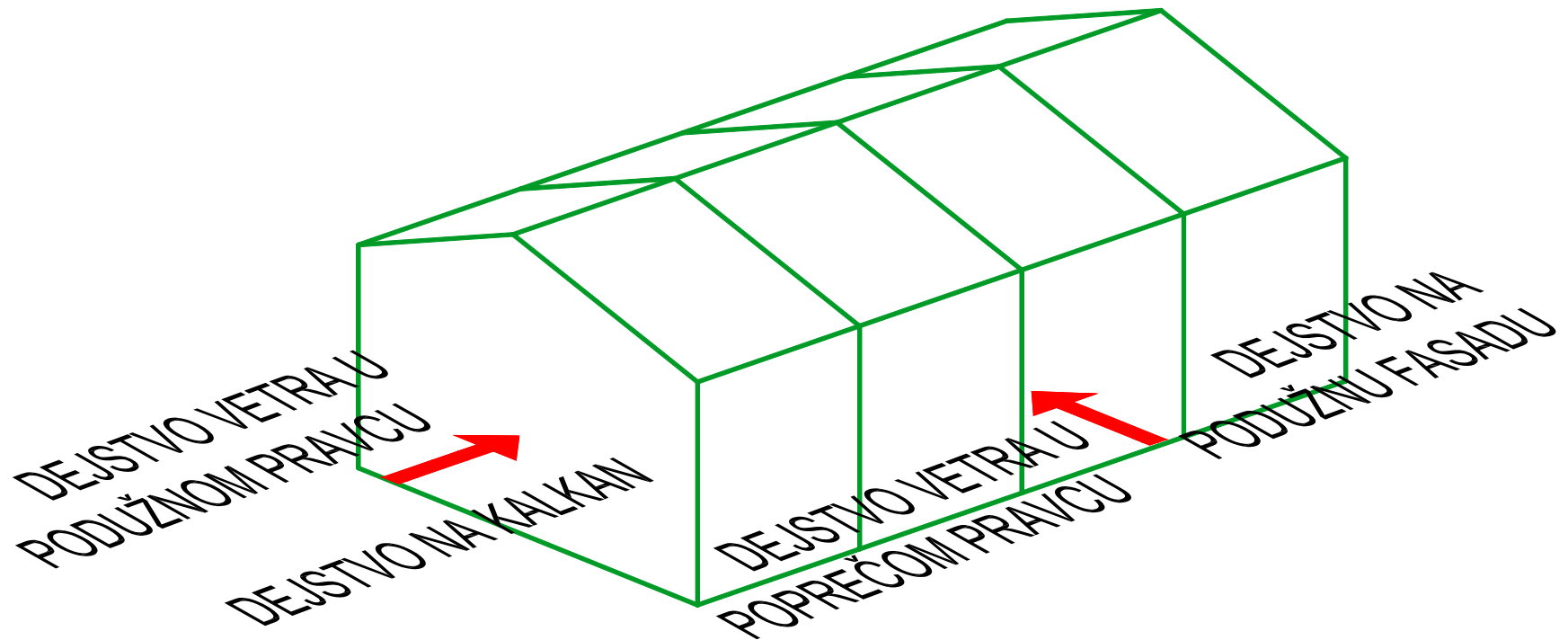


Koeficijent spoljašnjeg pritiska za vertikalne zidove

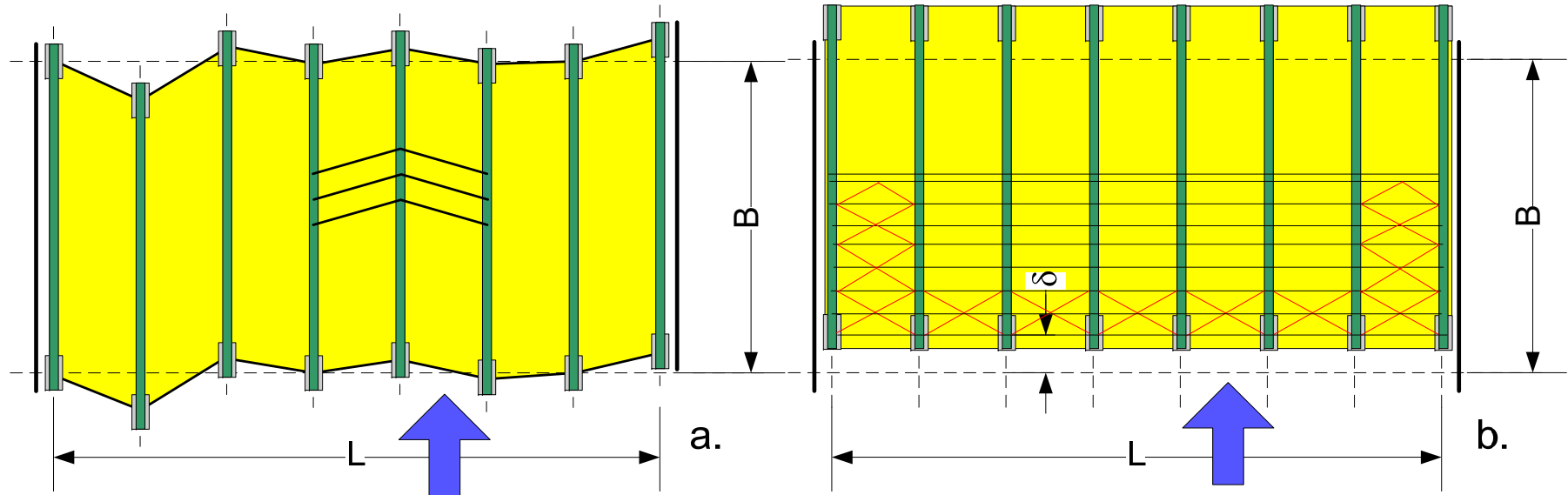


| Zona | A | | B | | C | | D | | E | |
|-------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
| h/d | $C_{pe,10}$ | $C_{pe,1}$ | $C_{pe,10}$ | $C_{pe,1}$ | $C_{pe,10}$ | $C_{pe,1}$ | $C_{pe,10}$ | $C_{pe,1}$ | $C_{pe,10}$ | $C_{pe,1}$ |
| 5 | -1,2 | -1,4 | -0,8 | -1,1 | -0,5 | | +0,8 | +1,0 | -0,7 | |
| 1 | -1,2 | -1,4 | -0,8 | -1,1 | -0,5 | | +0,8 | +1,0 | -0,5 | |
| <0,25 | -1,2 | -1,4 | -0,8 | -1,1 | -0,5 | | +0,7 | +1,0 | -0,3 | |

Osnovni pravci dejstva vetra na industrijsku halu



Krutost krovne ravni



Fleksibilna (meka)
krovná ravan

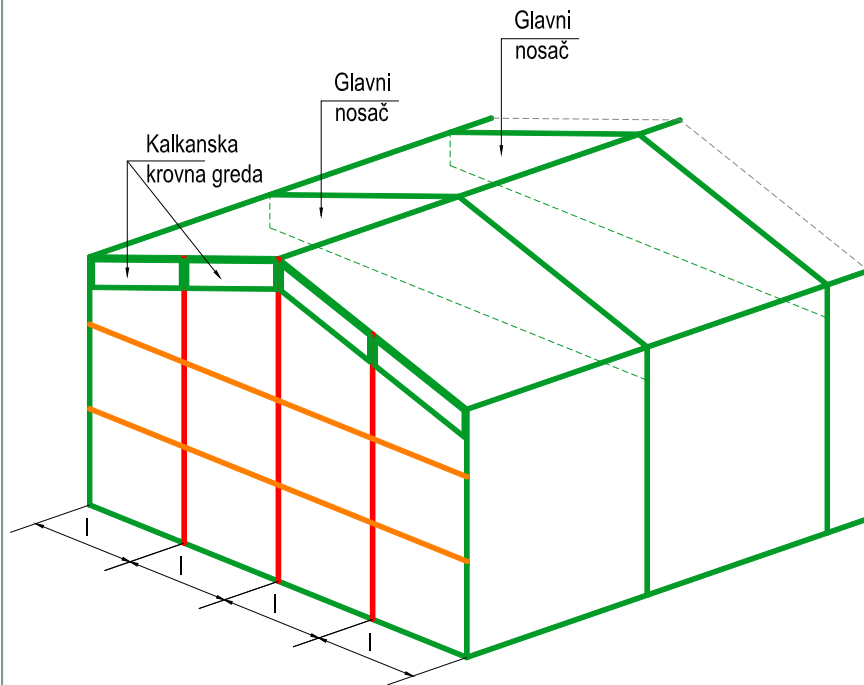
Ukrúćena (kruta)
krovná ravan

Preraspodela uticaja u vertikalnim elementima
(ramovima, zidovima, stubovima):

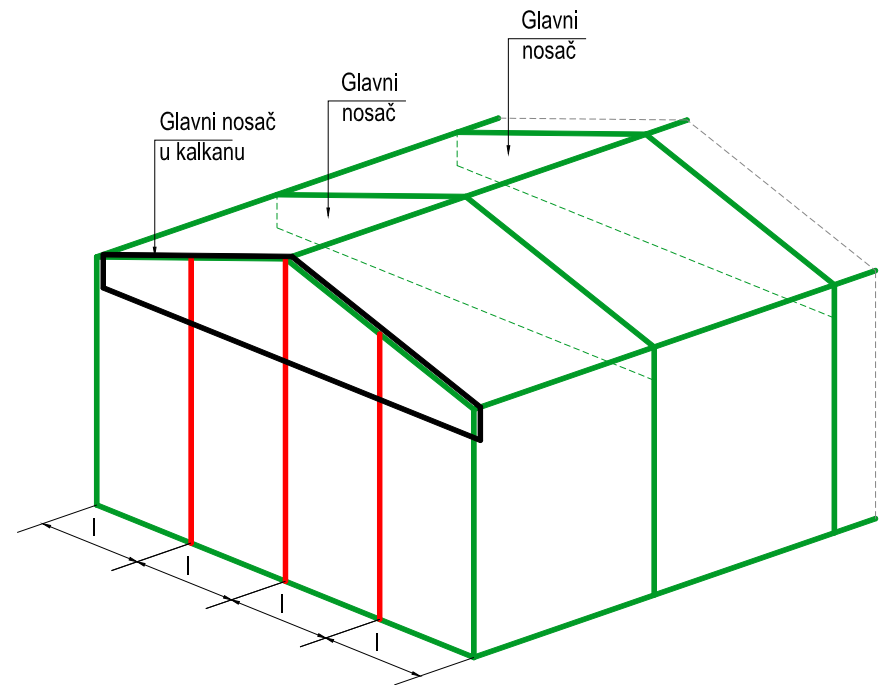
prema pripadajućoj
površini

prema pripadajućoj
krutosti

Dejstvo vetra na kalkan – kalkanske konstrukcije

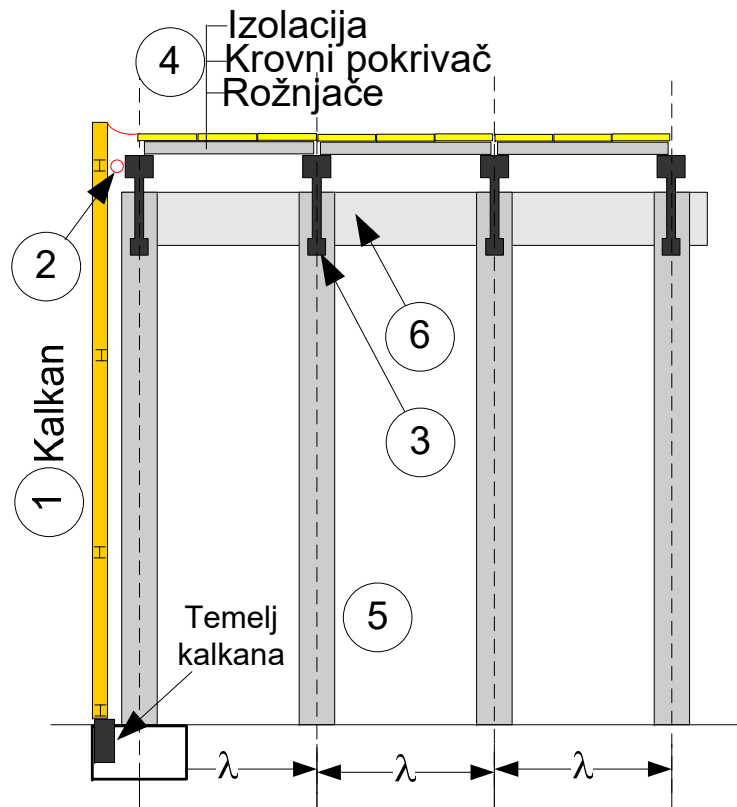


A. posebna konstrukcija kalkanu – stubovi, grede, krovne grede u kalkanu

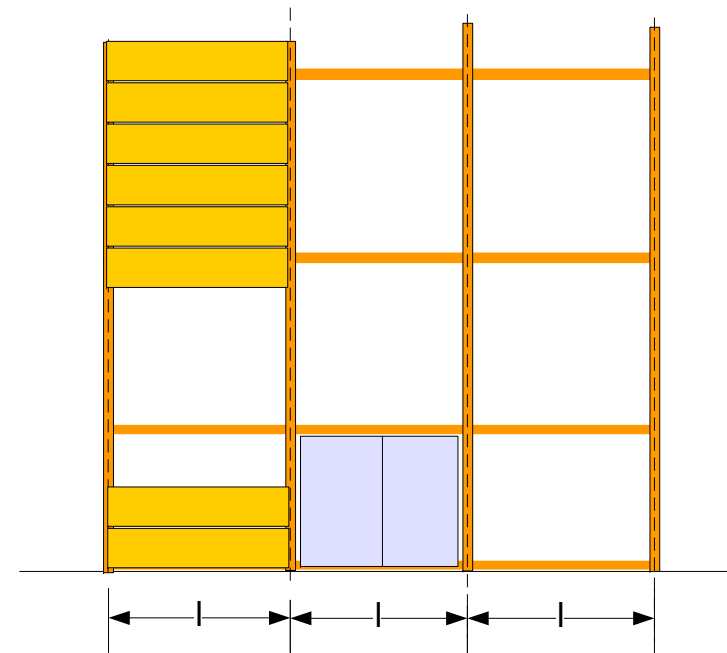


B. Glavni nosač u kalkanu – sekundarna kalkanska konstrukcija (mogućnost produženja hale)

Dejstvo vetra na kalkan – GN u kalkanu



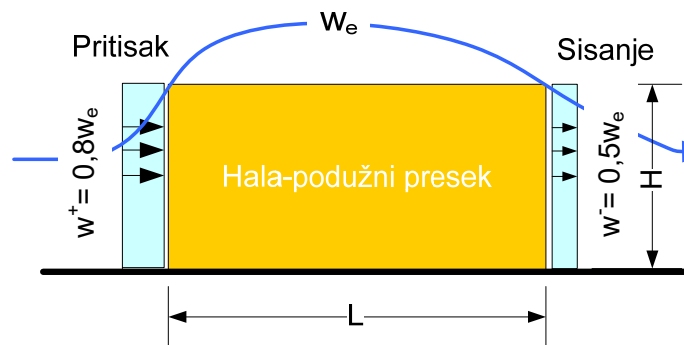
1. Konstrukcija kalkana
2. Horizontalna veza sa gornjim pojasem GN
3. donji pojas GN
4. slojevi krova
5. stub
6. greda podužnog rama



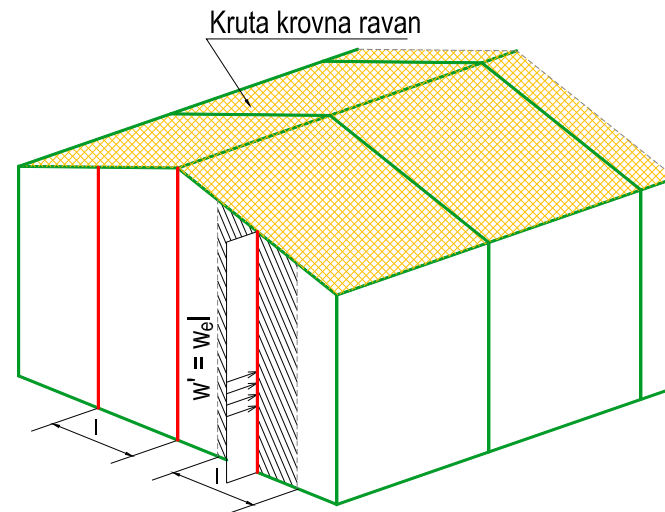
Konstrukcija kalkana:

- sekundarna konstrukcija (stubovi, ev. grede, beton ili čelik), “podkonstrukcija”
- horizontalni paneli
- vrata (“kamionska”)

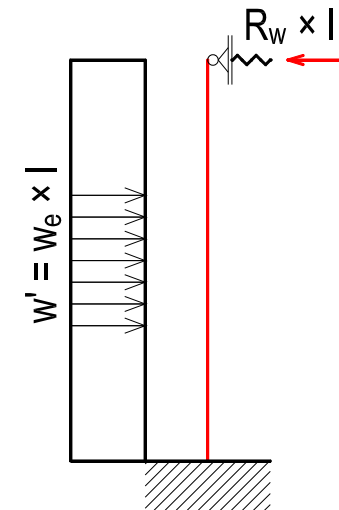
Dejstvo vetra na kalkan – kruta krovna ravan



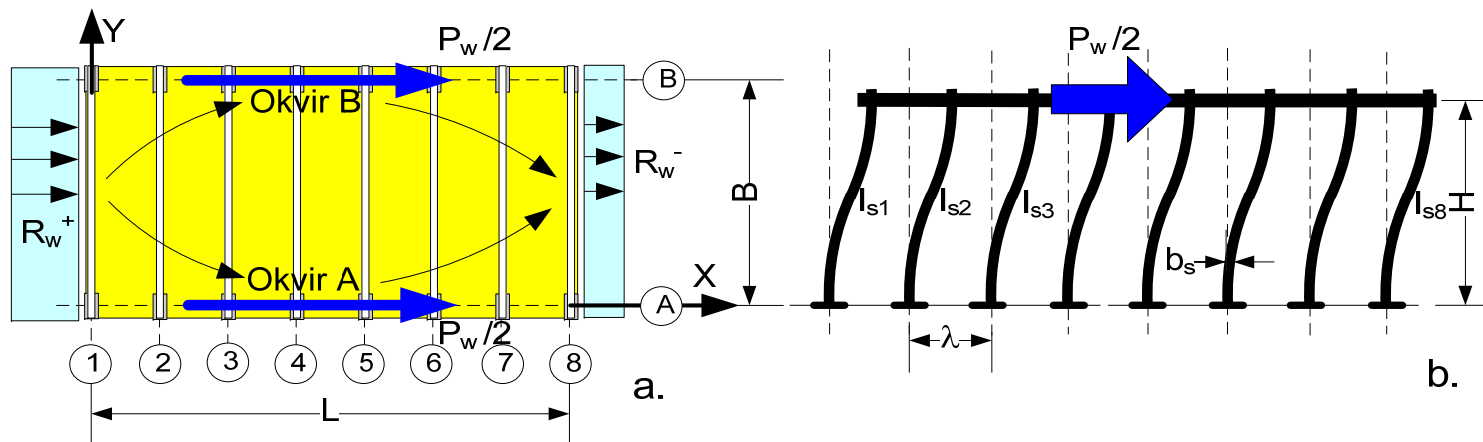
Dejstvo vetra u podužnom pravcu



Opterećenje na jedan stub

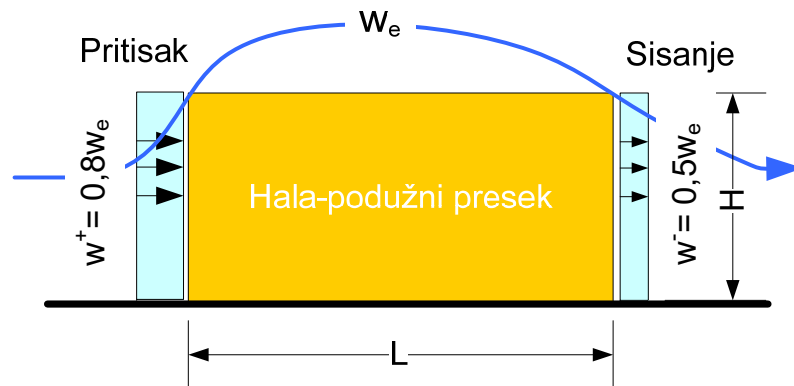


Stat. sistem stuba

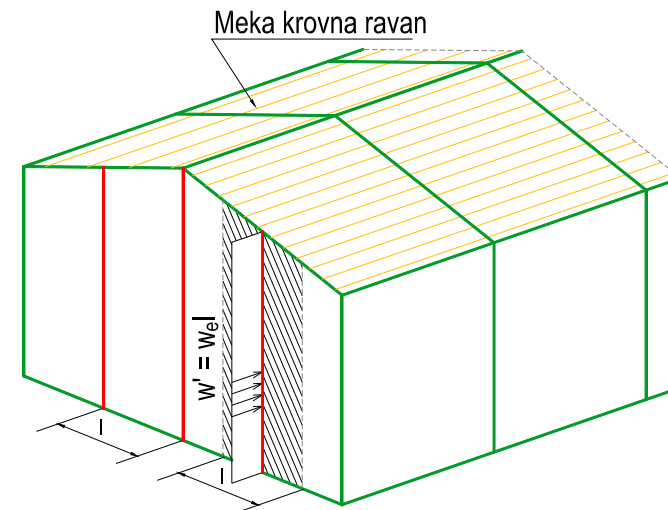


Penošenje “razmazane” reakcije u vrhu kalkanskih stubova na podužne ramove

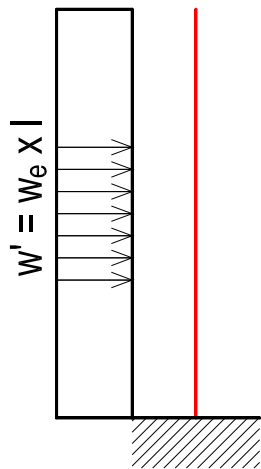
Dejstvo vetra na kalkan – fleksibilna (meka) krovna ravan



Dejstvo vetra u podužnom pravcu



Opterećenje na jedan stub

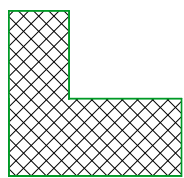


Stat. sistem stuba – konzola

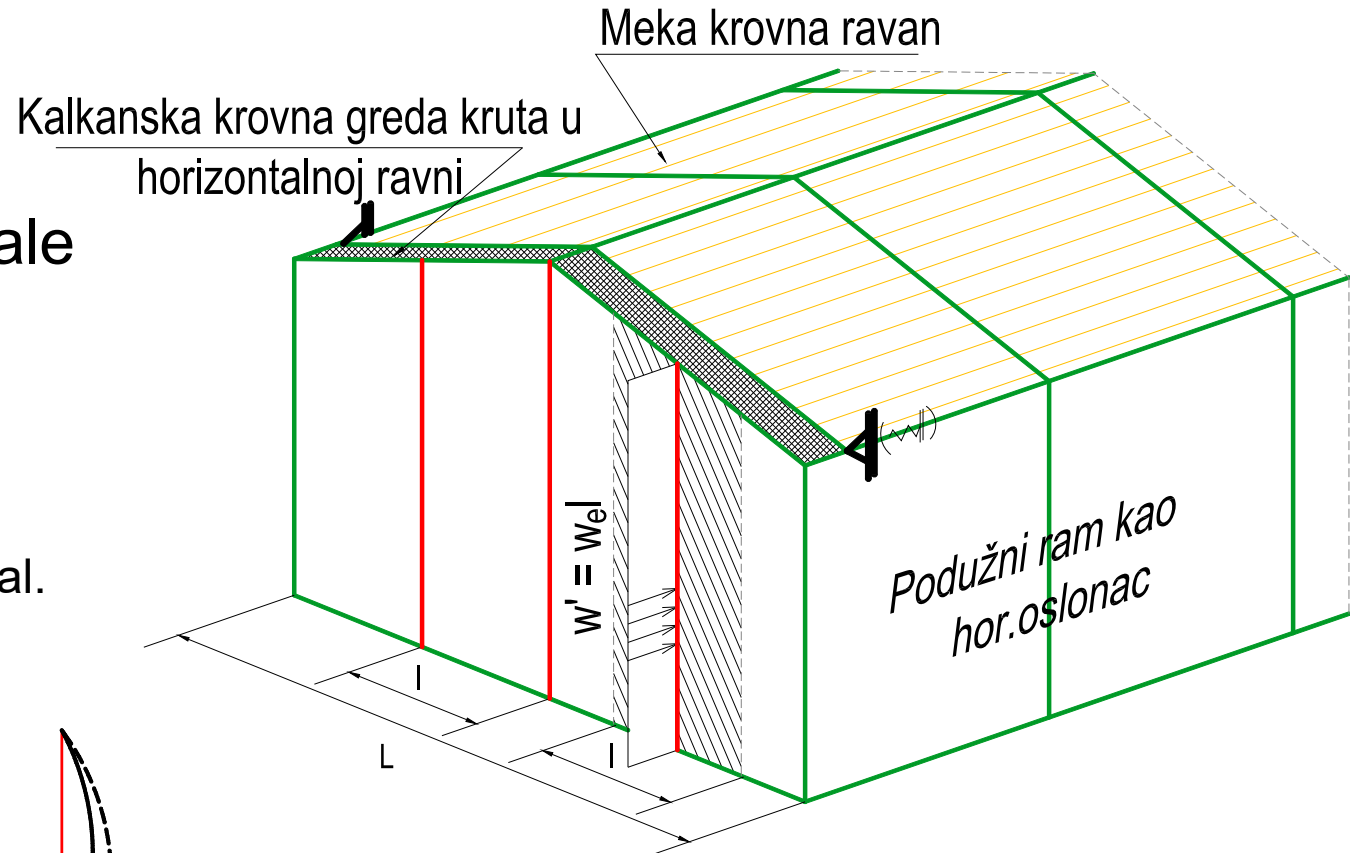
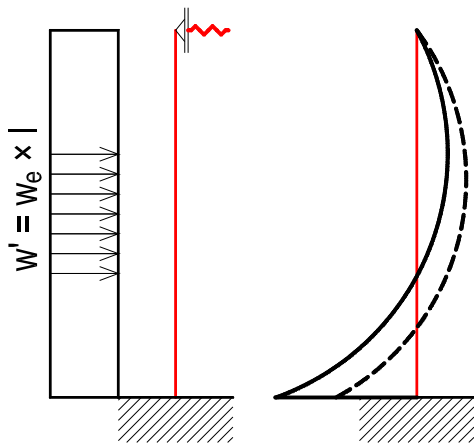
- velika pomeranja, nepovoljno za veze fasadne obloge
- potrebno je ukrutiti krovnu ravan

Dejstvo vetra na kalkan – ukrućenje fleksibilne krovne ravni

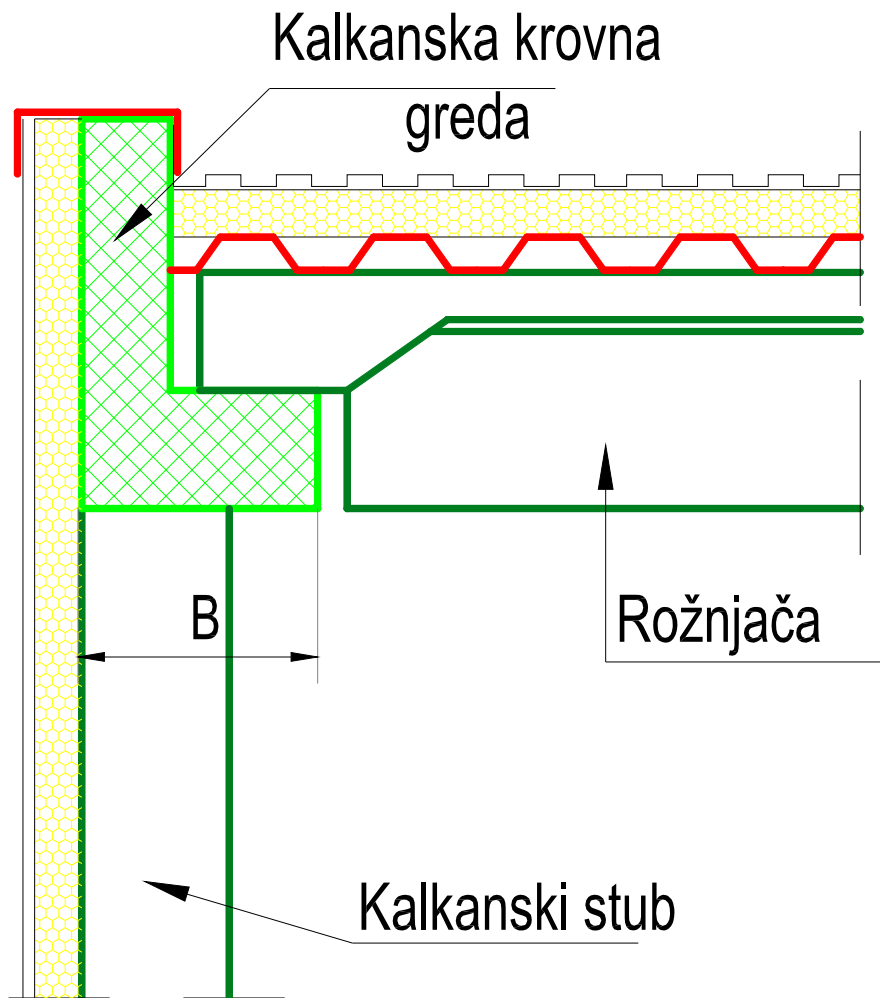
Manji raspon hale
 $L \leq 12\text{m}$



Presek krovne kal. grede



Krovna greda predstavlja horizontalan elastičan oslonac u vrhu kalkanskog stuba. Za proračun se može usvojiti nepokretan oslonac.

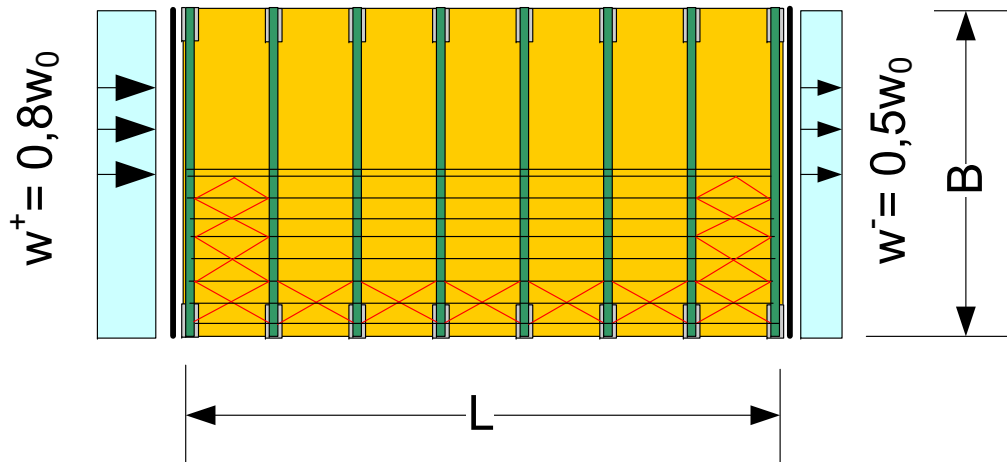
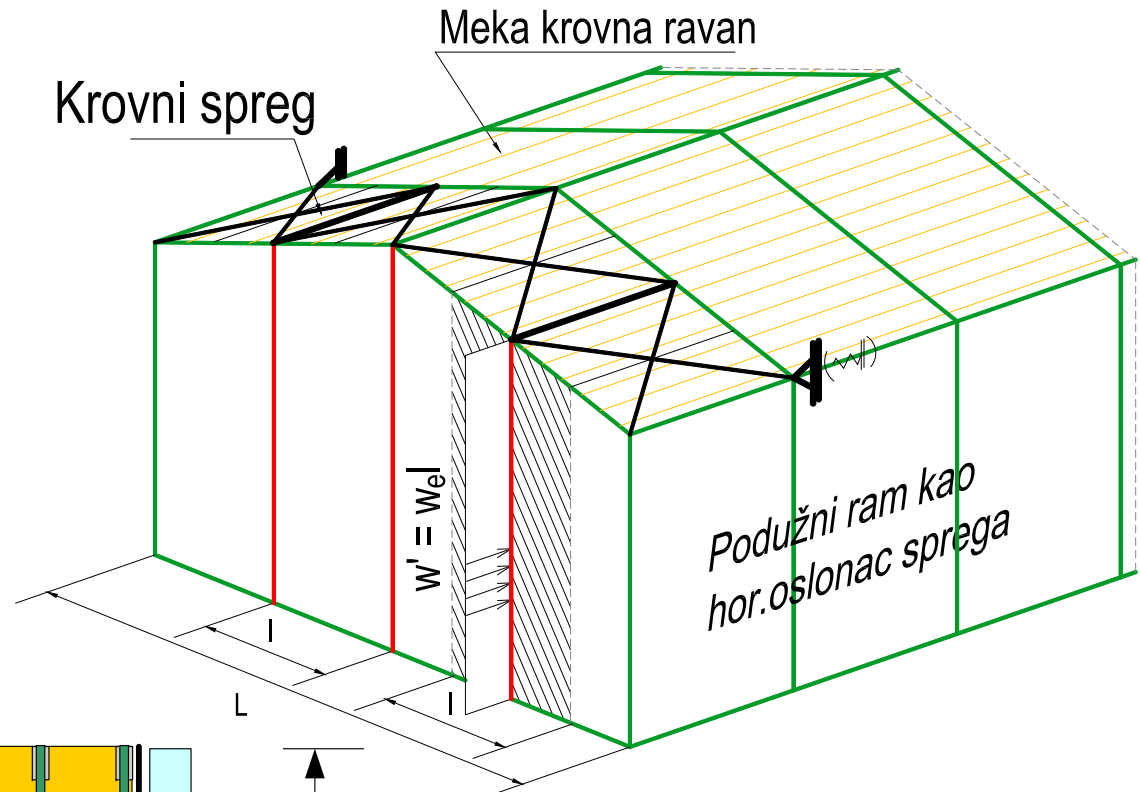


Kalkanski stubovi –
vertikalni oslonci za
kalkansku krovnu gredu.

Kalkanska krovna greda
– horizontalni (elastični)
oslonac za kalkanski stub
(raspona L , horizontalne
krutosti u funkciji od
širine B).

Dejstvo vetra na kalkan – ukrućenje fleksibilne krovne ravni

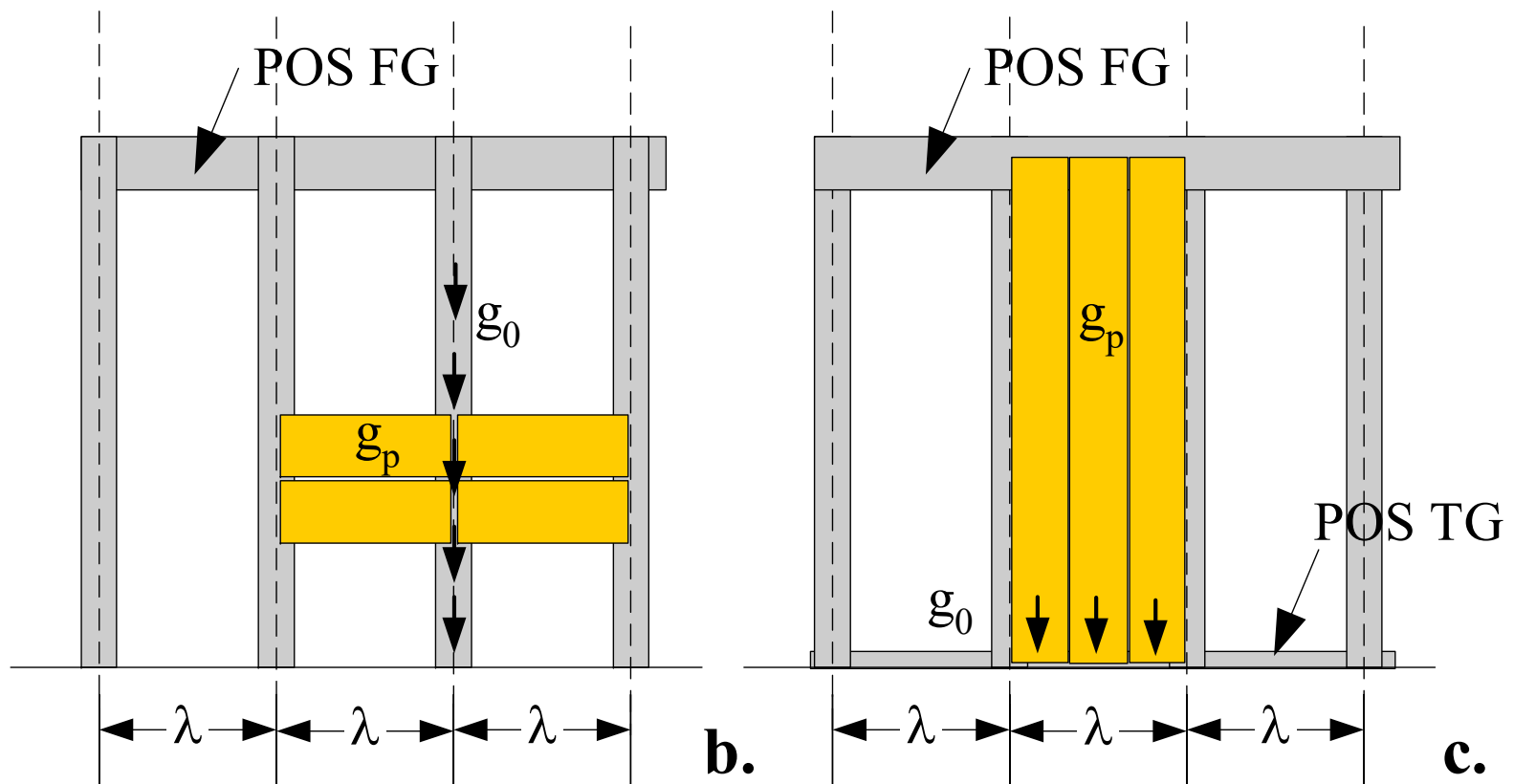
Veći raspon hale
 $L > 12\text{m}$
KROVNI SPREG



Pojasevi sprega:
gornji pojas GN (i greda u kalkanu)
Vertikale sprega:
rožnjače
Dijagonale sprega:
čelični profili ili armatura (“okruglo gvožđe”)

Dejstvo vetra na podužnu fasadu

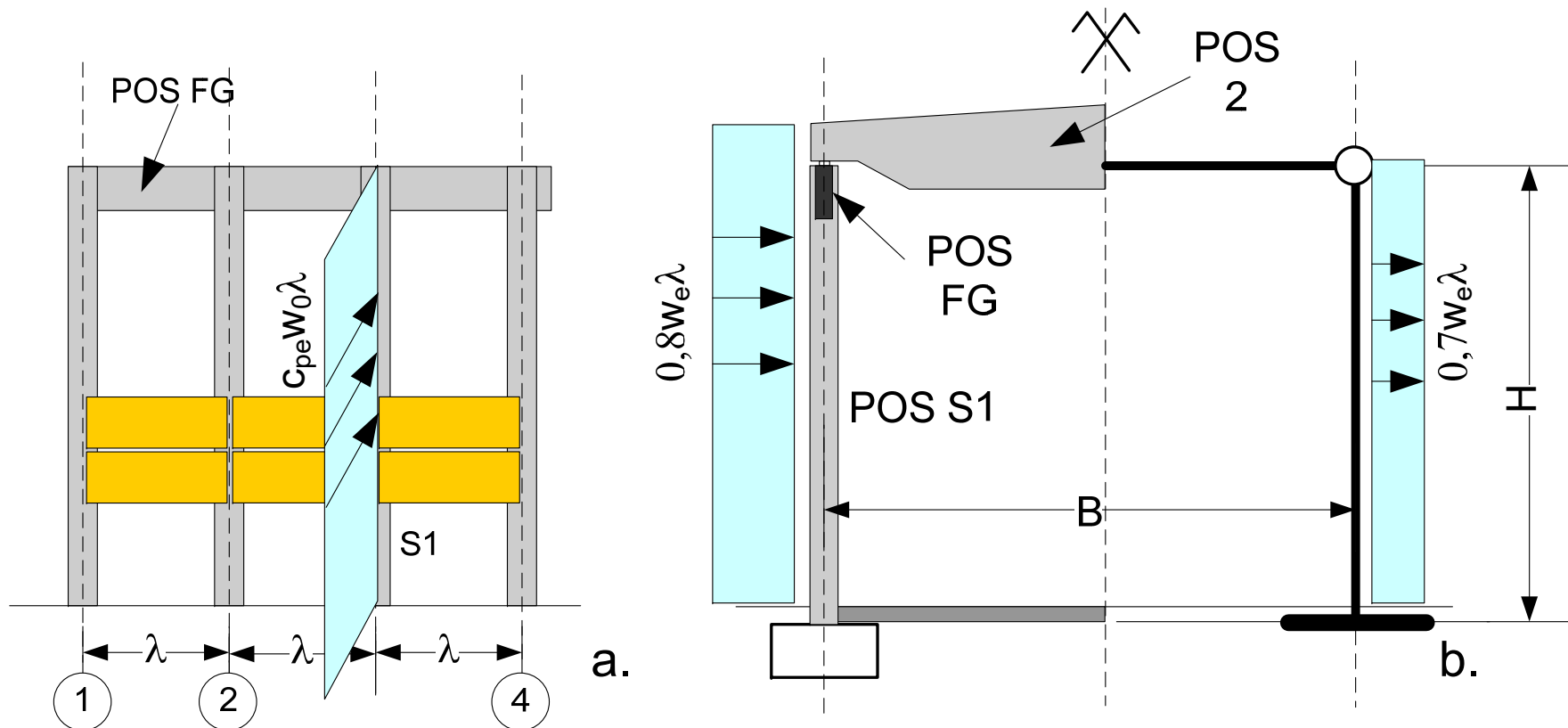
Zavisi od orientacije fasadnih panela



Dejstvo vetra na podužnu fasadu

Horizontalno postavljeni fasadni paneli

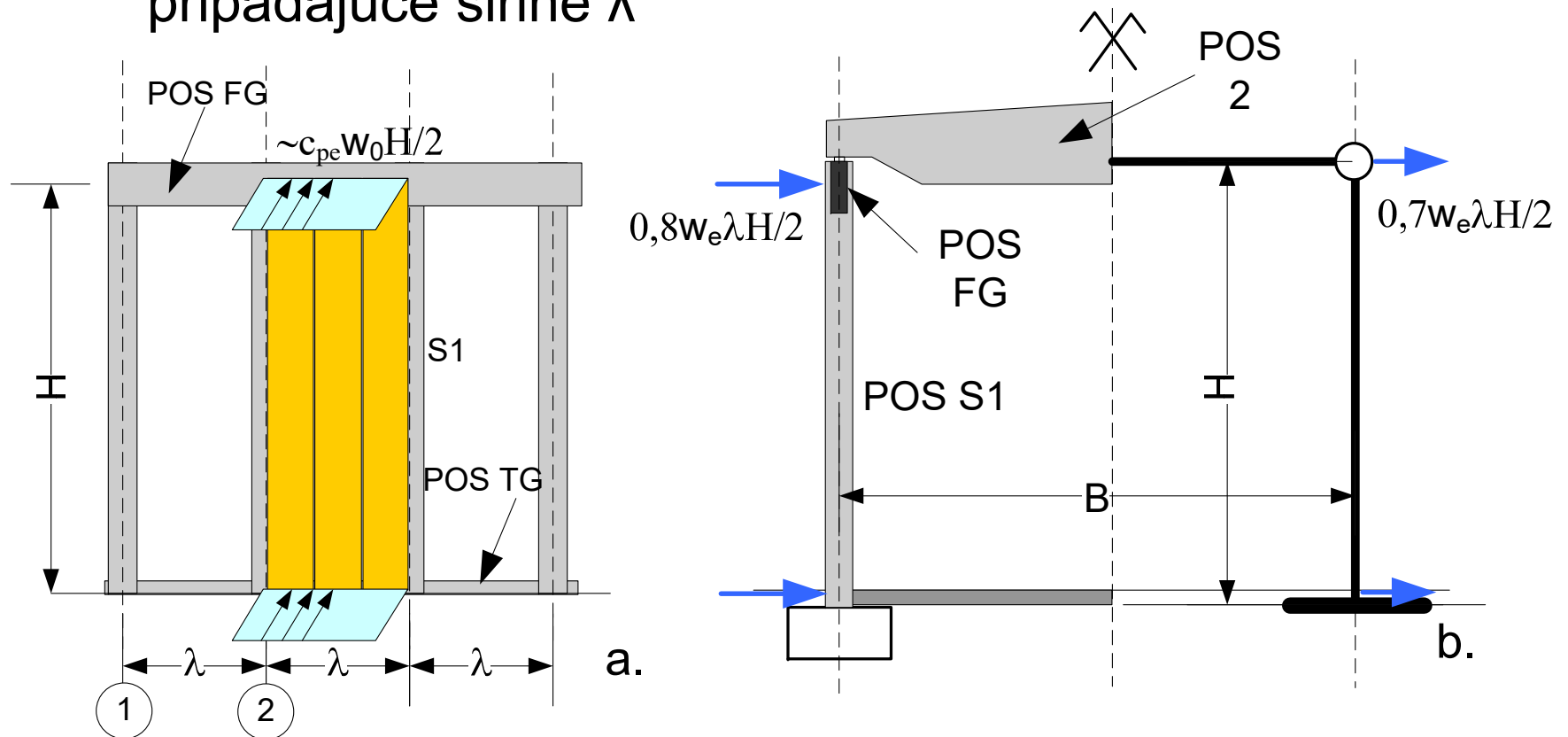
→ jednako podeljeno opterećenje na poprečni ram sa pripadajuće širine λ



Dejstvo vetra na podužnu fasadu

Vertikalno postavljeni fasadni paneli

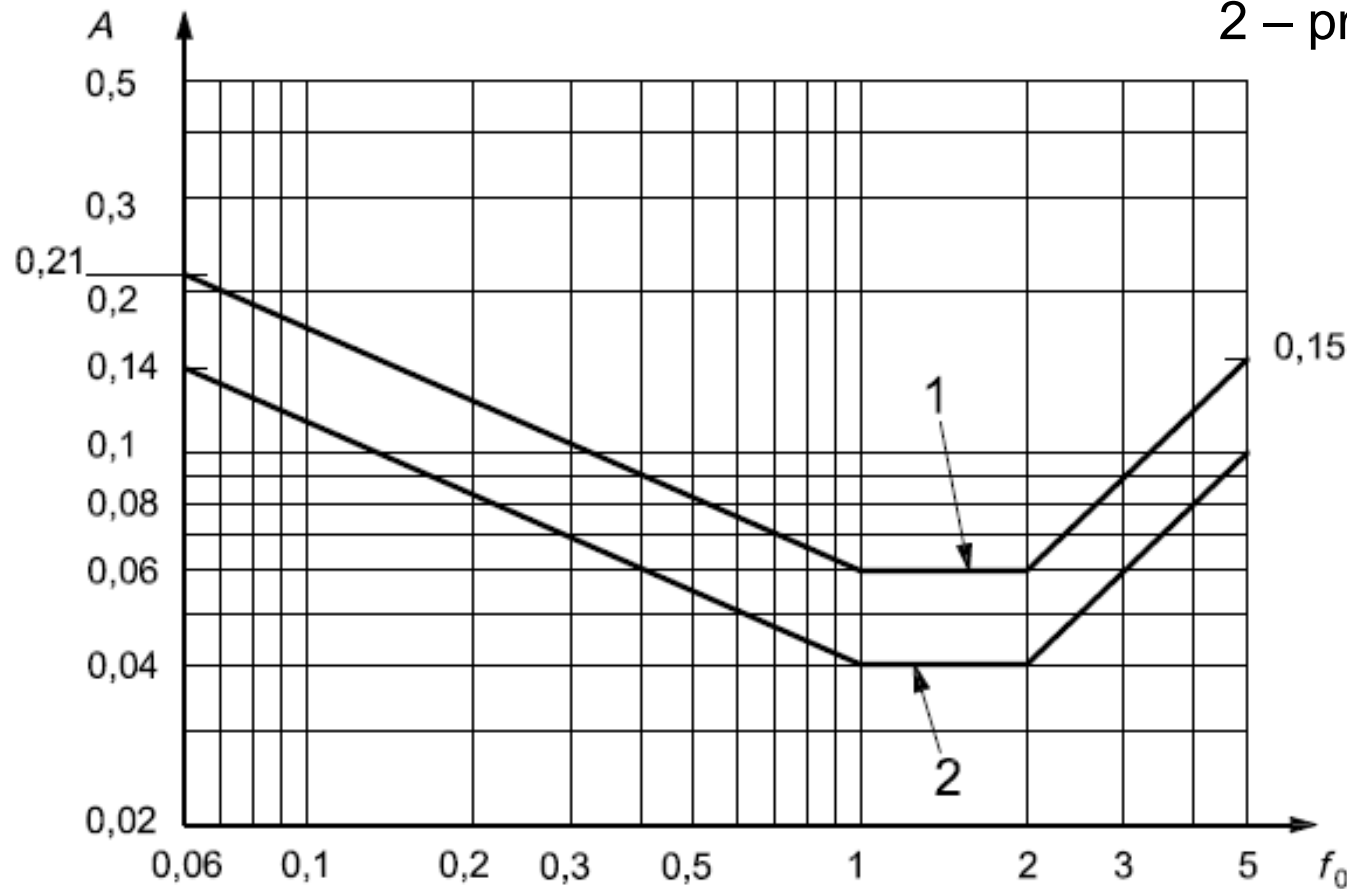
- jednako podeljeno opterećenje na fasadne grede, koje prenose koncentrisane sile na poprečni ram sa pripadajuće širine λ



Maksimalna pomeranja ?

Vibracije od vetra na objekte ISO 10137

- 1 – kancelarski prostor
- 2 – prostor za stanovanje



A – maksimalno ubrzanje
f – frekvencija oscilovanja prvog tona

Maksimalno ubrzanje A: standardna devijacija karakteristicnog ubrzanja vetra pomnožena udarnim koeficijentom
 $A = \sigma_a(h) \cdot k_p'$

PRORAČUN PO TEORIJI II REDA GLOBALNA STABILNOST

Analiza AB konstrukcija prema teoriji drugog reda je složena (materijalna + geometrijska nelinearnost), čak i ako se koriste uprošćene metode, proračuni su vremenski zahtevni.

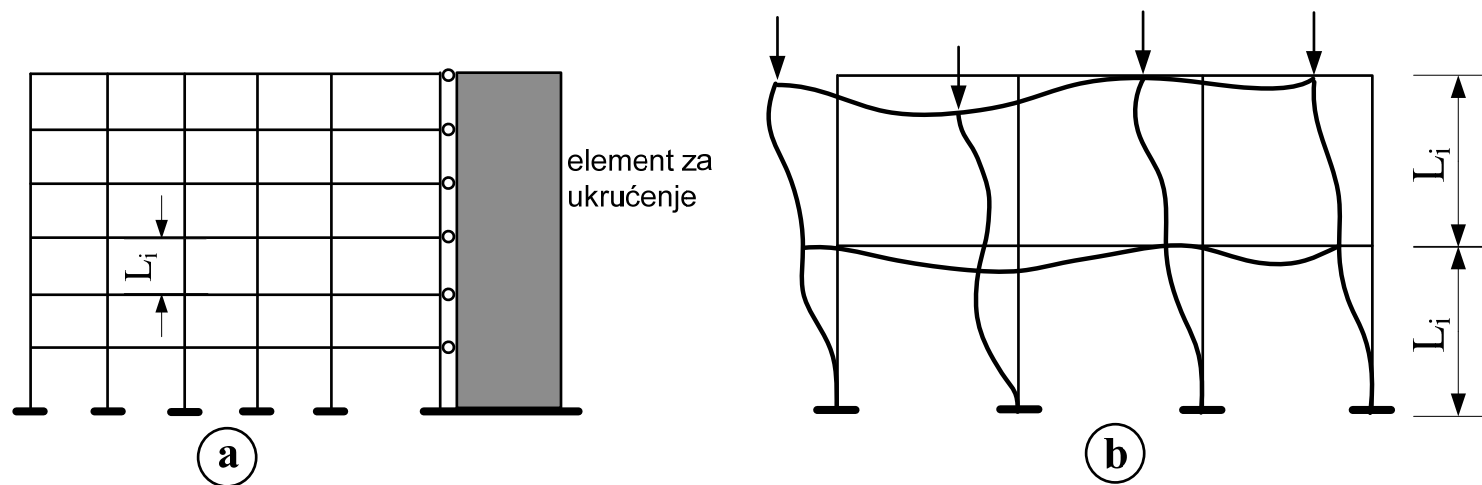
Teorijski, svi elementi izloženi dejstvu spoljašnje aksijalne sile pritiska imaju veće momente savijanja od onih koji su sračunati po teoriji prvog reda.

Praktično, u mnogima se to povećanje može zanemariti.

Zato je korisno definisati granice do kojih se efekti uticaja drugog reda mogu zanemariti

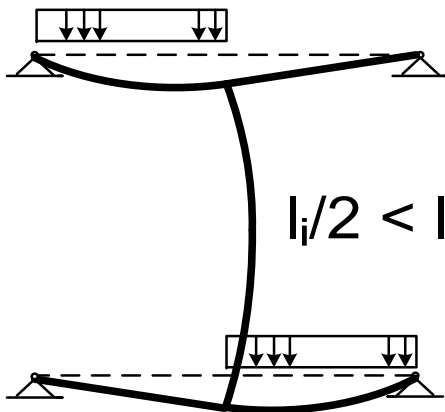
Horizontalna pomeljivost ramova

Najvažniji uticaj na efektivnu dužinu ima pomerljivost čvorova rama, odnosno da li je ram ukrućen ili ne. Ako postoji kruta konstrukcija koja sprečava bočna pomeranja razmatranog rama, onda su svi čvorovi teorijski nepomerljivi i takav ram se smatra **ukrućenim**. Ako takva konstrukcija ne postoji, čvorovi rama su pomerljivi i takav ram se smatra **neukrućenim**.



Efektivna dužina stubova u a) ukrućenom i b) neukrućenom ramu

Nepomerljivi

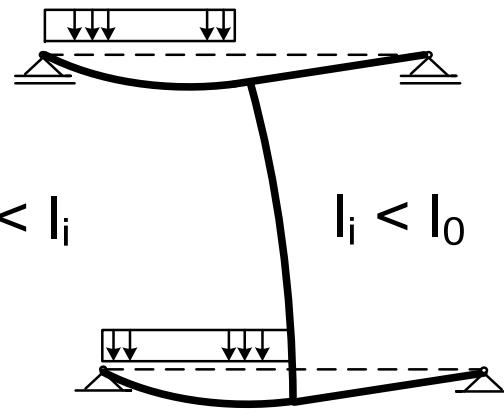


$$1/2 < k < 1$$

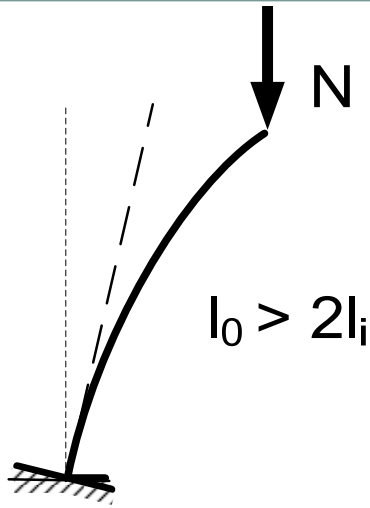
Efektivna dužina stuba ukrućenog rama l_0 :

Efektivna dužina stuba neukrućenog rama l_0 :

Pomerljivi



$$1 < k < \infty$$



$$2 < k < \infty$$

$$L_i / 2 < l_0 < L_i$$

$$L_i < l_0 < \infty$$

(L_i - spratna visina)

Dokaz graničnog stanja nosivosti vitkih **stubova neukrućenog rama** treba sprovesti nelinearnom analizom rama kao celine, a u slučaju da se stubovi među sobom razlikuju po dimenzijama ili opterećenju, neophodno je dokazati i stub sa najvećom vitkošću u njegovoj izdvojenoj formi izvijanja.

Za vitke **stubove ukrućenih ramova** smatra se da je dovoljno tačno dokazati njihovu graničnu nosivost na izdvojenim modelima.

Metode analize

Analiza vitkih AB elemenata i konstrukcija sprovodi se primenom **teorije drugog reda**, uzimajući u obzir **materijalnu nelinearnost** betonskih konstrukcija. Kako je u pitanju nelinearna analiza, princip superpozicije ne važi, i analiza se mora sprovoditi za granično opterećenje.

Približni postupci za dokaz granične nosivosti vitkih AB elemenata:

- za izdvojene elemente, najpopularnija metoda u domaćoj praksi je metoda "**model stuba**",
- za neukružene konstrukcije ramova u celini često se koristi **približni P- Δ postupak**.

ULS – uticaji drugog reda

Granično stanje nosivosti vitkih AB elemenata se razlikuje od svih ostalih graničnih stanja nosivosti po tome što zavisi od **deformacija konstrukcije**, koje se inače kontrolišu u okviru graničnog stanja upotrebljivosti. Zbog toga je neophodno da svi relevantni faktori, od kojih zavise deformacije, budu uključeni sa svojim proračunskim vrednostima pri izvođenju dokaza. To se postiže uvođenjem:

- **geometrijskih imperfekcija** u vidu početnih ekscentriciteta ili nagiba;
- vremenskih deformacija betona – **tečenje**;
- **mogućih pomeranja oslonaca**;
- **proračunskih vrednosti svojstava materijala** koja određuju njegovu deformabilnost.

Proračun prema odredbama SRPS EN 1992-1-1

EC2 razlikuje dve vrste konstrukcijskih elemenata kada je u pitanju stabilnost:

-elementi ili sistemi koji su ukrućeni su konstrukcijski elementi ili sistemi za koje se u proračunu pretpostavlja da ne doprinose ukupnoj horizontalnoj stabilnosti konstrukcije;

- *elementi ili sistemi za ukrućenje* su konstrukcijski elementi ili sistemi za koje se u proračunu pretpostavlja da doprinose ukupnoj horizontalnoj stabilnosti konstrukcije.

EC2 dozvoljava zanemarenje uticaja drugog reda ukoliko su manji od 10% od odgovarajućih uticaja prvog reda.

NEUPOTREBLJIVO !

ULS – uticaji drugog reda

UPROŠĆENI KRITERIJUMI ZA ZANEMARENJE UTICAJA DRUGOG REDA

Postoje uprošćeni kriterijumi:

- za zanemarenje uticaja drugog reda kod izdvojenih elemenata
- za zanemarenje globalnih uticaja drugog reda

Globalni uticaji drugog reda se mogu očekivati u konstrukcijama sa fleksibilnim sistemom za ukrućenje. EC2 propisuje kriterijume kada se globalni uticaji drugog reda mogu zanemariti. *Ukoliko su ovi kriterijumi zadovoljeni, konstrukcija se smatra “nepomerljivom” (non-sway) i nosivost elemenata se može dokazati na lokalnom nivou, dakle na izdvojenim elementima. Ukoliko nisu, radi se globalna analiza.*

Kriterijum za zanemarenje globalnih uticaja

Globalni uticaji drugog reda u zgradama se mogu zanemariti ako je:

$$F_{V,Ed} \leq k_1 \cdot \frac{n_s}{n_s + 1.6} \cdot \frac{\sum E_{cd} I_c}{L^2}$$

$F_{V,Ed}$ ukupno vertikalno opterećenje (za ukrućene elemente i elemente za ukrućenje);

n_s broj spratova;

L ukupna visina zgrade iznad nivoa uklještenja;

E_{cd} proračunska vrednost modula elastičnosti betona, biće definisan;

I_c moment inercije poprečnog preseka (beton bez prslina) elemenata za ukrućenje.

$$k_1 = 0.31$$

$k_2 = 0.62$ ako se može dokazati da su elementi za ukrućenje bez prslina u ULS.

ULS – uticaji drugog reda

Prethodni izraz važi samo ako su ispunjeni svi sledeći uslovi:

- torziona nestabilnost nije merodavna, konstrukcija je u dovoljnoj meri simetrična;
- globalne deformacije smicanja su zanemarljive (na primer sistem za ukrućenje se pretežno sastoji od zidova bez većih otvora);
- elementi za ukrućenje su kruto fiksirani u osnovi, odnosno rotacije uklještenja su zanemarljive;
- krutost elemenata za ukrućenje je približno konstantna po visini;
- ukupno vertikalno opterećenje se povećava približno ravnomerno po spratovima.

U opštijem slučaju, kada globalne deformacije sistema za ukrućenje nisu zanemarljive, i kada rotacije uklještenja nisu zanemarljive, odgovarajući kriterijumi su dati u **Aneksu H, EC2**.

KADA SE GLOBALNI UTICAJI DRUGOG REDA NE MOGU ZANEMARITI

Kada **nije** zadovoljen uslov:

$$F_{V,Ed} \leq k_1 \cdot \frac{n_s}{n_s + 1.6} \cdot \frac{\sum E_{cd} I_c}{L^2}$$

nosivost i stabilnost pritisnutih elemenata mora se dokazati globalnom analizom konstrukcije prema teoriji drugog reda, a ne na izdvojenim elementima.

Uvođenjem metode zasnovane na nominalnoj krutosti, EC2 dozvoljava mogućnost da se globalna analiza konstrukcija sprovodi „linearnom“ teorijom drugog reda, odnosno korišćenjem **konstantne nominalne krutosti** kojom se, na uprošćen način, uvode efekti prslina, tečenja i materijalne nelinearnosti. Bez ove mogućnosti, globalna analiza konstrukcija morala bi uvek da bude nelinearna.

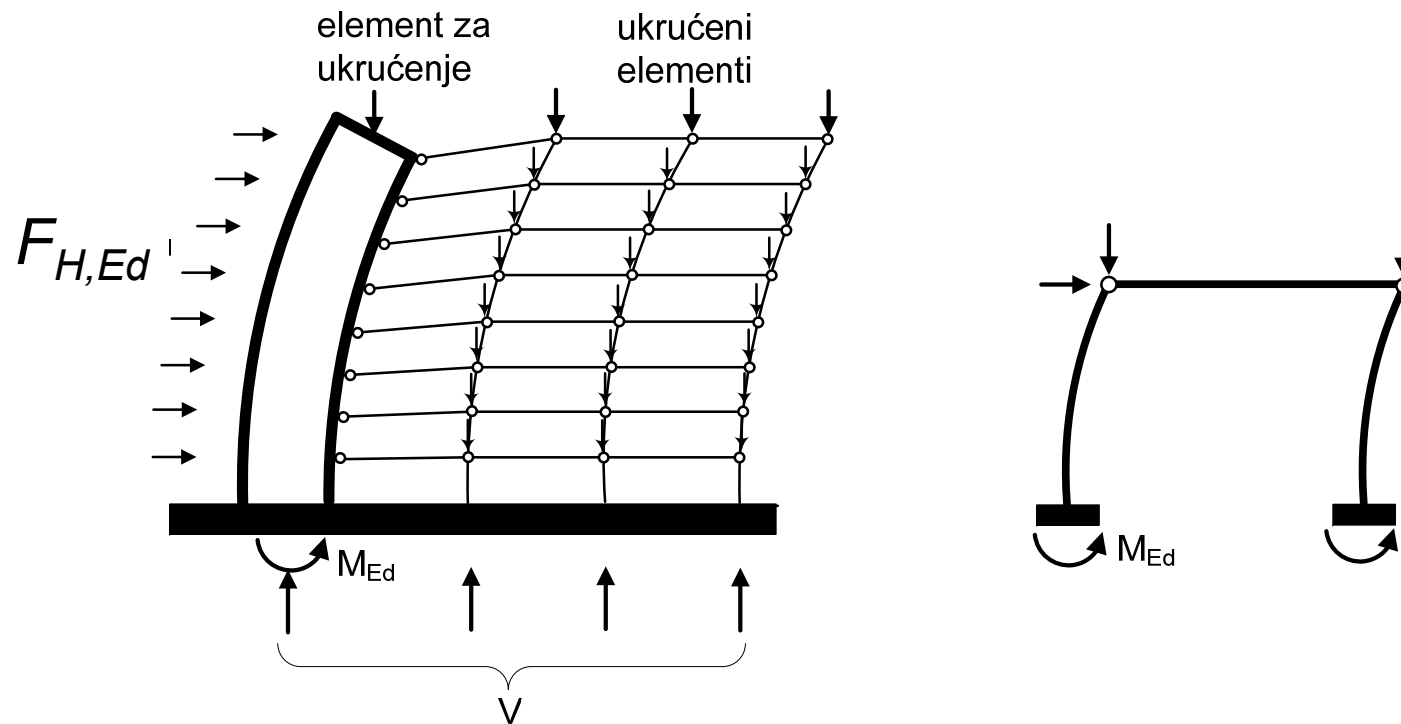
Dva pristupa približnoj analizi konstrukcija po teoriji II reda

Kada su efekti uticaja drugog reda značajni, uticaj prslina, tečenja itd. može biti podjednako važan kao kod izolovanih elemenata. Takođe, i kada je vitkost elemenata za ukrućenje mala, efekti uticaja drugog reda mogu biti značajni, ako su ukrućeni elementi opterećeni velikim vertikalnim opterećenjem.

U principu, moguća su dva pristupa: jedan koji se zasniva na **faktoru uvećanja momenta savijanja**, ili na **faktoru uvećanja horizontalnih sila**, što je dato u **Aneksu H, EC2**.

Metoda nominalne krutosti za globalnu analizu

Pristup koji se zasniva na **metodi nominalne krutosti**, pogodan je za konstrukcije koje su ukrućene zidovima koji nemaju značajne deformacije smicanja, ili za konstrukcije koje su ukrućene konzolnim stubovima.



Metoda nominalne krutosti za globalnu analizu

Globalni uticaji teorije drugog reda se uzimaju u proračun povećanje momenata savijanja preko uvećanih horizontalnih $F_{H,Ed}$:

$$F_{H,Ed} = F_{H,0Ed} / (1 - F_{V,Ed} / F_{V,B})$$

gde je:

$F_{H,0Ed}$ horizontalna sila po teoriji I reda (vetar, imperfekcija)

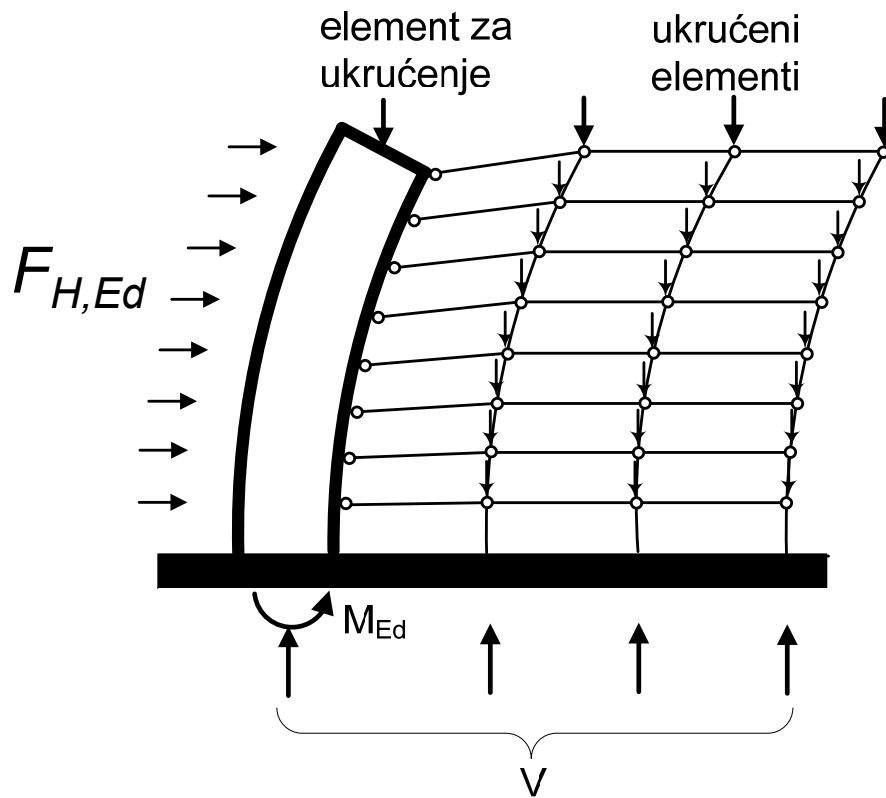
$F_{V,Ed}$ ukupna vertikalna sila na element za ukrućenje

$F_{V,B}$ nominalna globalna kritična sila, proračunata korišćenjem **nominalne krutosti** $EI, = \pi^2 EI / l_0^2$.

$$EI = K_c E_{cd} I_c + K_s E_s I_s$$

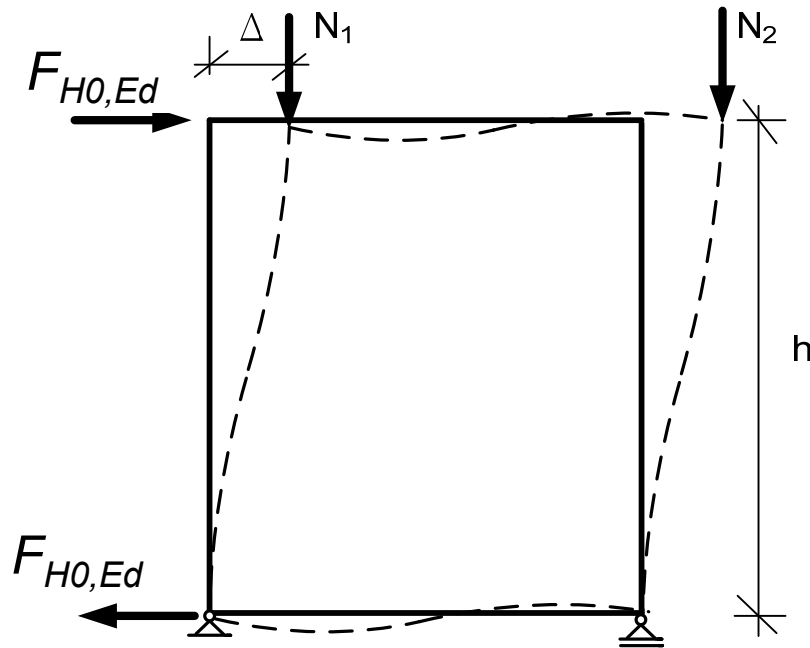
$$K_s = 1 \quad K_c = k_1 k_2 / (1 + \varphi_{ef})$$

$$k_1 = \sqrt{f_{ck} / 20} \quad k_2 = n \cdot \frac{\lambda}{170} \leq 0.20$$



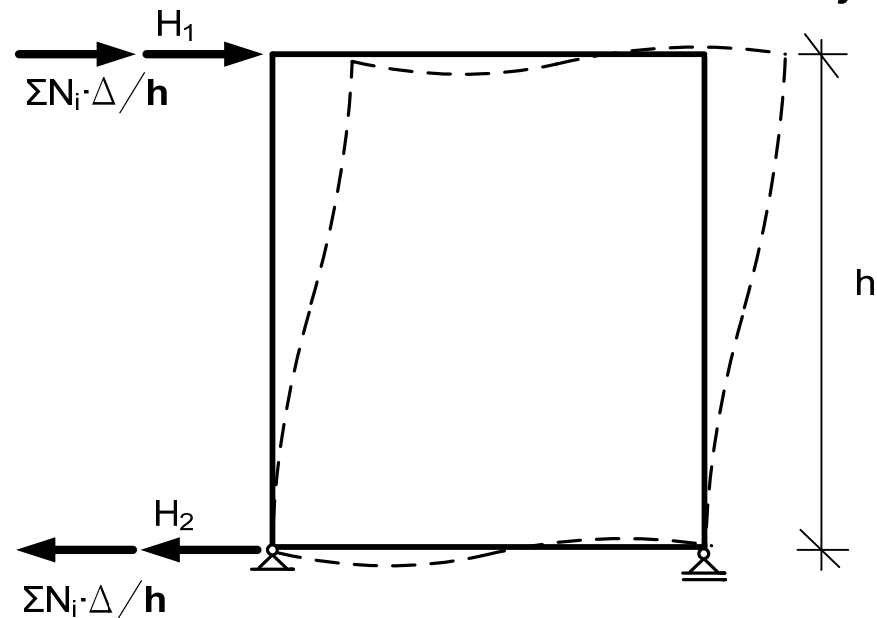
Metoda uvećanja horizontalnih sila za globalnu analizu

Pristup zasnovan na **uvećanju horizontalnih sila** se može koristiti za sve vrste konstrukcija



$F_{H0,Ed}$ - spoljašnje horizontalno opterećenje (I reda);

Δ – pomeranje od sila $F_{H0,Ed}$



$F_{H1,Ed} = \Sigma N_i \Delta$ – dodatne fiktivne horizontalne sile kojima se uvode uticaji II reda

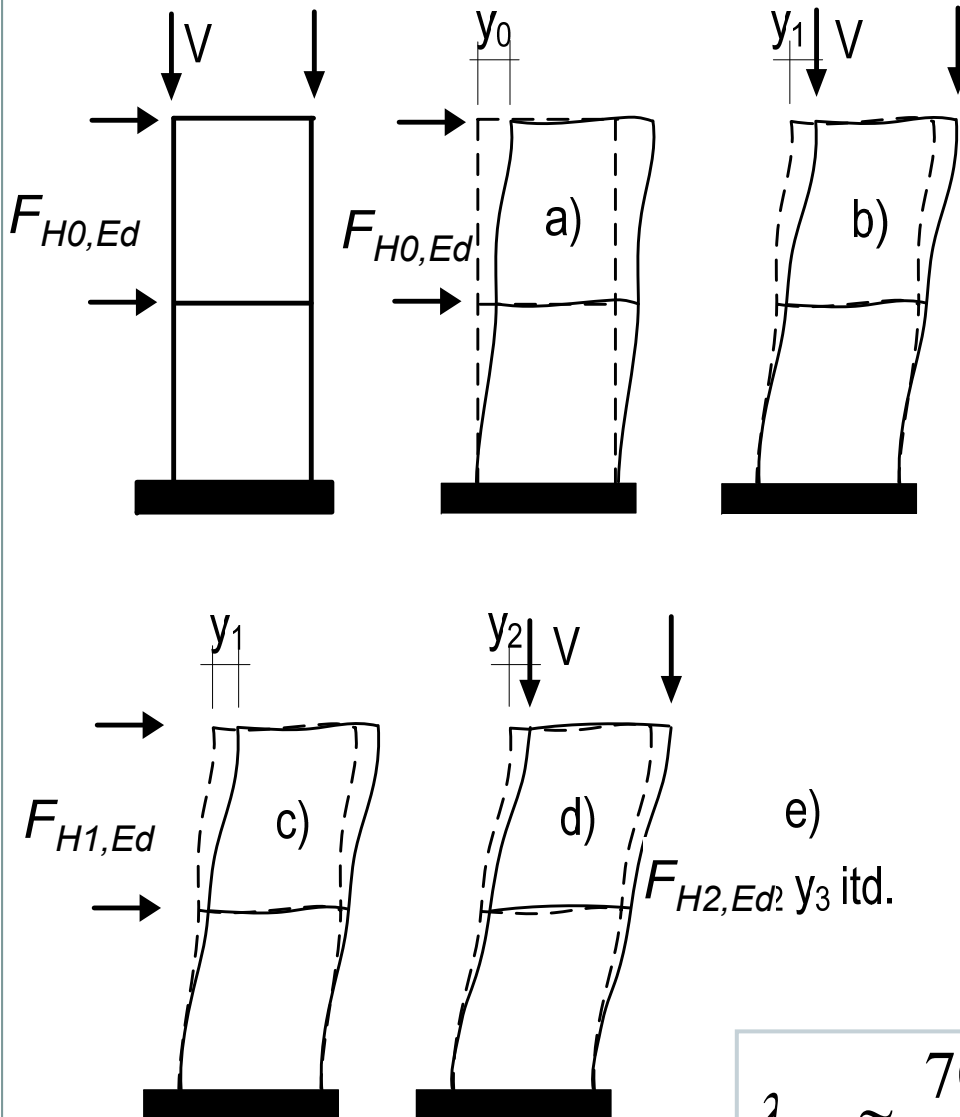
Globalni uticaji teorije drugog reda preko fiktivnih hor. sila

$$F_{H,Ed} = F_{H0,Ed} + F_{H1,Ed} + F_{H2,Ed} + \dots$$

Pomeranja su proporcionalna horizontalnim silama – **geometrijska progresija** sa odnosom $r = F_{H1,Ed} / F_{H0,Ed} < 1$ i prvom članom $a_0 = F_{H0,Ed}$

Suma progresije $(a_0 / (1-r)) \rightarrow$

$$F_{H,Ed} = F_{H,0Ed} / (1 - F_{H1,Ed} / F_{H0,Ed})$$



$$\lambda_{lim} \approx \frac{70}{\sqrt{n}}$$

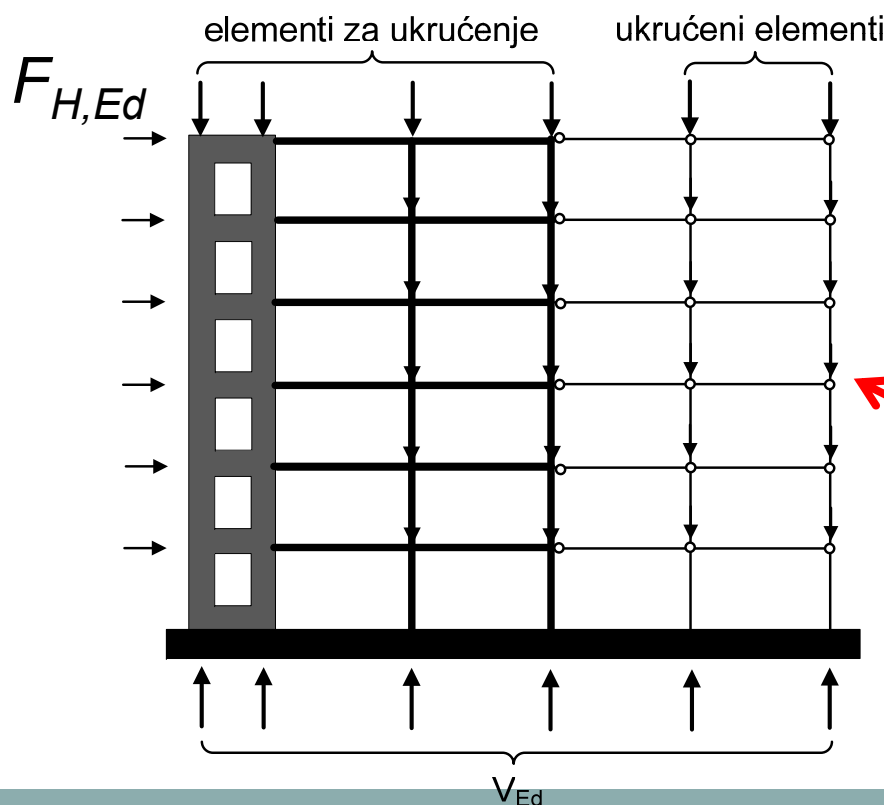
Globalni uticaji teorije drugog reda se uzimaju u proračun povećanje momenata savijanja preko uvećanih horizontalnih sila

$$F_{H,Ed} = F_{H,0Ed} / (1 - F_{H1,Ed} / F_{H0,Ed})$$

gde je:

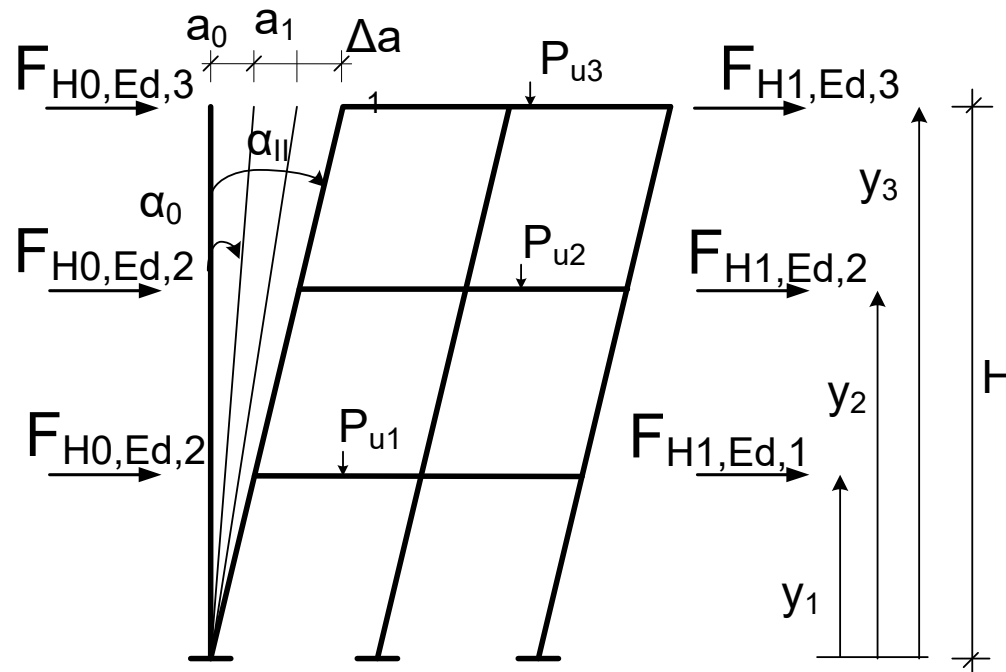
$F_{H,0Ed}$ horizontalna sila po teoriji I reda (vetar, imperfekcija)

$F_{H1,Ed}$ fiktivna horizontalna sila, koja daje iste momente kao vertikalno opterećenje na horizontalno deformisanoj konstrukciji od hor. sila I reda



Primer konstrukcije gde faktor uvećanja treba primeniti na horizontalne sile (nije prikazana deformacija, uticaji drugog reda su uključeni u fiktivne, uvećane horizontalne sile $F_{H,Ed}$).

Približna metoda proračuna EVROPSKOG KOMITETA ZA BETON pomoću modifikovanih fiktivnih sila i pretpostavljene deformacije rama



a_0 – početna imperfekcija
($\text{tg}\alpha_0 = \theta = 1/200$)

a_1 – pomeranje vrha rama od dejstva spoljašnjih graničnih sila I reda ($F_{H,0Ed}$)

Δa - pomeranje vrha rama od dejstva fiktivnih sila ($F_{H1,Ed}$)

α_{II} - ukupan nagib rama u odnosu na vertikalu

Ukupne **spratne modifikovane sile** su: $F_{H,Ed} = F_{H,0Ed} + F_{H1,Ed} = F_{H,0Ed} + \alpha_{II}P_{ui}$

gde je:

$$\alpha_{II} = \frac{\text{tg}(\alpha_0) + a_1 / H}{1 - \frac{a_1}{H} \cdot \frac{\sum_i P_{ui} \cdot y_i}{\sum_i H_{ui} \cdot y_i}}$$

U proračunu važi pretpostavka da su pomeranja vrha rama od fiktivnih sila proporcionalna pomeranjima od spoljašnjih horizontalnih sila