



HRVATSKA KOMORA INŽENJERA GRAĐEVINARSTVA

15. Dani Hrvatske komore inženjera građevinarstva Opatija, 2021.

Proračun zidova na otkazivanje izvan ravnine

Marija Demšić, Matea Sruk

Doc.dr.sc. Marija Demšić, dipl.ing.građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Matea Sruk, mag.ing.aedif., Toding d.o.o.

Otkazivanja zidova izvan ravnine

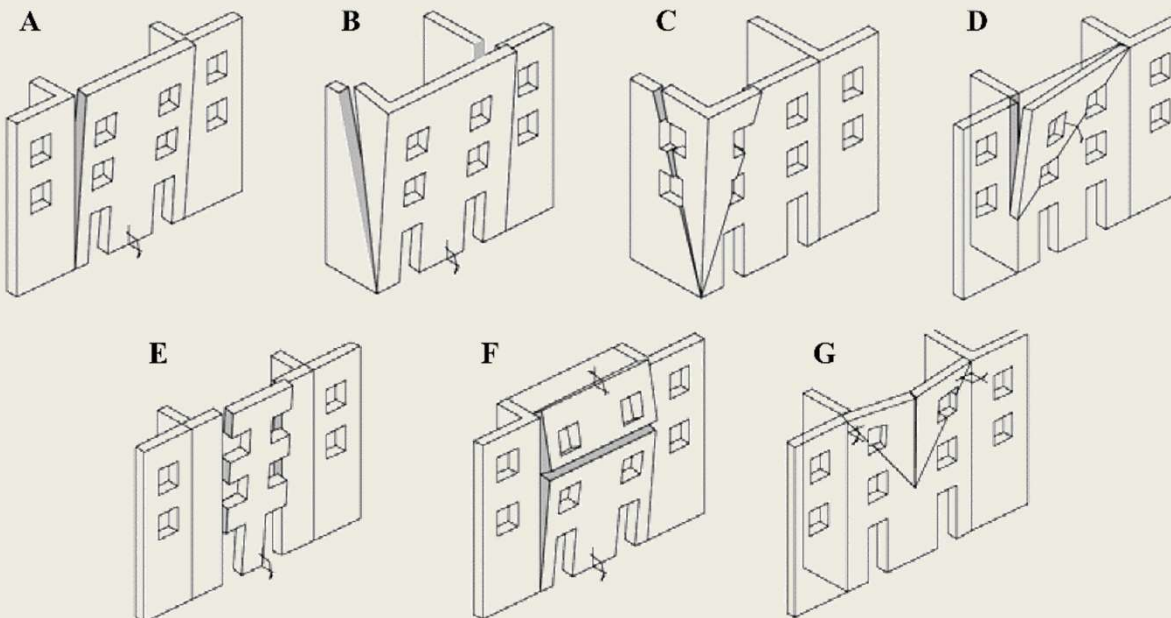
Otkazivanja zidova izvan ravnine nakon potresa u Zagrebu i Petrinji



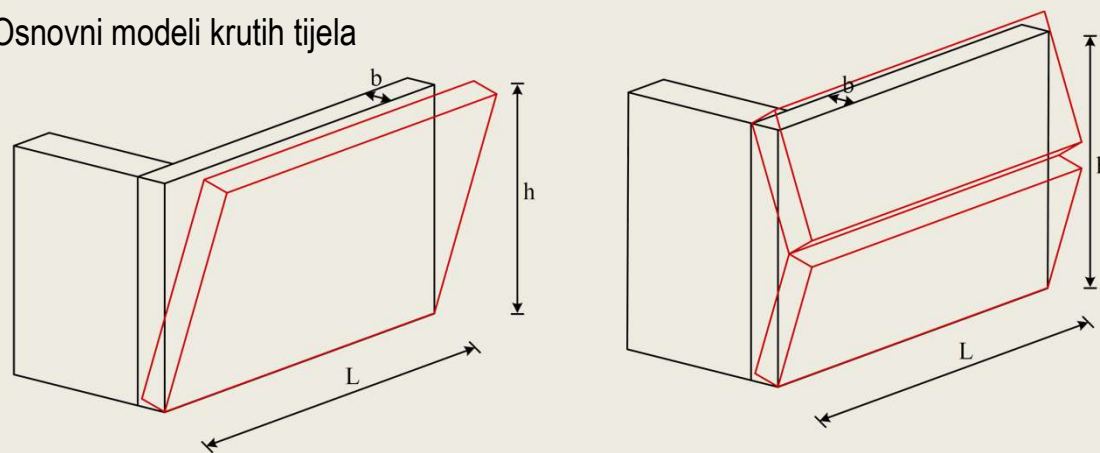
Mehanizmi otkazivanja zidova izvan ravnine

- *A priori* definirana geometrija – inženjerska procjena temeljena na iskustvu stečenom iz prijašnjih potresa, promatranju uzoraka pukotina i vezama s ostalim nosivim elementima
- Uzeti u obzir uvjete spojeva zidova s poprečnim zidovima i stropnim pločama
- Uzeti u obzir oslabljena mjesta kao npr. manja debljina zida kod parapeta
- Uzeti u obzir zastupljenost pojačanja
- Dva osnovna modela: s jednim ili dva kruta tijela

- Tipovi mehanizama (prema [D'Ayala i Speranza 2003])



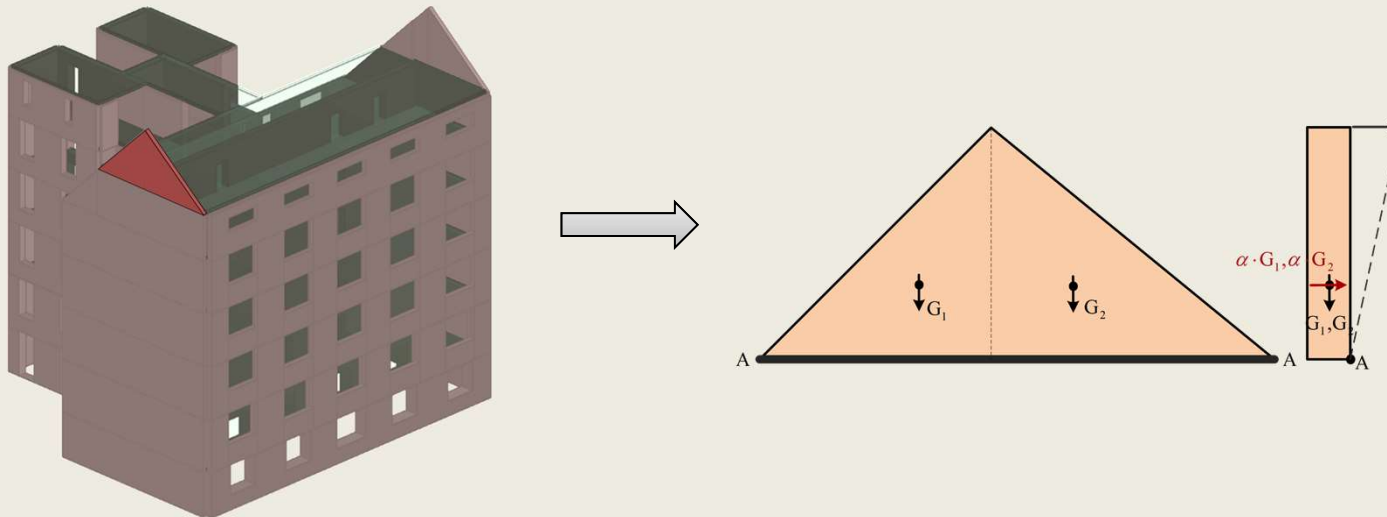
- Osnovni modeli krutih tijela



Linearni proračun – aktivacija mehanizma

Procedura proračuna prema na talijanskom tehničkom propisu NTC 2008:

- Odabrati tip mehanizma te odrediti pripadne volumene zidnih elemenata, odrediti položaje kinematičkih ograničenja (zglobova i ležajeva)



- Odrediti vrijednosti horizontalnih i vertikalnih opterećenja te položaje hvatišta sila
- Zadavanje horizontalnog ekvivalentnog statičkog opterećenja za sve vertikalne sile koje imaju inercijalni efekt
- Određivanje sheme dopustivih virtualnih pomaka za odabrani tip mehanizma

Linearni proračun – aktivacija mehanizma

- Izračun faktora aktivacije mehanizma određuje se postavljanjem jednadžbe virtualnog rada:

$$\alpha_0 \left(\sum_{i=1}^n P_i \delta_{x,i} + \sum_{j=n+1}^{n+m} P_j \delta_{x,j} \right) - \sum_{i=1}^n P_i \delta_{y,i} - \sum_{h=1}^o F_h \delta_h = L_{fi}$$

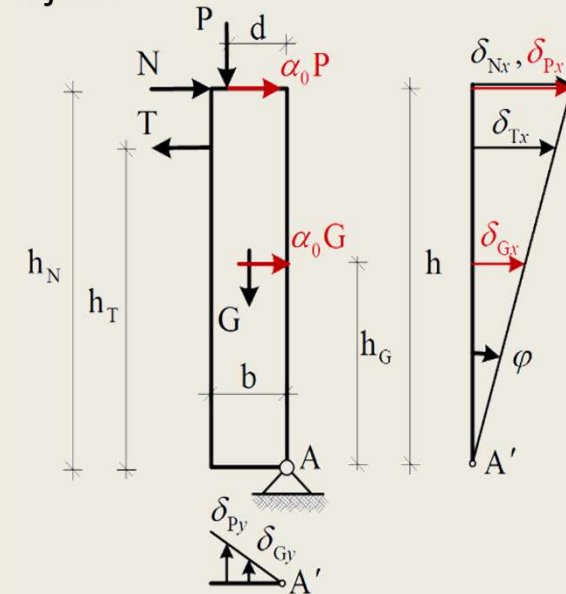
- Izračun proračunske modalne mase M^* i faktora udjela proračunske modalne mase e^* mehanizma:

$$M^* = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{Px,i} \right)^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{Px,i}^2} \quad e^* = \frac{g M^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i}$$

- Izračunati pripadno spektralno ubrzanje ekvivalentnog sustava

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 g}{e^* F_c}$$

NAPOMENA: U slučaju kad se ne uzima u obzir tlačna čvrstoća ziđa (kruti blokovi), preporuča se koristiti faktor pouzdanosti koji se odnosi na razinu znanja LC1 ($F_c=1,35$).



Linearni proračun – aktivacija mehanizma

- Provjera sigurnosti na granična stanja prema talijanskim NTC2008 propisu. Provjera sigurnosti je zadovoljena ako je spektralno ubrzanje aktiviranja mehanizma veće od vršnog ubrzanja seizmičkog zahtjeva:

SLD kriterij (*tal. Stato limite di Danno*)

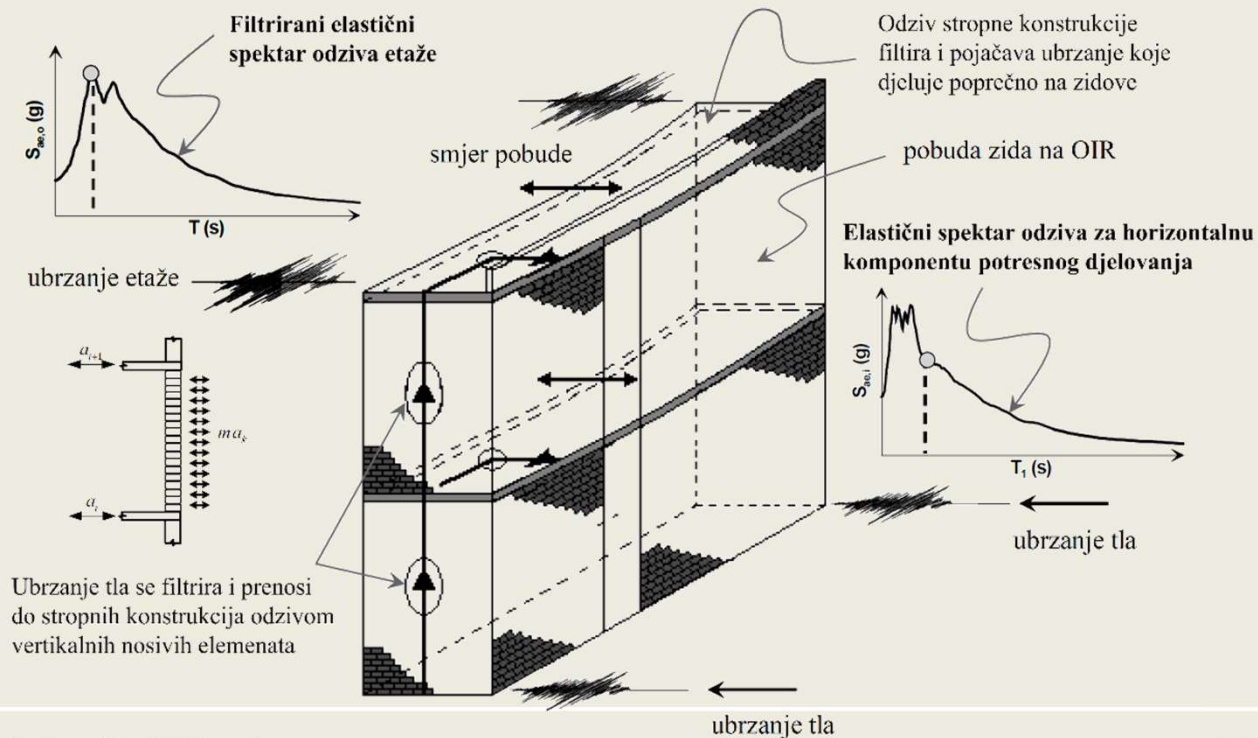
→ „granično stanje oštećenja“ – definira se za stanje privremene neuporabljivosti

$$a_{0.min}^* = \max(a_g \cdot S; S_e(T_1)\psi(z)\Gamma_1)$$

SLV kriterij (*tal. Stato limite di salvaguardia della*

vita) → „granično stanje zaštite života“ – predstavlja granično stanje nosivosti

$$a_{0.min}^* = \max(a_g \cdot S / q; S_e(T_1)\psi(z)\Gamma_1 / q)$$



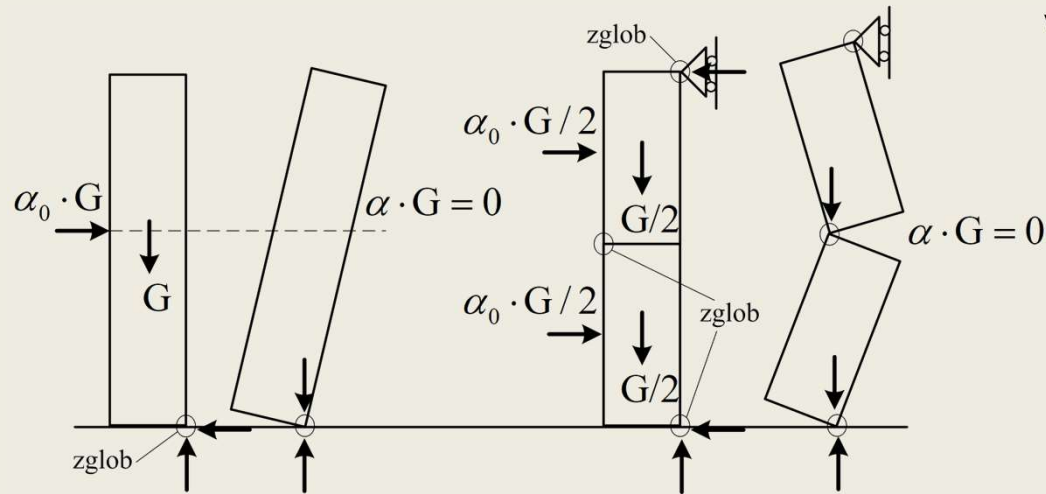
NAPOMENA: q NIJE faktor ponašanja za globalni gubitak nosivosti i stabilnosti konstrukcije!

q je koeficijent koji se odnosi samo na promatrani element i uzima u obzir sve mehanizme koji u pozitivnom smislu doprinose stabilnosti elementa (smisao mu je analogan globalnom faktoru ponašanja ali na lokalnoj razini elementa).

Preporučena vrijednost za zidove od ziđa prema NTC2008 je 2.

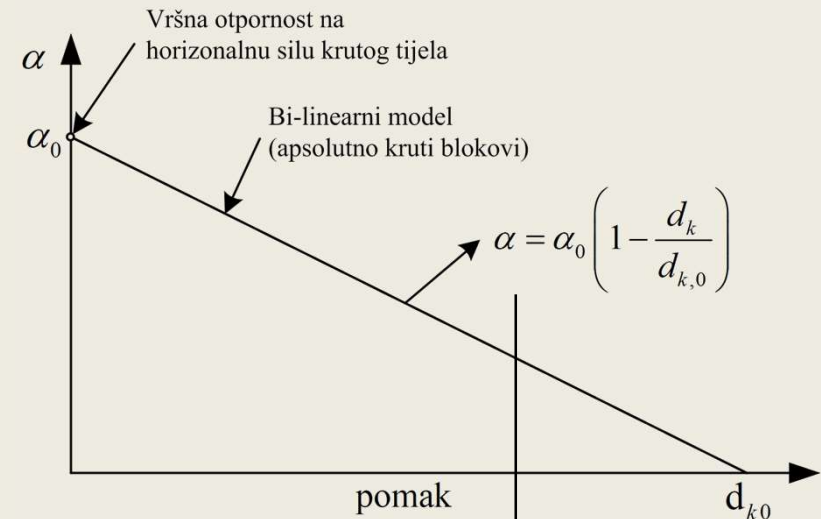
Nelinearni proračun – kapacitet pomaka

- Mehanizam se postavlja u pomaknuti položaj i analizira gibanje



Vršna vrijednost pomaka kontrolne točke:

$$d_{k0} \rightarrow \alpha = 0$$



- Spektralni pomak i spektralno ubrzanje ekvivalentnoga linearnoelastičnog sustava:

$$d^* = d_k \frac{\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{Px,i}^2}{\delta_{x,k} \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{Px,i}}$$

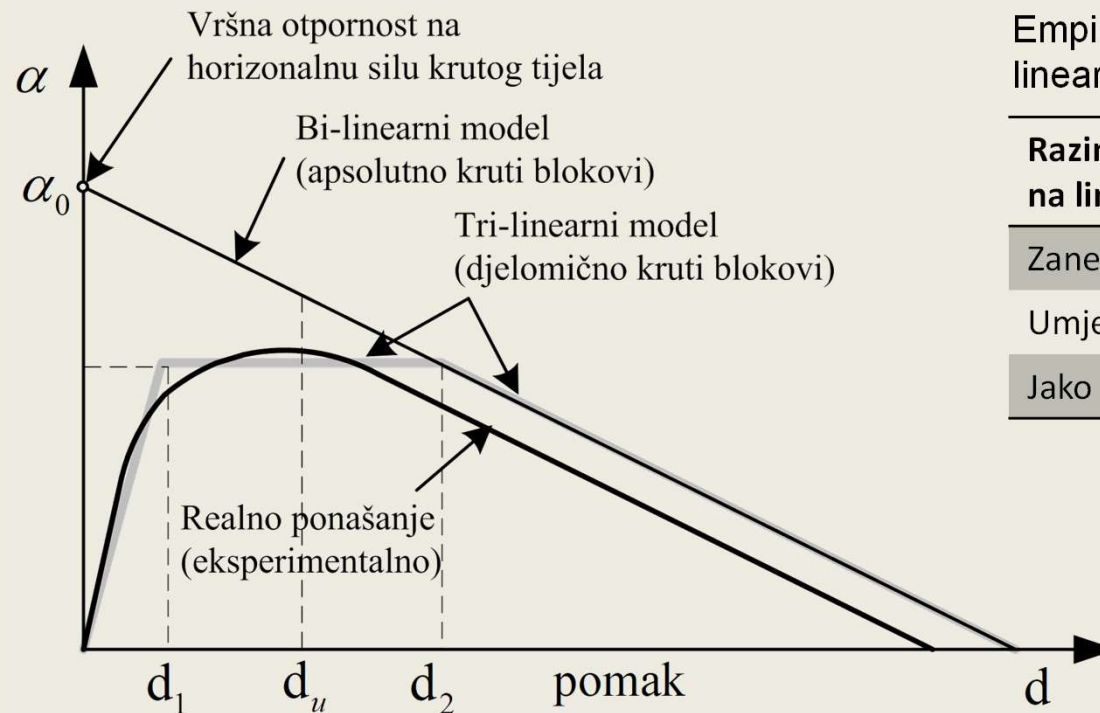
$$a^* = a_0^* \left(1 - \frac{d^*}{d_0^*} \right)$$

Vrijedi uz uvjet da djelovanja ostaju uglavnom konstantna, u suprotnom nužna je inkrementalna analiza



Nelinearni proračun – kapacitet pomaka

- Provjera sigurnosti u nelinearnoj analizi moguća je za granično stanje SLV. Pri tome se za vrijednost kapaciteta spektralnog pomaka d_u^* odabire niža vrijednost od navedenih kriterija :
 - 40 % pomaka kod kojega se vrijednost spektralnog ubrzanja poništava
 - Pomak koji odgovara situacijama koje su lokalno nespojive sa stabilnošću građevinskih elemenata, u slučajevima u kojima se to može procijeniti



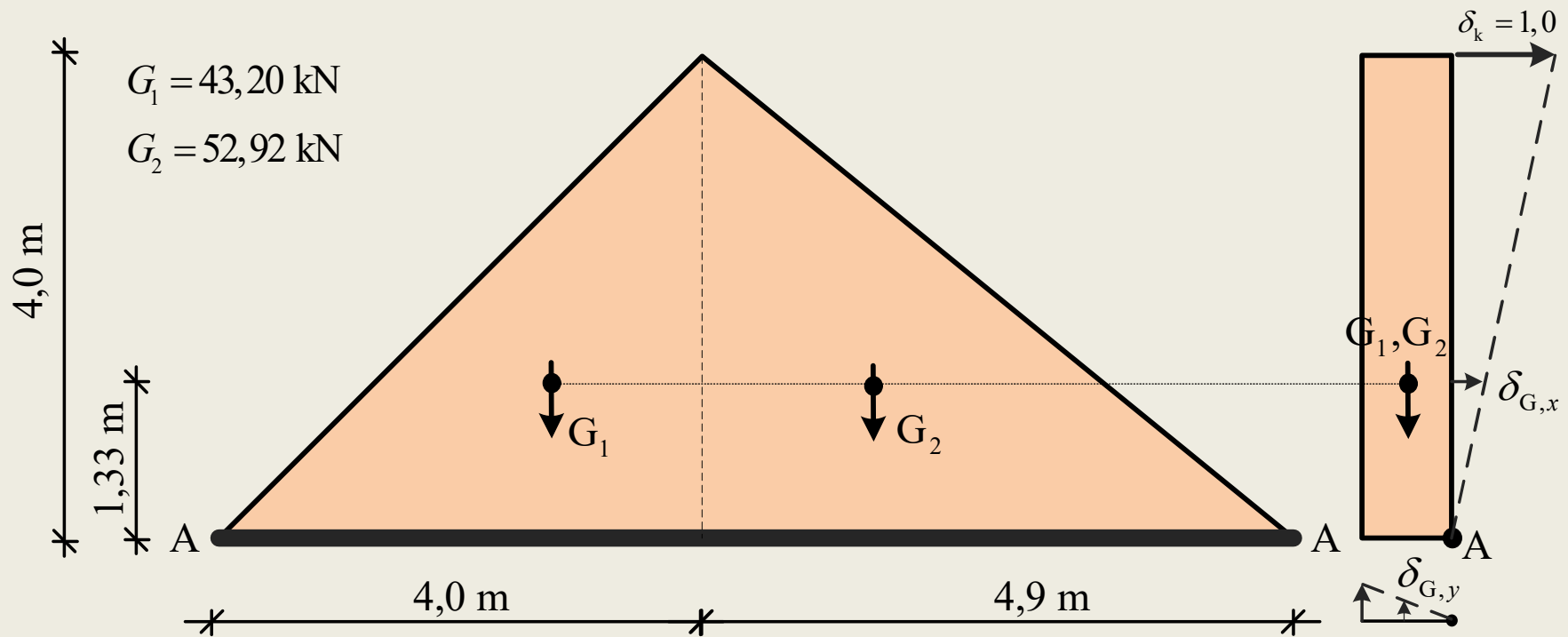
Empirijski određene vrijednosti pomaka za tri-linearni model [Doherty, 2000]:

Razina degradacije morta na linijskom zglobu	d_1/d_0	d_2/d_0
Zanemarivo	6%	28%
Umjerenno	13%	40%
Jako	20%	50%



Linearni proračun – aktivacija mehanizma

Primjer – lastavica tavanskog zida



Virtualni pomaci: $\varphi = \frac{\delta_k}{h} = \frac{1}{4} \rightarrow \delta_{G,x} = 1,33 \cdot \varphi = 0,333$
 $\delta_{G,y} = 0,15 \cdot \varphi = 0,037$

Koeficijent aktivacije mehanizma: $\alpha_0 = \frac{G_1 \cdot \delta_{G1,y} + G_2 \cdot \delta_{G2,y}}{G_1 \cdot \delta_{G1,x} + G_2 \cdot \delta_{G2,x}} = \frac{3,60}{32,04} = 0,112$

Linearni proračun – aktivacija mehanizma

Primjer – lastavica zabatnog zida

Proračunska modalna masa $M^* = \frac{(G_1 \cdot \delta_{G1,x} + G_2 \cdot \delta_{G2,x})^2}{9.81 \cdot (G_1 \cdot \delta_{G1,x}^2 + G_2 \cdot \delta_{G2,x}^2)} = \frac{1026,56}{104,77} = 9,79 \text{ t}$

Faktor udjela proračunske modalne mase: $e^* = \frac{M^* \cdot g}{G_1 + G_2} = \frac{9,81 \cdot 9,79}{96,12} = 1$

Spektralno ubzanje evivalentnog sustava: $a_0^* = \frac{\alpha_0 \cdot g}{e^* \cdot F_c} = \frac{1,104}{1,35} = 0,82 \text{ m/s}^2$

Zahtjev – SLV kriterij: $a_0^* \geq a_{0,\min}^* = \max\left(\frac{a_g \cdot S}{q}; \frac{S_e(T_1)\psi(z)\Gamma_1}{q}\right)$

$T_p = 475 \text{ g.}, a_{gR} = 0,25g : a_{0,\min}^* = \max(1,41 \text{ m/s}^2; 4,88 \text{ m/s}^2) = 4,88 \text{ m/s}^2 \rightarrow \frac{a_0^*}{a_{0,\min}^*} = 0,17$

$T_p = 225 \text{ g.}, a_{gR} = 0,18g : a_{0,\min}^* = \max(1,02 \text{ m/s}^2; 3,51 \text{ m/s}^2) = 3,51 \text{ m/s}^2 \rightarrow \frac{a_0^*}{a_{0,\min}^*} = 0,23$

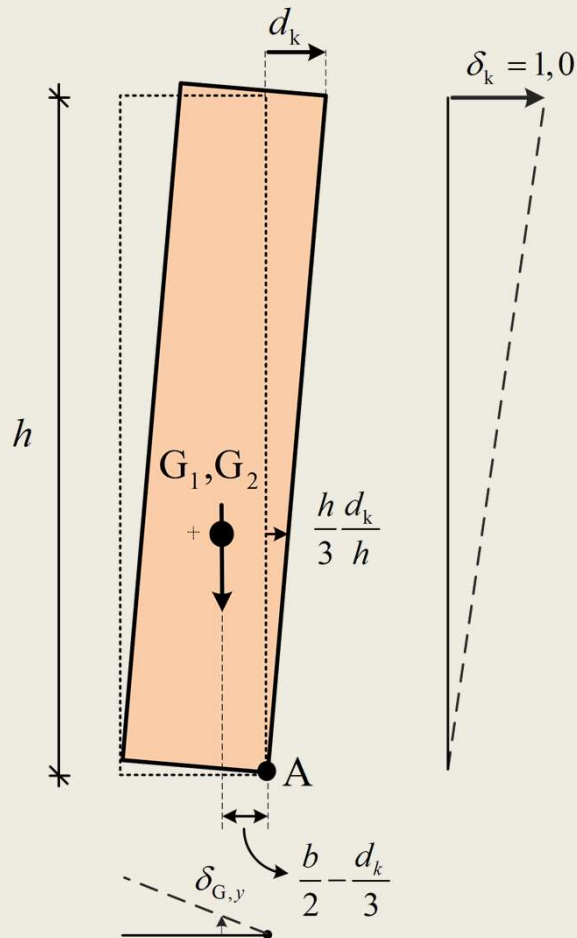
$T_p = 95 \text{ g.}, a_{gR} = 0,13g : a_{0,\min}^* = \max(0,73 \text{ m/s}^2; 2,54 \text{ m/s}^2) = 2,54 \text{ m/s}^2 \rightarrow \frac{a_0^*}{a_{0,\min}^*} = 0,32$



Nelinearni proračun – kapacitet pomaka

Primjer – lastavica tavanaskog zida

Pomaknuti položaj:



Virtualni pomaci: $\varphi = \frac{\delta_k}{h} = \frac{1}{4} \rightarrow$

$$\delta_{G,y} = \left(0,15 - \frac{d_k}{3}\right) \cdot \varphi = 0,0375 - 0,0833d_k$$

Vršna vrijednost pomaka kontrolne točke: $d_{k0} \rightarrow \alpha = 0$

$$G_1 \cdot \delta_{G1,y} + G_2 \cdot \delta_{G2,y} = (43,20 + 52,92) \cdot (0,0375 - 0,0833 \cdot d_k) = 0$$

$$\rightarrow d_{k0} = \frac{3,6045}{8,0068} = 0,45 \text{ m}$$

Spektralni pomak ekvivalentnog sustava:

$$d_0^* = d_{k0} \cdot \frac{G_1 \cdot \delta_{G1,x}^2 + G_2 \cdot \delta_{G2,x}^2}{\delta_{k,x} \cdot (G_1 \cdot \delta_{G1,x} + G_2 \cdot \delta_{G2,x})}$$

$$= 0,45 \cdot \frac{(43,20 + 52,92) \cdot 0,333^2}{1,0 \cdot (43,20 + 52,92) \cdot 0,333} = 0,15 \text{ m}$$

Nelinearni proračun – kapacitet pomaka

Primjer – lastavica tavanskog zida

Krajnja vrijednost kapaciteta spektralnog pomaka: $d_u^* = 0,4 \cdot d_0^* = 0,06 \text{ m}$

Vrijednost sekantnog perioda:
$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{d_s^*}{a_s^*}} = 2\pi \sqrt{\frac{0,024}{0,689}} = 1,17 \text{ s}$$

$$d_s^* = 0,4 \cdot d_u^* = 0,024 \text{ m} \quad a_s^* = a_0^* \left(1 - \frac{d_s^*}{d_0^*}\right) = 0,82 \left(1 - \frac{0,024}{0,15}\right) = 0,689 \text{ m/s}^2$$

Zahtjev – SLD kriterij: $d_u^* \geq d_{u,\min}^* = \max \left(S_{De}(T_s); S_{De}(T_1) \cdot \psi(z) \cdot \Gamma_1 \cdot \frac{\left(\frac{T_s}{T_1}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \frac{T_s}{T_1}\right)^2 + 0,02 \frac{T_s}{T_1}}} \right)$

$$T_p = 475 \text{ g.}, a_{gR} = 0,25g : d_{u,\min}^* = \max(0,126 \text{ m}; 0,227 \text{ m}) = 0,227 \text{ m} \rightarrow \frac{d_u^*}{d_{u,\min}^*} = 0,26$$

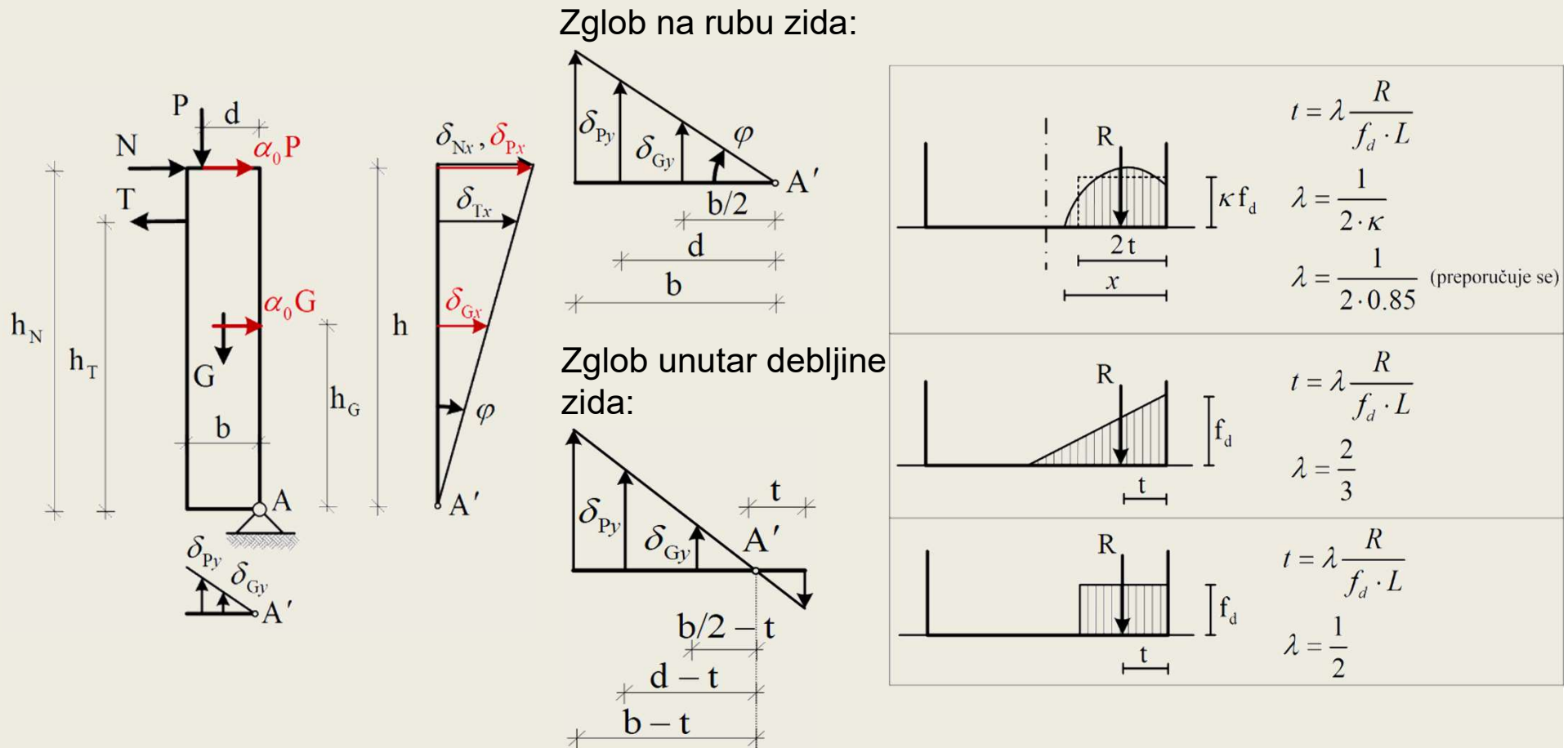
$$T_p = 225 \text{ g.}, a_{gR} = 0,18g : d_{u,\min}^* = \max(0,091 \text{ m}; 0,164 \text{ m}) = 0,164 \text{ m} \rightarrow \frac{d_u^*}{d_{u,\min}^*} = 0,37$$

$$T_p = 95 \text{ g.}, a_{gR} = 0,13g : d_{u,\min}^* = \max(0,065 \text{ m}; 0,118 \text{ m}) = 0,118 \text{ m} \rightarrow \frac{d_u^*}{d_{u,\min}^*} = 0,51$$



Položaj linijskog zgloba

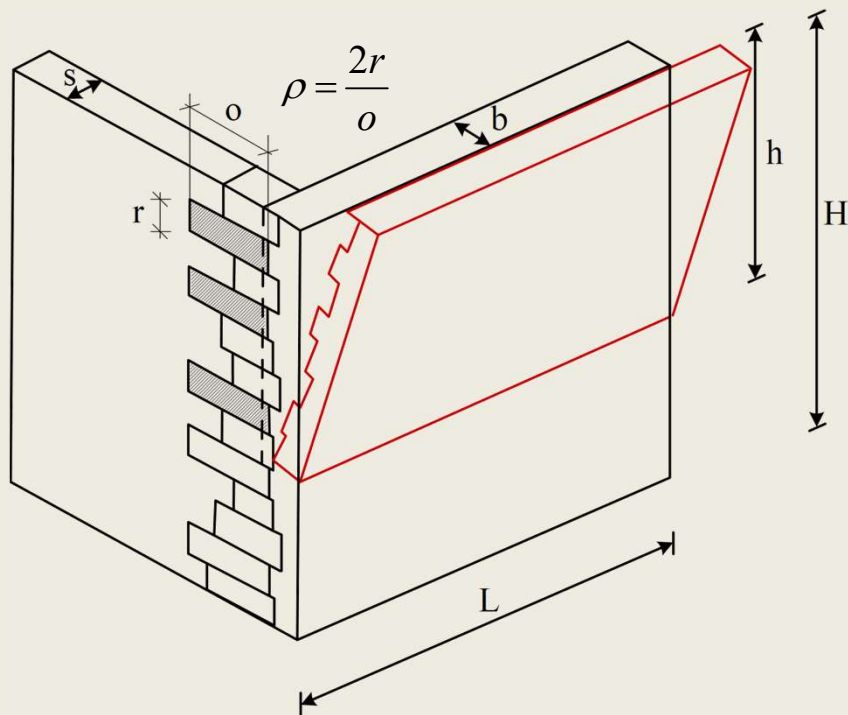
- Ovisi o tlačnoj čvrstoći zida
- Pretpostavka beskonačne krutosti – linijski zglob na rubu zida
- Drobljenje na rubu – centar rotacije (linijski zglob) unutar debljine zida



Utjecaji ostalih parametara u proračunu

Sila trenja

- Na spoju s poprečnim (nosivim) zidovima
- Sila trenja promjenjiva je po visini zida
- Utječe na visinski položaj formiranja linijskog zgloba
- Vrijednost sile trenja nije više konstantna nakon što se mehanizam aktivira



$$F_T = -\gamma s \frac{o}{2} \mu (r + 2r + \dots + h) \approx -\gamma s \frac{o}{2} \mu \frac{h^2}{2r}$$

$$F_T = -\frac{1}{2} \gamma \frac{s h^2}{\rho} \mu$$

- Hvatište sile trenja na 1/3 visine h (mjereno od linijskog zgloba)



Utjecaji ostalih parametara u proračunu

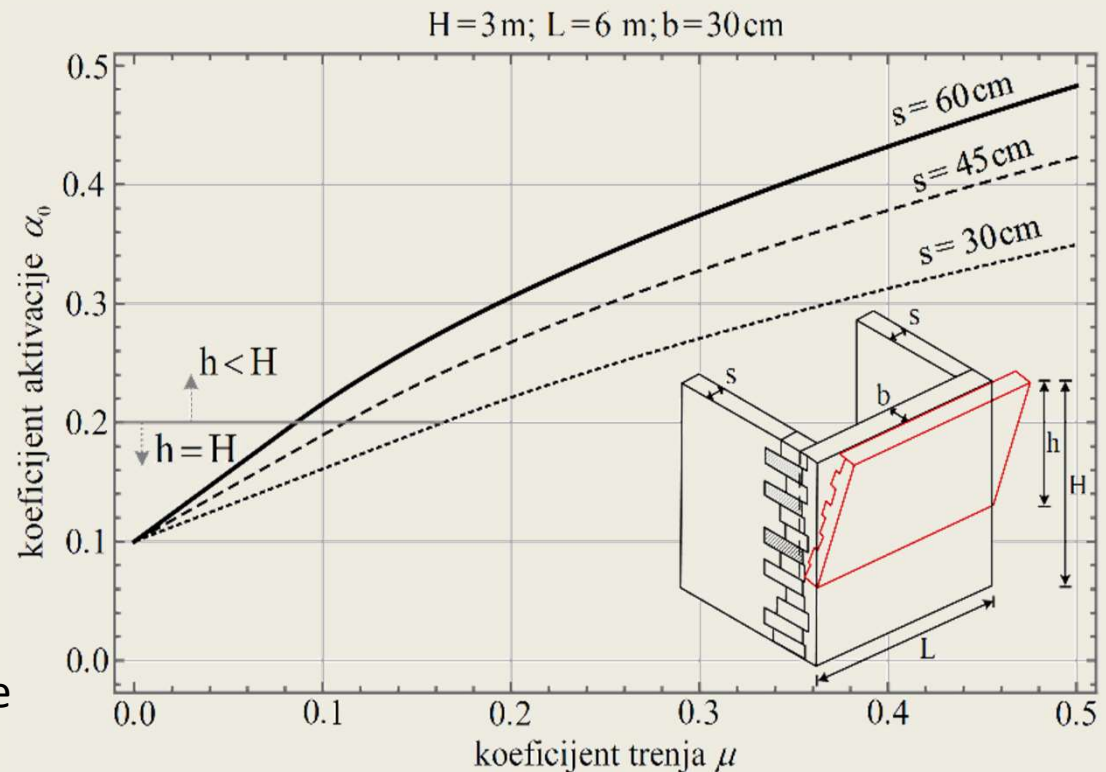
Sila trenja - položaj linijskog zgloba (s obzirom da visinu zida)

- Vrijednost faktora aktivacije za zid bez otvora i dodatnog vertikalnog opterećenja:

$$\alpha_0 = \frac{(\gamma b h L) \frac{b}{2} + \left(\frac{1}{2} \gamma \frac{s h^2}{\rho} \mu \right) \frac{h}{3}}{(\gamma b h L) \frac{h}{2}}$$

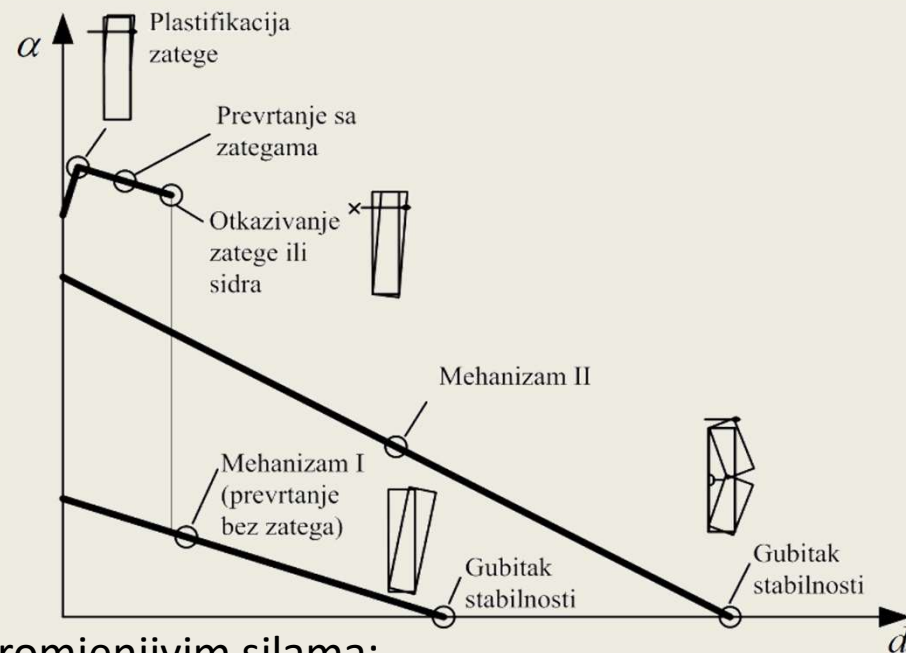
- Visina h na kojoj dolazi do formiranja linijskog zgloba uvjetovana je minimalnom vrijednosti faktora aktivacije. Iz uvjeta ekstrema moguće je odrediti vrijednost minimalne visine h , a za vrijednost α_0 definiranu gornjim izrazom to je:

$$\frac{d\alpha_0}{dh} = 0 \rightarrow h = \sqrt{\frac{3L\rho b^2}{s\mu}}$$



Zaključak

- Identifikacija mehanizma – lekcije naučene iz prijašnjih potresa
- Nužna provjera više oblika otkazivanja – mjerodavan je kritični oblik otkazivanja s najmanjom vrijednosti aktivacijskog ubrzanja odnosno s najmanjim kapacitetom pomaka
- Linearni proračun – jednostavan i praktičan za primjenu, može se koristiti i za određivanje vrijednosti sila za pojačanja (npr. sile u zategama)
- Kod nelinearnog proračuna voditi računa o promjenjivim silama:
 - sila u zatezi – povećanjem pomaka povećava se sila ali treba voditi i računa o mogućem popuštanju zatege kod određenih vrijednosti pomaka)
 - Sila trenja nije konstantna – linearna promjena faktora aktivacije nije u tom slučaju valjana, kako se gubi kontakt na višim dijelovima trenje se mijenja pošto se gubi kontaktna površina ali i sila pritiska na površine koje su i dalje u kontaktu je manja
- Iduća generacija norme Eurocode 1998-3 zahtjevat će verifikaciju otkazivanja elemenata izvan ravnine



Hvala na pažnji!

