

BETONSKE KONSTRUKCIJE 3

Programski zadatak

Modeliranje konstrukcije

Listopad 2018.

SADRŽAJ

1	Uvod.....	2
2	Proračun konstrukcije.....	8
2.1	Osnovne postavke.....	8
2.2	Zadavanje elemenata.....	18
2.2.1	Zadavanje zida plošnim elementima	18
2.2.2	Zadavanje zida štapnim elementima	25
2.3	Model konstrukcije.....	30
2.3.1	Određivanje centra krutosti.....	31
2.4	Opterećenja.....	43
2.4.1	Stalno i uporabno opterećenje.....	43
2.4.2	Imperfekcije sustava.....	60
2.5	Modalna i spektralna analiza	70
2.5.1	Općenito.....	70
2.5.2	Zadavanje masa i modifikacija krutosti	71
2.5.3	Određivanje krutosti tla.....	76
2.5.4	Modalna analiza	82
2.5.5	Potresno djelovanje.....	89
2.5.6	Određivanje faktora ponašanja.....	96
2.6	Slučajni ekscentricitet.....	101
2.7	Kombinacije opterećenja	104
3	Literatura	108

1 Uvod

Prikazan je statički proračun i dimenzioniranje armiranobetonske zgrade s 5 etaža i podrumom prema HRN EN 1992-1-1 [1] i HRN EN 1998-1 [2]. Na slikama 1 do 5 prikazani su idejni nacrti zgrade.

Ukupna visina zgrade iznosi 16,0 m, s maksimalnim tlocrtnim dimenzijama 25,0 × 22,5 m. Zgrada je nepravilna po visini, što utječe na proračun prema EN 1998-1 [2]. Debljine ploča iznose 20 cm, osim temeljne ploče debljine 40 cm.

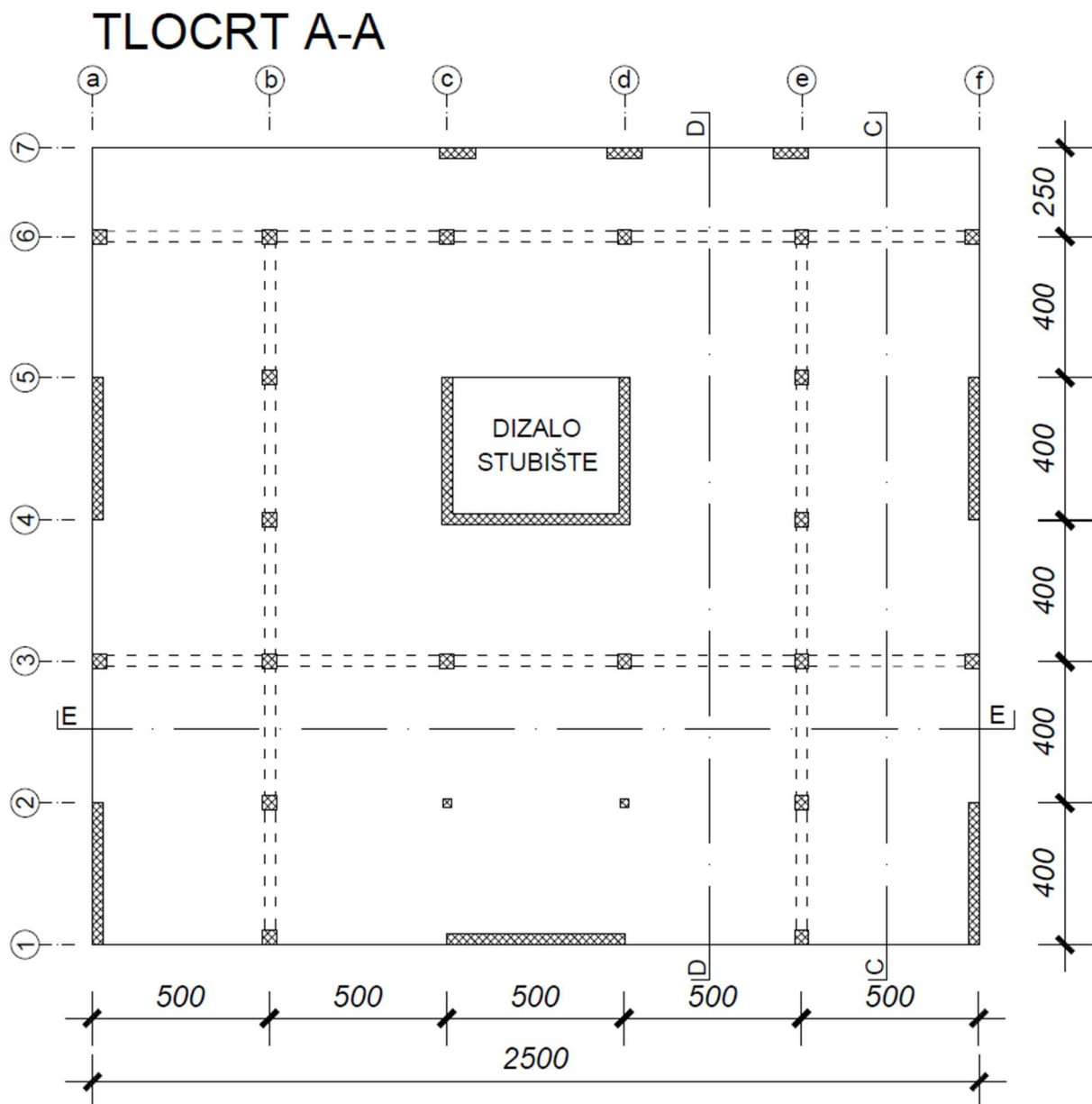
Konstruktivni sustav sastoji se od armiranobetonske jezgre, 5 zidova, zidnog (visokostjenog) nosača i 4 okvira. Armiranobetonska jezgra je tlocrtnih dimenzija 4,0 × 5,0 m. Zidovi su debljine 30 cm. Stupovi su kvadratnog poprečnog presjeka dimenzija 40 × 40 cm te 25 × 25 cm.

Svi armiranobetonski elementi su razreda C30/37, a odabrana armatura je B500B.

Za analizu opterećenja primijenjena su opterećenja vezana za odabranu lokaciju prema Hrvatskim Nacionalnim dodacima [3], [4] (karta snijega i seizmička karta Hrvatske). Konstrukcija je smještena u Zagrebu na lokaciji Građevinskog fakulteta.

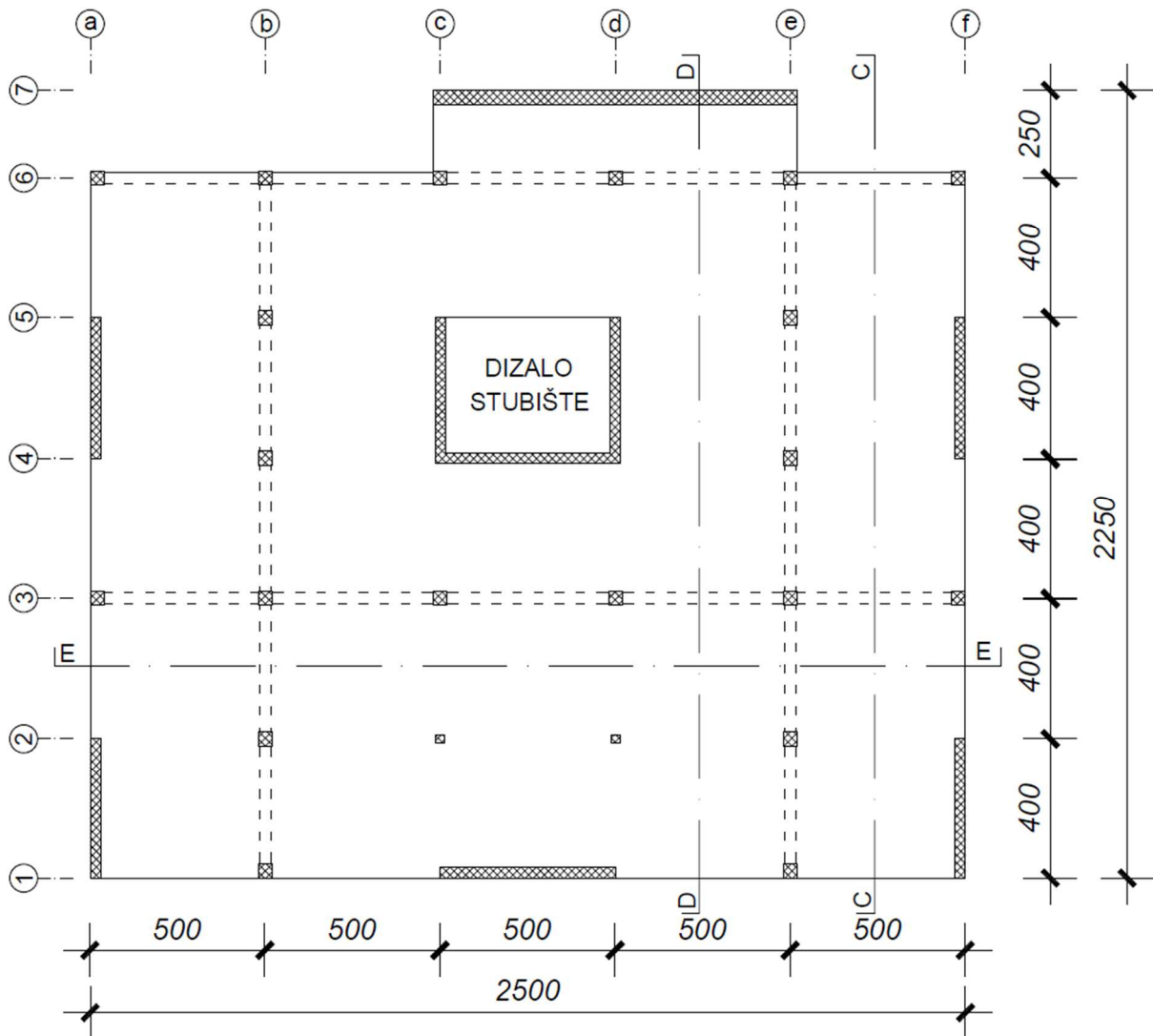
Modeliranje i statički proračun konstrukcije provodi se u programu SCIA engineer. Detaljno je prikazano i objašnjeno zadavanje elemenata, konstruiranje modela, zadavanje opterećenja, te provođenje višemodalnamodalne spektralne analize, uz sve naglašene posebnosti.

Nakon dobivenih vrijednosti unutarnjih sila iz programa SCIA engineer prikazano je dimenzioniranje jednog armiranobetonskog zida te okvira koji su prema EN 1998-1 [2] svrstani u DCM razred duktilnosti (razred srednje duktilnosti koji definira posebne odredbe dimenzioniranja i oblikovanja da pri seizmičkom djelovanju omoguće konstrukciji neelastično ponašanje bez pojave krhkih slomova).



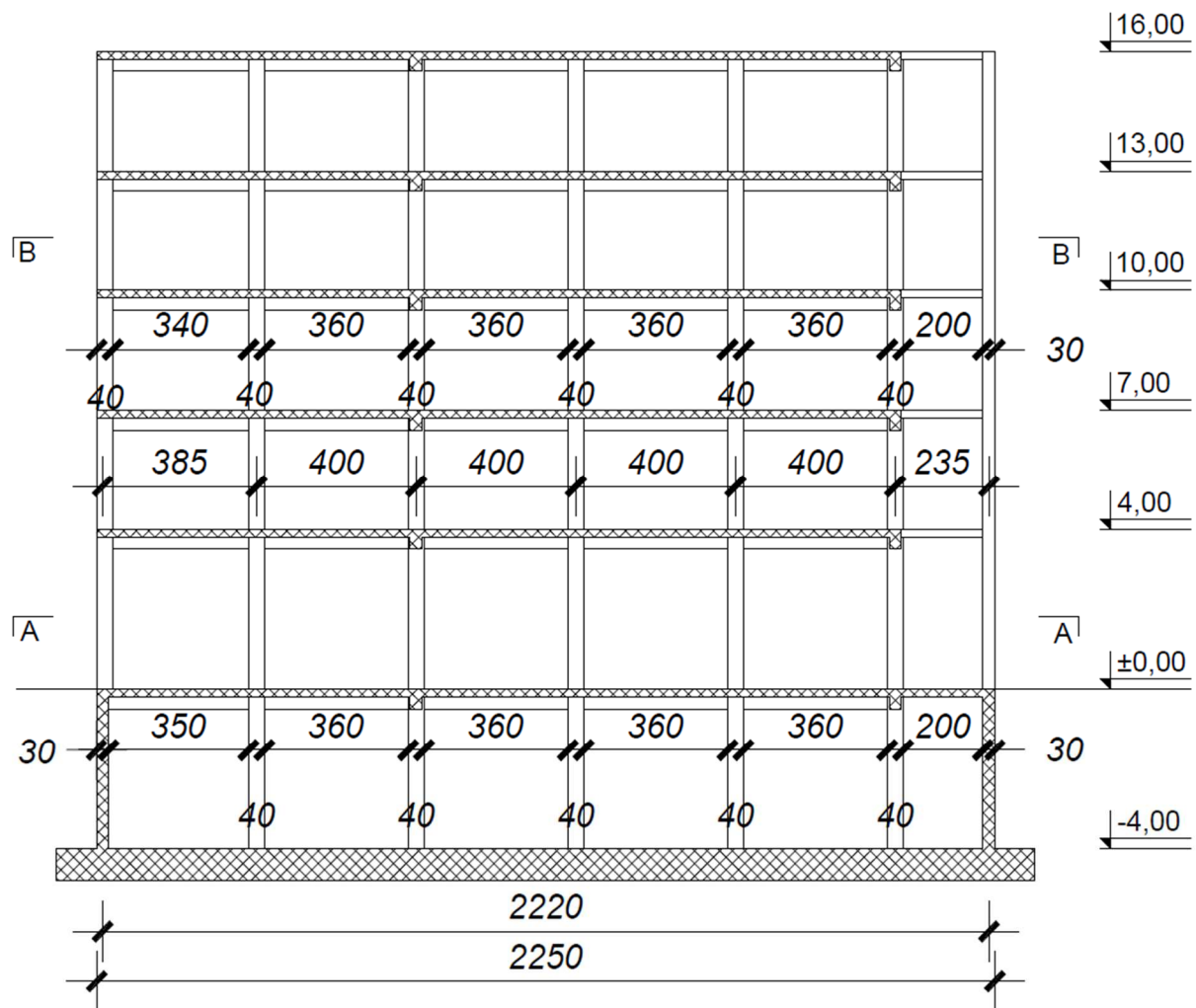
Slika 1. Tlocrt prizemlja

TLOCRT B-B



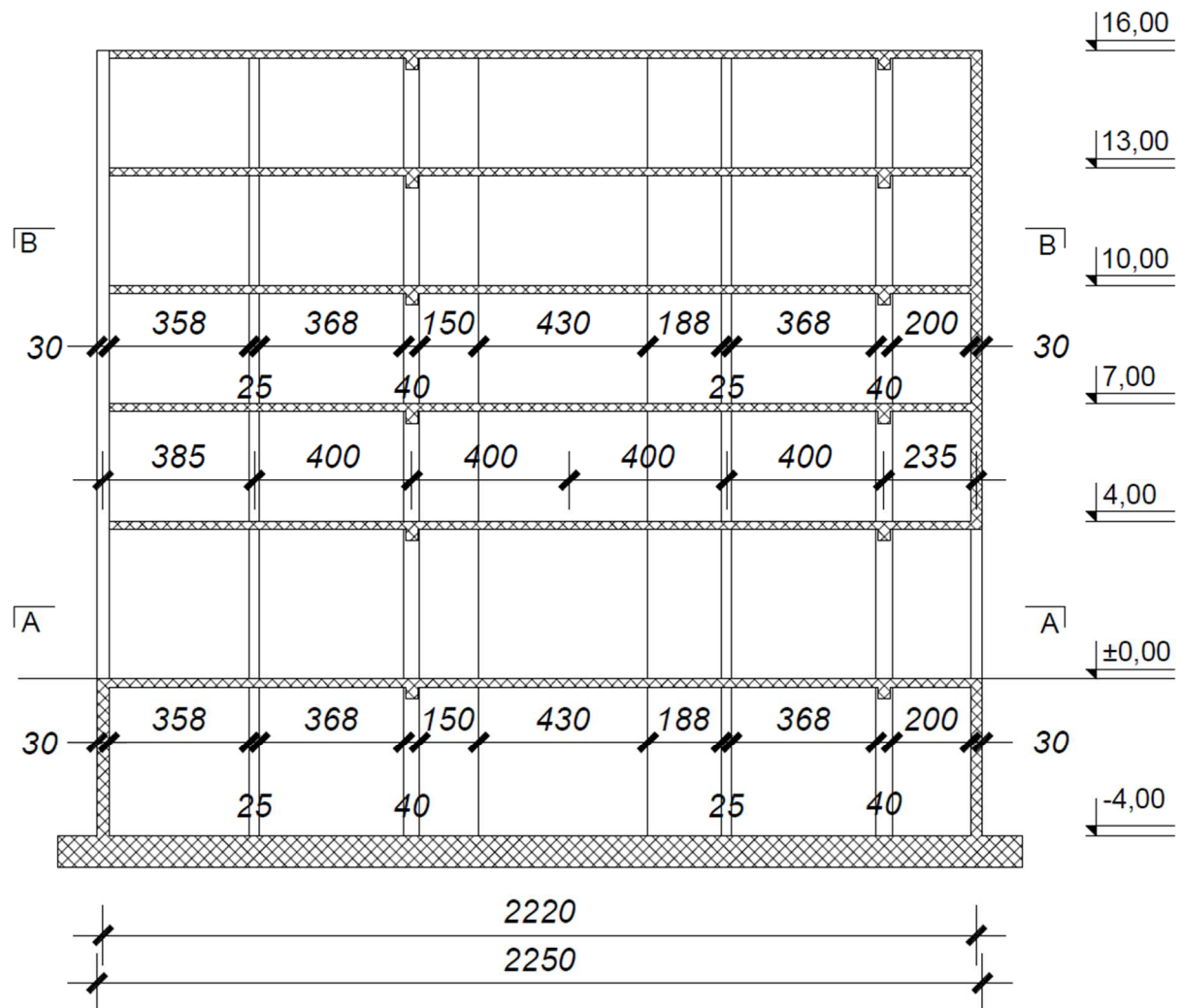
Slika 2. Tlocrt karakterističnog kata

PRESJEK C-C



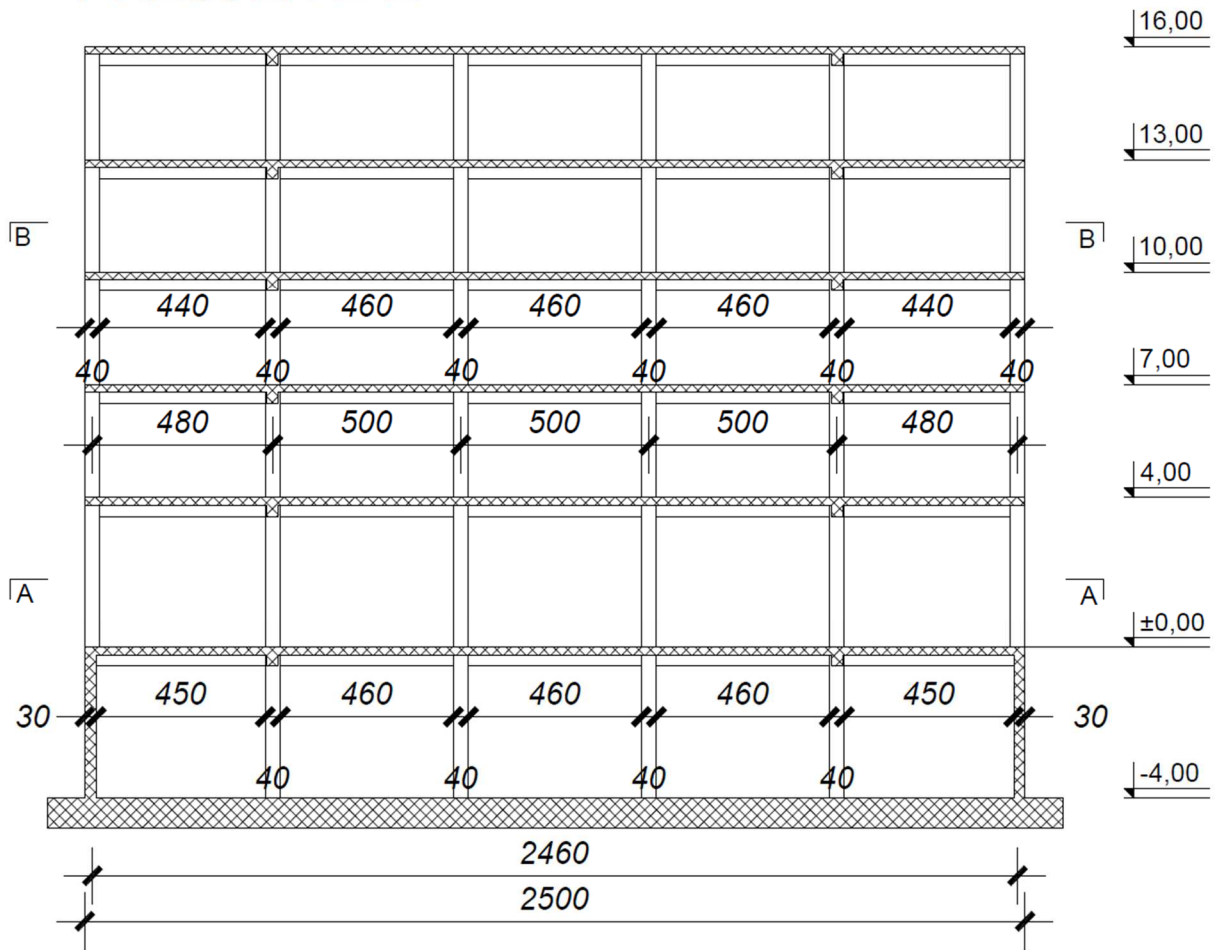
Slika 3. Presjek C-C

PRESJEK D-D



Slika 4. Presjek D-D

PRESJEK E-E



Slika 5. Presjek E-E

2 Proračun konstrukcije

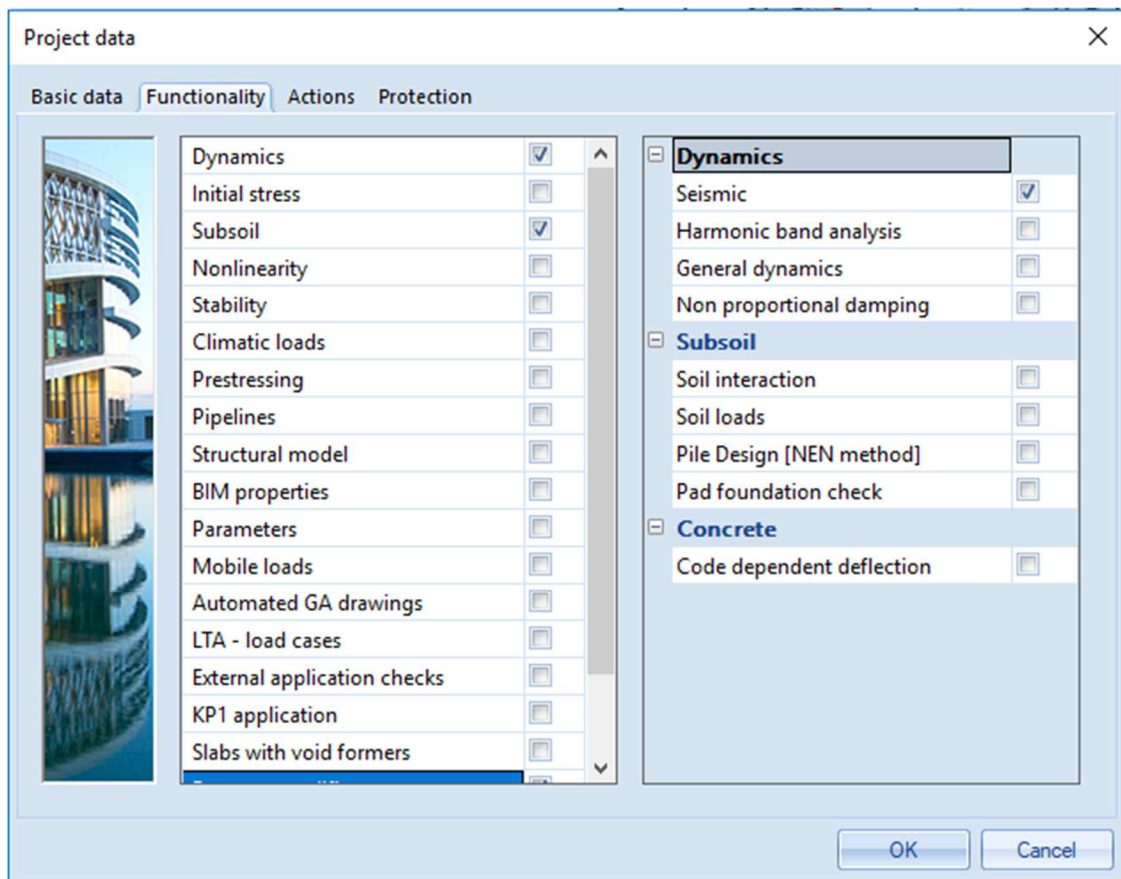
2.1 Osnovne postavke

U ovom je poglavlju prikazan statički i seizmički proračun prikazane konstrukcije sa svim potrebnim koracima proveden u programu SCIA engineer. Prilikom otvaranja novog dokumenta u programu SCIA engineer prikaže se izbornik na slici 6.

Material	
Concrete	<input checked="" type="checkbox"/>
Material	C25/30
Reinforcement ...	B 500C
Steel	<input type="checkbox"/>
Timber	<input type="checkbox"/>
Masonry	<input type="checkbox"/>
Other	<input type="checkbox"/>
Aluminium	<input type="checkbox"/>

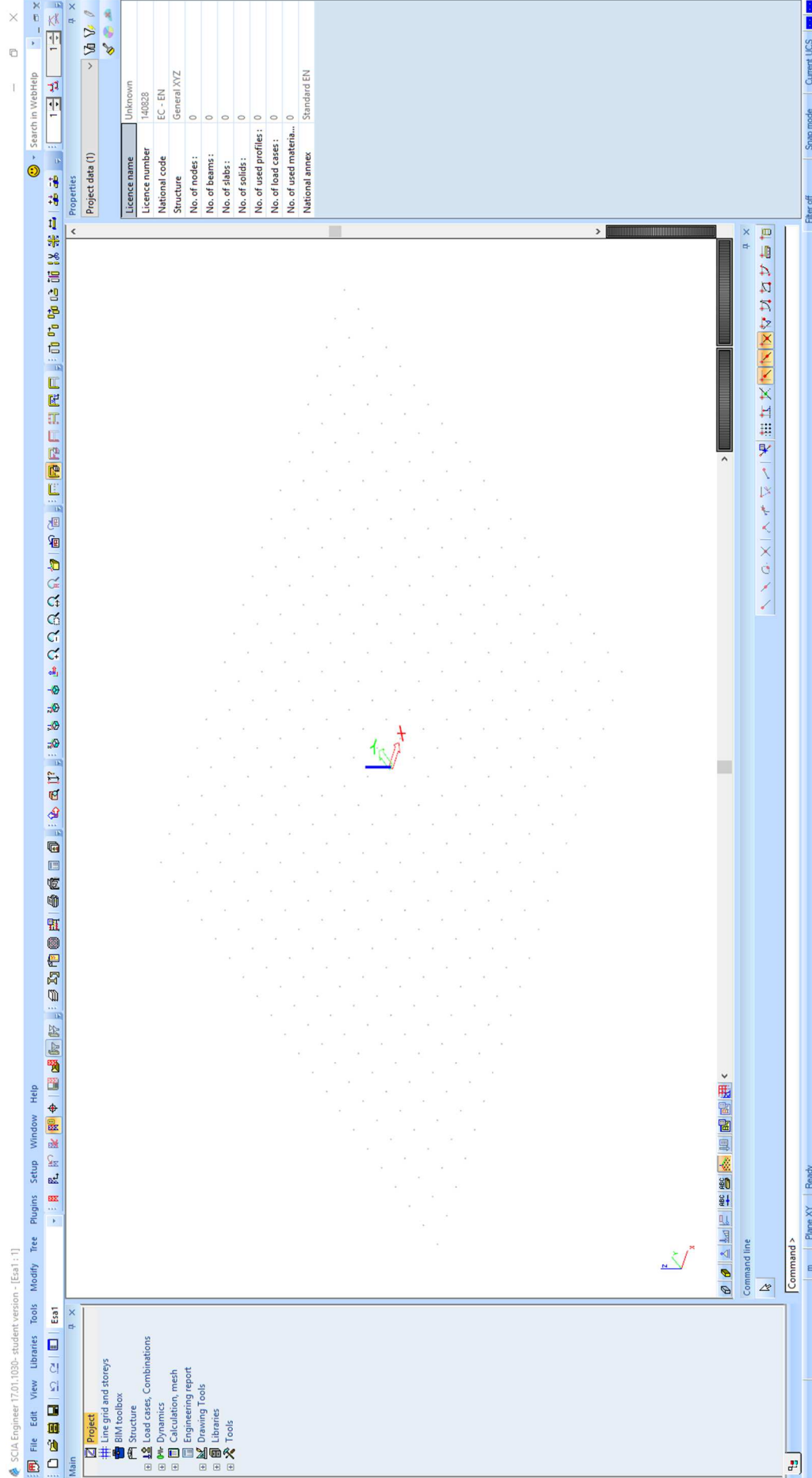
Slika 6. Početni izbornik

U prikazanom izborniku potrebno je aktivirati vrstu materijala. Odabire se beton („Concrete“) te se odabire odgovarajući razred betona i tip čelika. Za bilo koji pojedini element moguće je odabrati različiti razred betona, ali će program uvijek predložiti ovdje odabrani razred. Ostale opcije nisu bitne. U gornjem lijevom kutu potrebno je označiti karticu „Functionality“ koja je prikazana na slici 7. Kako se ovdje provodi i proračun potresnih djelovanja potrebno je označiti opciju „Dynamics“ nakon čega se s desne strane otvori podizbornik istog naziva u kojem je potrebno označiti opciju „Seismic“. Također treba odabrati opciju „Property modifiers“ kojom je moguće utjecati na krutost pojedinog elementa. Nakon što su odabrane sve opcije pritiskom na „OK“ zatvara se izbornik i otvara radna ploha. Na slici 8 prikazana je radna ploha.

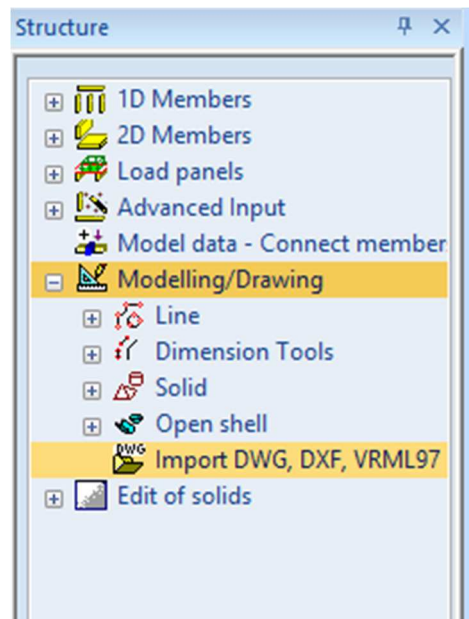


Slika 7. Podizbornik „functionality“

Postoji više načina za crtanje modela. Jedan od njih je umetanje podloge iz .dwg dokumenta. U izborniku „Main“ koji se nalazi s lijeve strane na slici 8 odabere se opcija „Structure“, zatim opcija „Modelling/drawing“ pa „Import DWG, DXF, VRML97“ kao što je prikazano na slici 9.

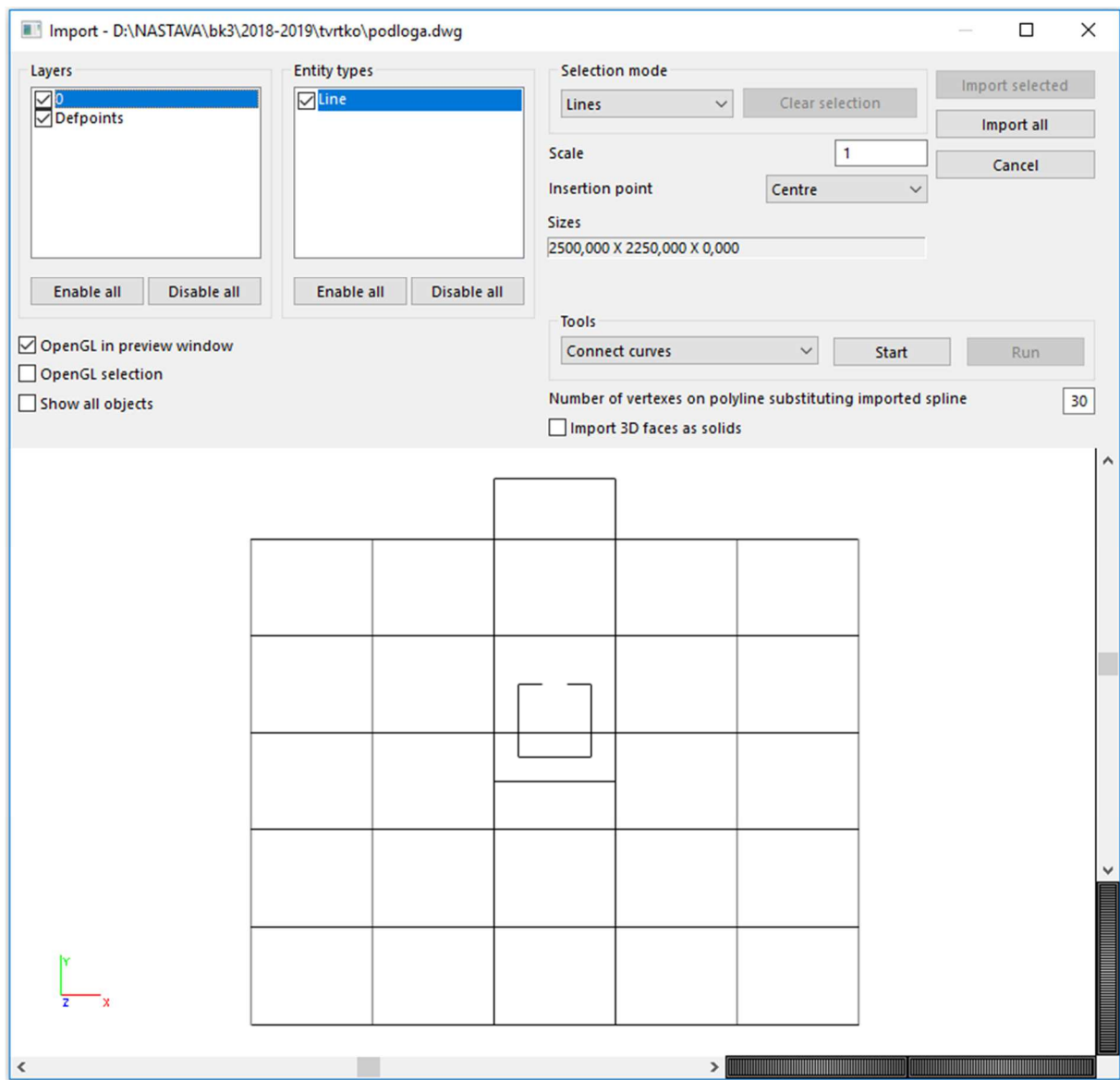


Slika 8. Radna ploha



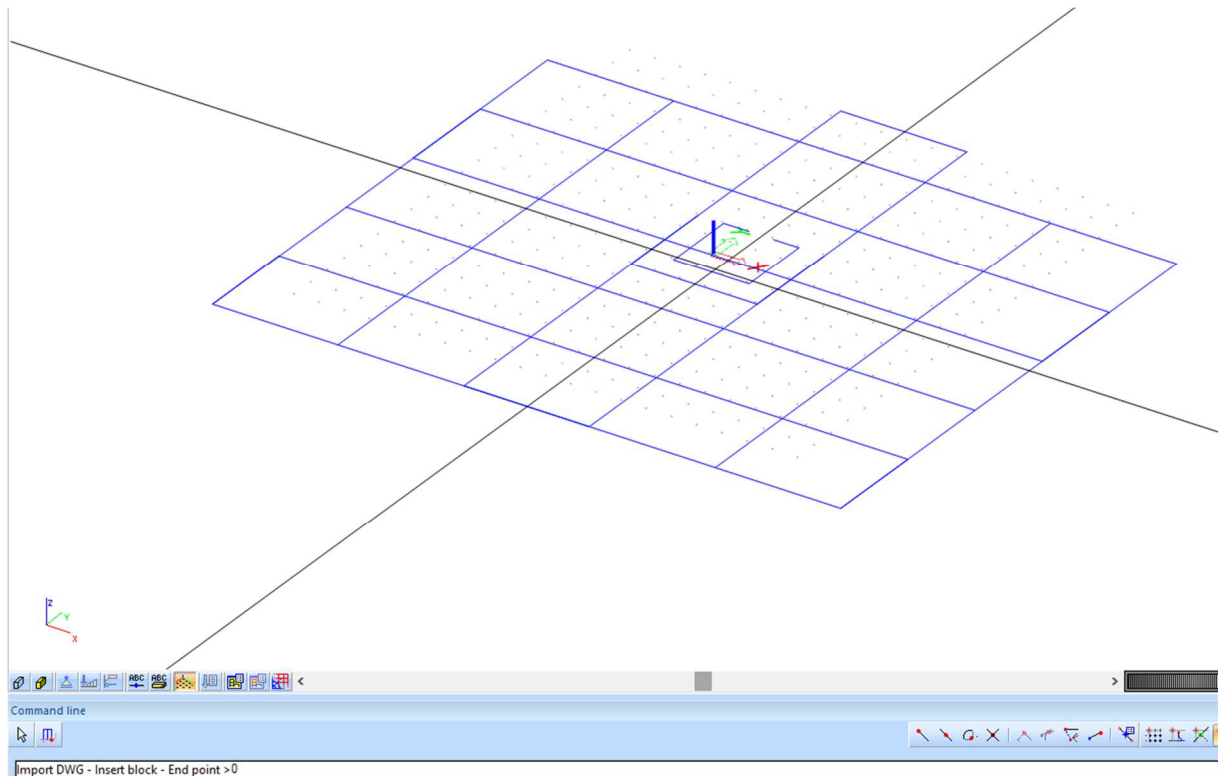
Slika 9. Izbornik structure

Pritiskom na opciju „Import DWG, DXF, VRML97“ potrebno je pronaći .dwg dokument koji služi kao podloga za crtanje. Nakon toga se otvori izbornik prikazan na slici 10 u kojem se nalaze, s lijeva na desno, layeri, vrste objekta (linije, kote...) i podaci o mjestu unosa i uvećanju/umanjenju (scale). Ispod se nalazi kućica „sizes“ u kojoj piše kolika će biti dimenzija crteža u SCIA-i u metrima. U skladu s tim potrebno je korigirati opciju „scale“, u ovom slučaju na vrijednost 0,01 jer je crtež u AutoCADu crtan u cm (1 AJ = 1 cm). Zatim se u donjem prozoru označe linije bitne za crtanje i odabere opcija „Import selected“ koja se nalazi gore desno u izborniku. Nakon toga se otvori izbornik u kojem se određuje naziv podloge koji za proračun nije bitan.



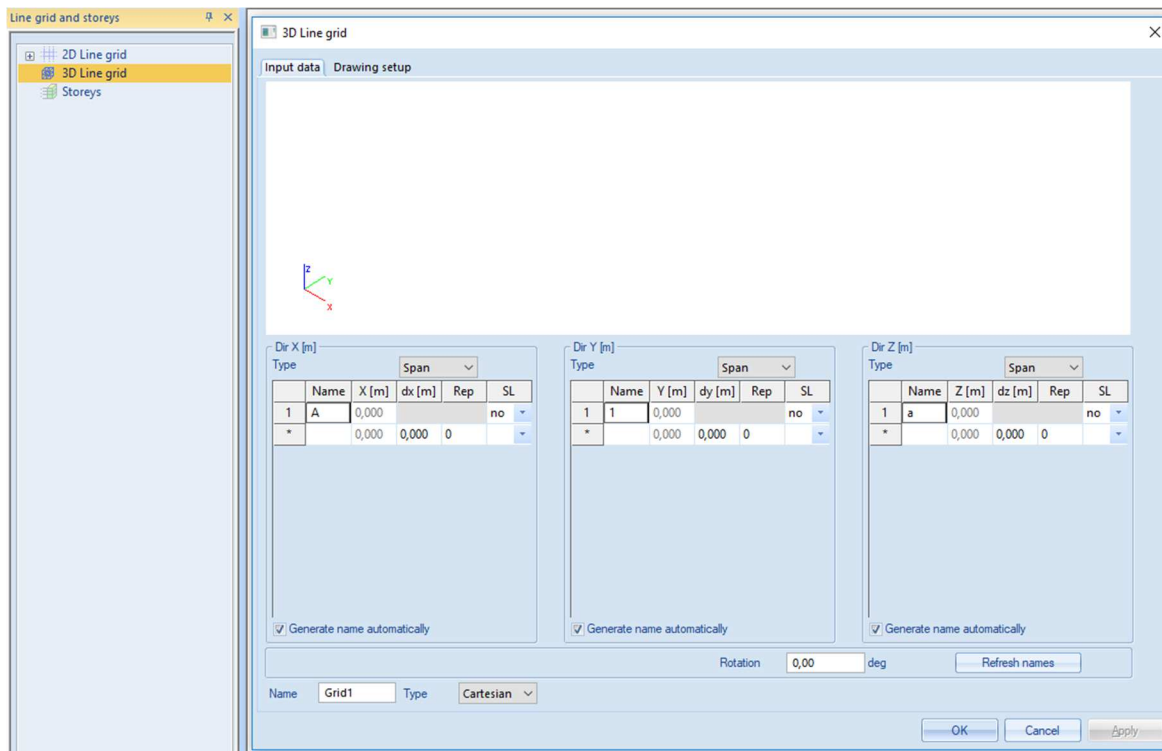
Slika 10. Izbornik za unos podloge

Na slici 11 prikazan je unos podloge u program. Pri dnu ekrana, u komandnoj liniji piše: „Import DWG – Insert block – End point > “ čime program zahtijeva upisivanje točke u kojoj se unosi podloga. Unosom broja 0 podloga se postavlja u ishodište koordinatnog sustava, tj. točka definirana kao „Insertion point“ sa slike 10 unosi se u ishodište. Prikazani način ne koristi se pri izradi ovog modela.

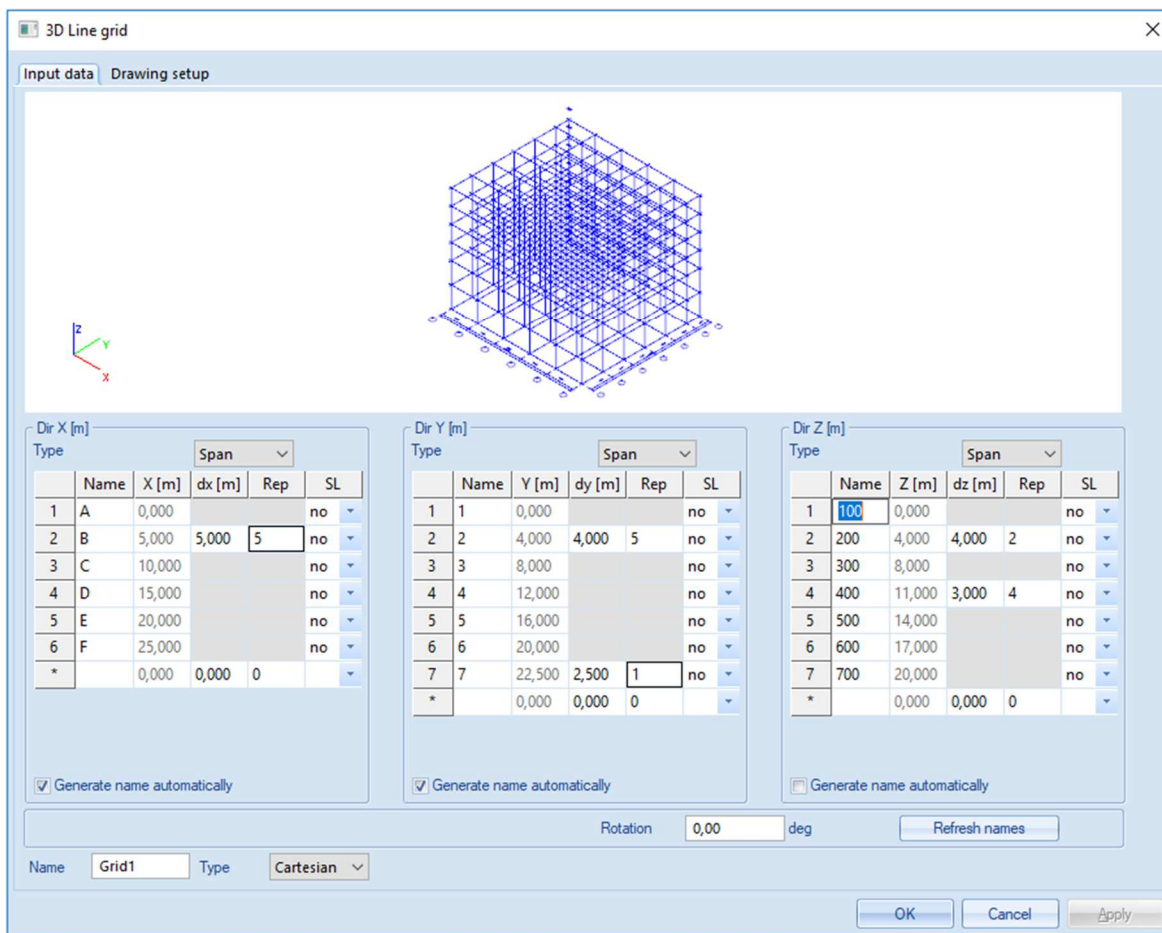


Slika 11. Unos podloge

U ovom primjeru za izradu modela zgrade koristi se drugi postupak u kojem se postavljaju pomoćne osi. U izborniku „Main“ odabere se opcija „line grid and storeys“ te podopcija „3D line grid“ kao što je prikazano na slici 12. U lijevom donjem kutu nalazi se naziv pomoćne mreže, u ovom slučaju Grid1 i vrsta, gdje je „cartesian“ klasična ortogonalna mreža. U okvirima „dir X“, „dir Y“ i „dir Z“ određuju se redom: opcijom „Name“ naziv osi, opcijom dx udaljenost u metrima od prethodne osi, opcijom „Rep“ broj ponavljanja (ako je nekoliko puta isti razmak automatski kreira niz osi). Opcija „SL“ služi za označavanje osi simetrije (ako je taj podatak bitan). Opcijom „Type“, koja je trenutno na vrijednosti „Span“ određuje se unos: 1.) razmaka od prethodne osi (relativna koordinata) ili 2.) apsolutne koordinate. Niti jedna opcija ne utječe na proračun, nego pomaže pri crtanju. Prilikom promjene vrijednosti u prozoru iznad uživo se iscrtava prikaz mreže. U gornjem kutu nalazi se kartica „drawing setup“ u kojoj je moguće promijeniti što se iscrtava (npr. naziv osi, kote...). Na slici 13 prikazan je ispunjeni izbornik. Nazivi za ravnine etaža su promijenjeni s „a-z“ na „100, 200, 300...“. Elemente mreže moguće je označiti samo u izborniku „line grid and storeys“



Slika 12. Izbornik pomoćnih osi



Slika 13. Ispunjeni izbornik pomoćnih osi

Kao i u prethodnom načinu s unosom .dwg datoteke, program zahtijeva točku u kojoj se mreža osi unosi u program. Kako je prva etaža podrum, mreža se postavlja u točku (0 0 -4). Prilikom unosa koordinata (npr. kod unosa ploče, zida, otvora...) vrijedi sljedeće:

- a) ishodište se može unijeti kao broj 0
- b) najprije se unosi x zatim y pa z koordinata odvojene razmakom ili
- c) x zatim y pa z koordinata odvojene s „ ; “
- d) unosom znaka „ @ “ ispred koordinata točke definiraju se relativne koordinate, a ne apsolutne (tj. nova točka se pomiče u odnosu na prethodnu unesenu točku)

Na slici 14 prikazani su različiti načini unosa ishodišta.

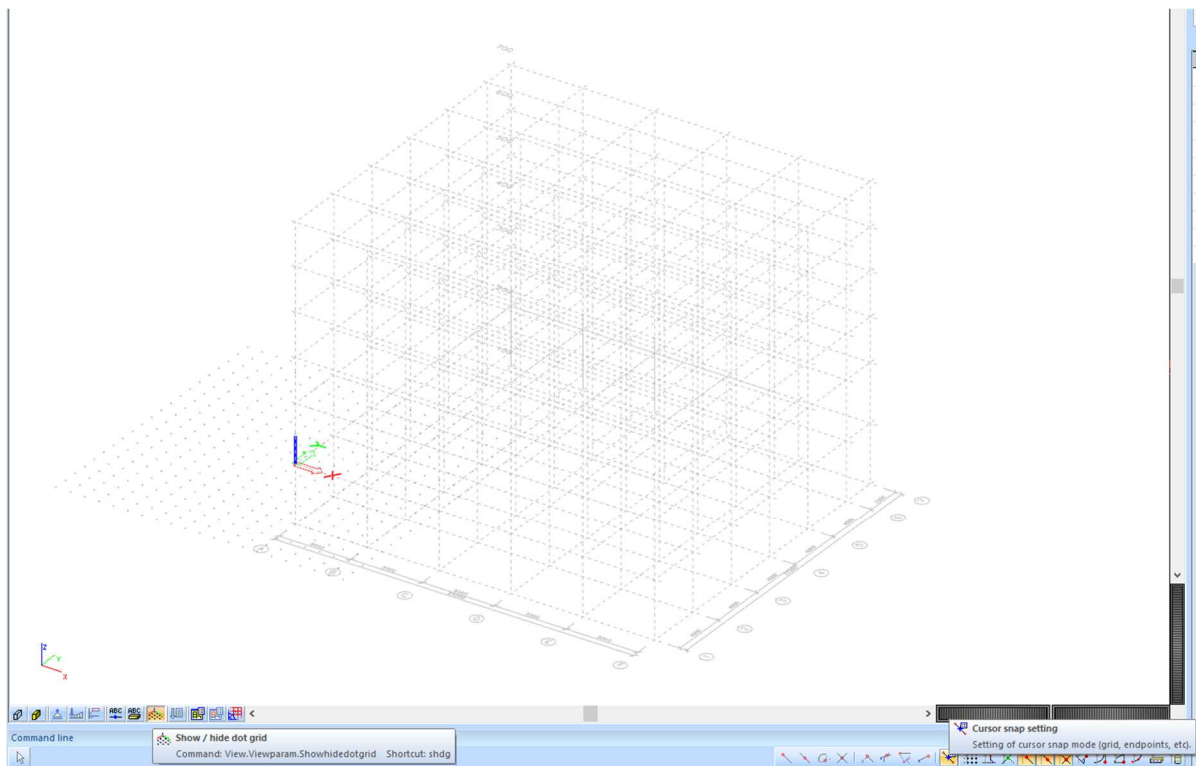
>0

>0 0

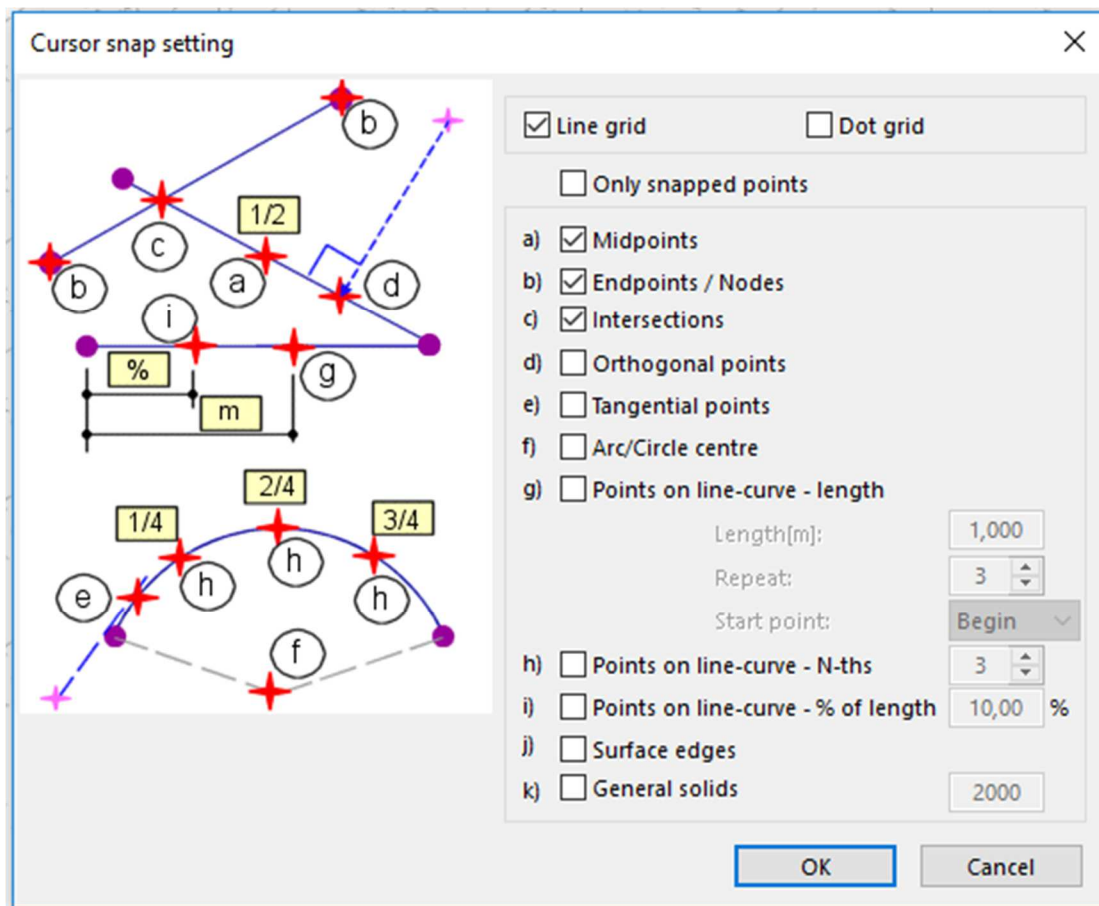
>0:0:0

Slika 14. Različiti načini unosa koordinata

Na slici 15 prikazana je pomoćna mreža u modelu. Također, u donjoj traci nalazi se niz opcija vezanih za vidljivost dijelova modela, opterećenja i slično. Osim toga, u istoj traci se nalaze „Snap“ opcije korisne pri crtanju modela. Prikaz točkaste mreže oko ishodišta može se isključiti pritiskom opcije „show/hide dot grid“, a pritiskom na opciju „cursor snap setting“ otvara se izbornik sa slike 16.



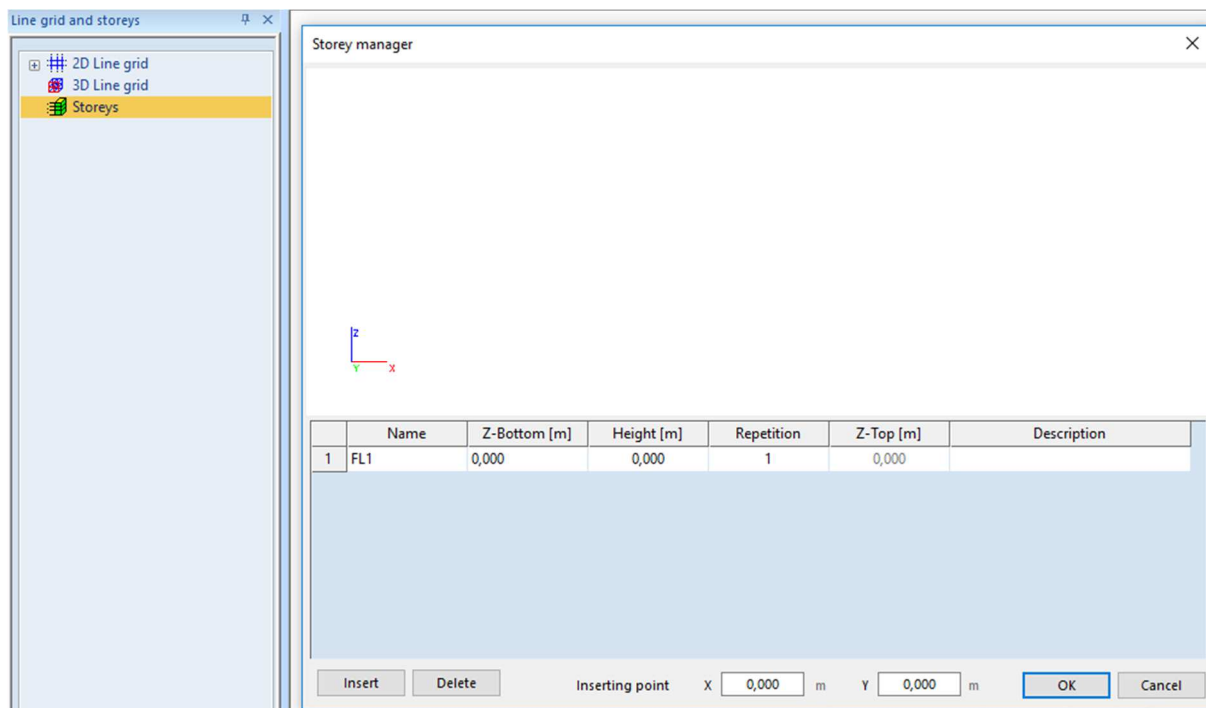
Slika 15. Prikaz pomoćne mreže i opcije za vidljivost i crtanje



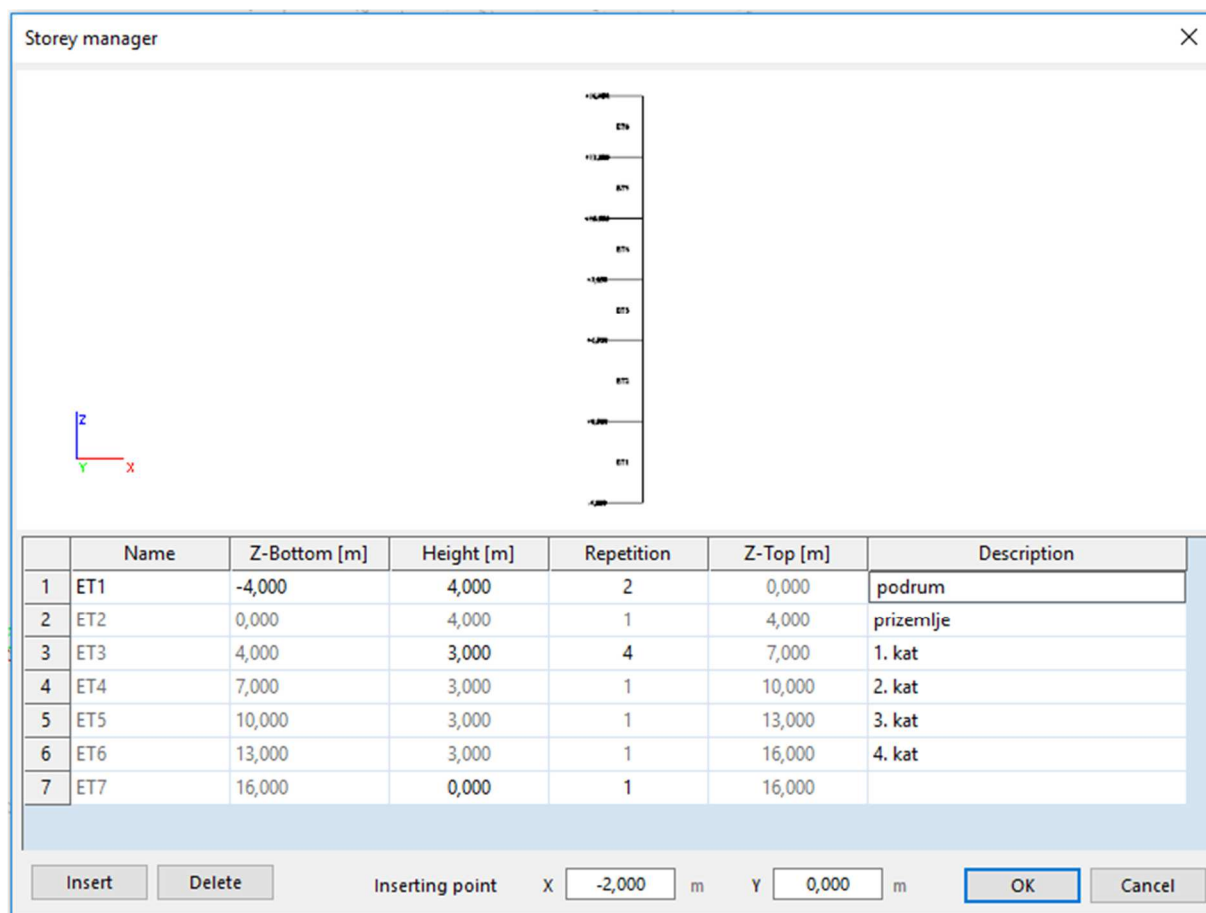
Slika 16. Izbornik za opcije crtanja

Odabirom opcije „line grid“ pokazivač se snap-a tj. privlači točkama pomoćnih osi. Opcijom „dot grid“ privlači se na točkastu mrežu. Prva opcija najčešće je korisna, dok druga najčešće smeta prilikom crtanja. Ispod su navedene opcije privlačenja („snap-anja“) na razne točke kao što su krajevi elemenata „endpoints/nodes“, njihova sredina „midpoints“ ili sjecišta „intersection“. Također je opcijom g) ili h) moguće svaki element privući („snap-ati“) na proizvoljnim točkama duž elementa što može biti korisno.

U izborniku „line grid and storeys“ prikazanom na slici 17 mogu se definirati i katovi u konstrukciji. Definiranje katova korisno je pri seizmičkom proračunu, ali i za pregledniji iskaz rezultata ili pregled elemenata. Izbornik se otvara pritiskom na opciju „storeys“. U prvom stupcu definira se naziv etaže, u drugom z koordinata donjeg ruba etaže, u trećem visina etaže i broj ponavljanja iste etaže. U posljednjem stupcu moguće je postaviti opis svake etaže. Pri dnu su x i y koordinate unosa oznake katova. Na slici 18 prikazan je ispunjeni izbornik.



Slika 17. Izbornik etaža



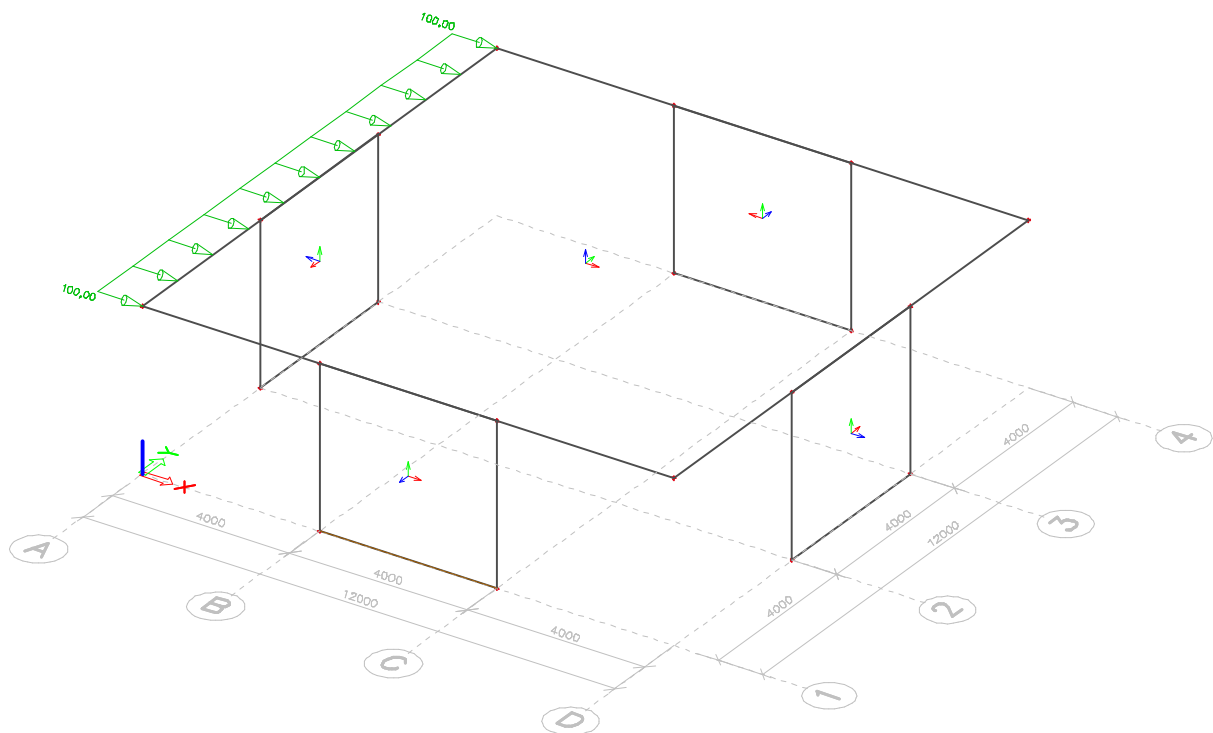
Slika 18. Ispunjeni izbornik etaža

2.2 Zadavanje elemenata

Za proračun konstrukcije stvarne elemente potrebno je prikazati modelom. Tako se na primjer stup ili greda najčešće prikazuju štapnim modelom čime se zanemaruju dimenzije poprečnog presjeka u odnosu na duljinu elementa. Štapni model za gredu nije uvijek prikladan. U slučaju velike visine poprečnog presjeka utjecaj posmika na uzdužna naprezanja ne može se zanemariti. Slično tome, vitki zidovi mogu se modelirati štapom (ili plošno) dok za zdepaste zidove štapni model nije prikladan. U ovom poglavlju, na modelu jedne jednostavne armiranobetonske konstrukcije, prikazana su dva načina modeliranja zidova.

2.2.1 Zadavanje zida plošnim elementima

Na slici 19 prikazan je model jednostavne jednoetažne konstrukcije opterećene bočnim opterećenjem. Konstrukcija se sastoji od 4 zida, 2 u x-smjeru i 2 u y-smjeru koji su na vrhovima povezani pločom. Ploča je opterećena horizontalnim linijskim opterećenjem na jednom rubu. Na slici su prikazane lokalne koordinatne osi svih elemenata. Crvenom bojom označena je lokalna x os, zelenom y os dok je plava z os.

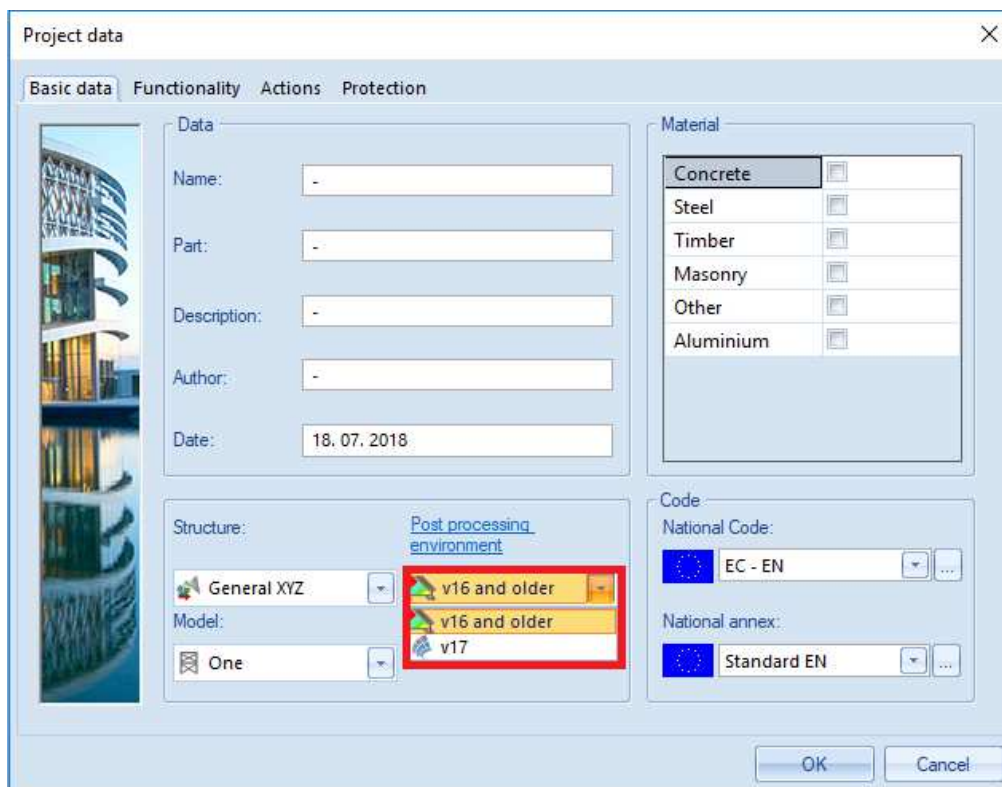


Slika 19. Prikaz modela

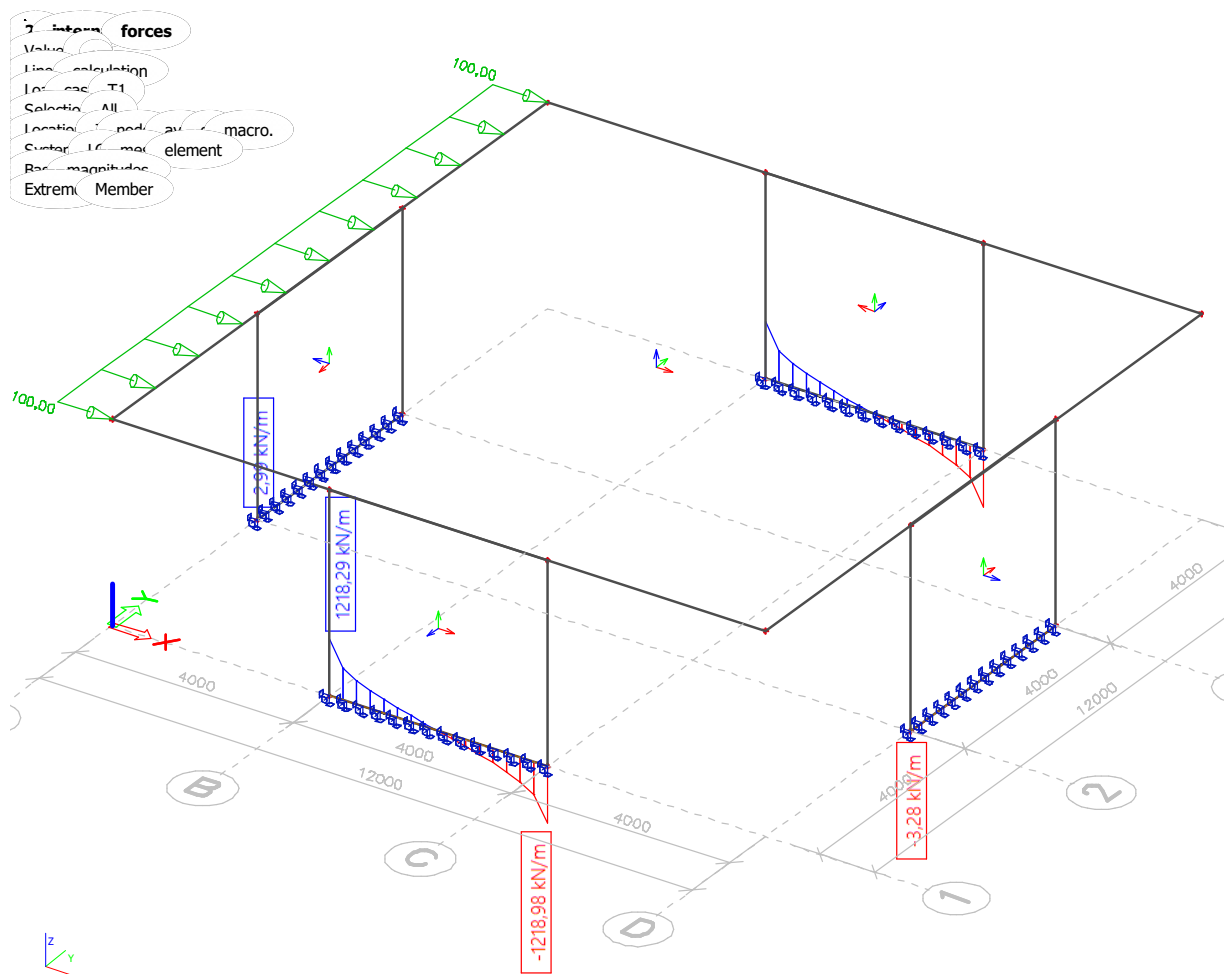
Zidovi su modelirani kao plošni elementi („shell“) opcijom „wall“ u programu SCIA engineer, a ploča je modelirana plošnim elementima („plate“). Razlika u vrsti elemenata je u tome što se u

„plate“ elementima ne javljaju uzdužne sile (čak niti kad se ograniči bočna deformacija s npr. 2 nepomična oslonca u nizu) nego se oni samo savijaju van ravnine dok se u „shell“ elementima javljaju i momenti savijanja van ravnine (kao i u „plate“ elementima, oko osi x i y) i uzdužne (membranske) sile.

Važno je napomenuti da verziji programa SCIA (2017) moment savijanja u ravnini nije moguće dobiti niti „shell“, a niti „plate“ elementima izravno već pomoću vertikalnih uzdužnih sila (za „shell“ elemente). Verzija se može promijeniti tako da se u izborniku „project“ vrijednost opcije „post processing environment“ promijeni na „v16 and older“ kao što je prikazano na slici 20. U starijim verzijama je moguća opcija „resultant“ kojom je moguće izravno dobiti moment savijanja u ravnini. Opcija „resultant“ ne postoji u svim verzijama ovog programa pa je prikazan postupak koji je uvijek primjenjiv. Na slici 21 prikazane su vertikalne uzdužne sile n_y (na slici 19 je vidljivo da su lokalne osi svih zidova tako orijentirane da je y os vertikalna i pozitivna prema gore) u presjeku na dnu zidova za slučaj kad su zidovi upeti.



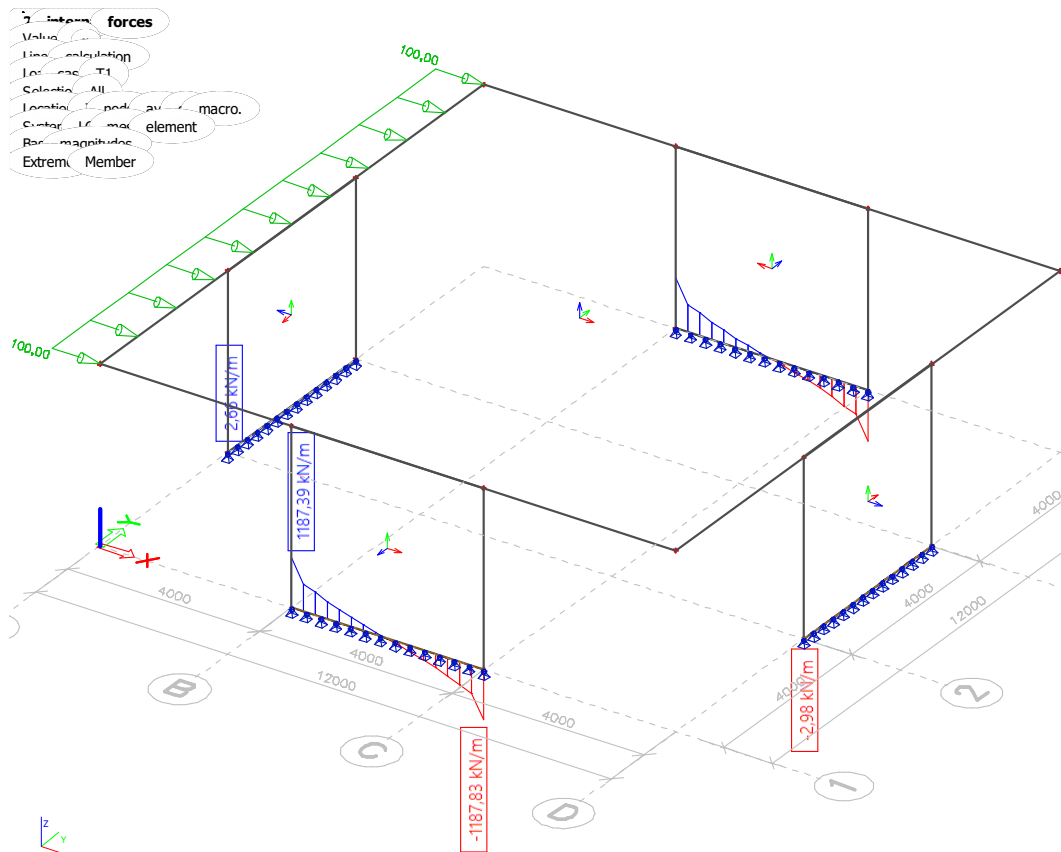
Slika 20. Podešavanje verzije solvera



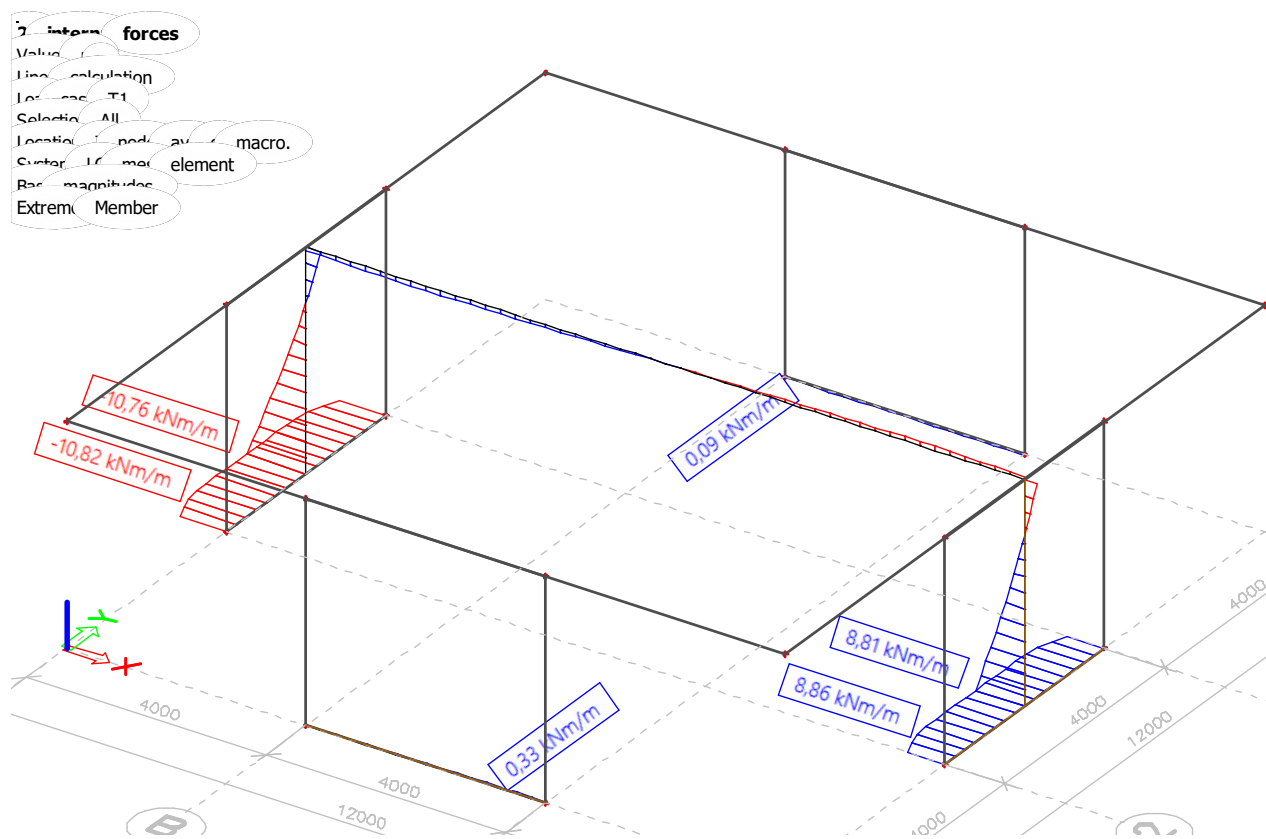
Slika 21. Vertikalna naprezanja za upeto oslanjanje

Na slici 22 prikazan je isti dijagram, ali pri zglobnom oslanjanju. Vidljivo je da je utjecaj oslonca na vrijednost momenta u ravnini mala (2,5%). Rezultat je očekivan jer oslonci koji sprječavaju pomak u lokalnom y smjeru sprječavaju i rotaciju oko z osi. Veća razlika javit će se pri rotaciji oko lokalne x osi elementa jer su svi oslonci na jednom pravcu pa sila nema krak oko x osi.

Na slici 23 prikazan je moment savijanja u smjeru lokalnih y osi za upete oslonce. U plošnim elementima moment savijanja m_y nije onaj koji savija oko y osi, nego onaj pomoću kojeg se odredi armatura u y smjeru (odnosno koji savija oko x osi). Ploča i zidovi formiraju okvirno djelovanje, a momenti su vrlo mali u odnosu na momente u ravnini zida.



Slika 22. Vertikalna naprezanja za zglobno oslanjanje

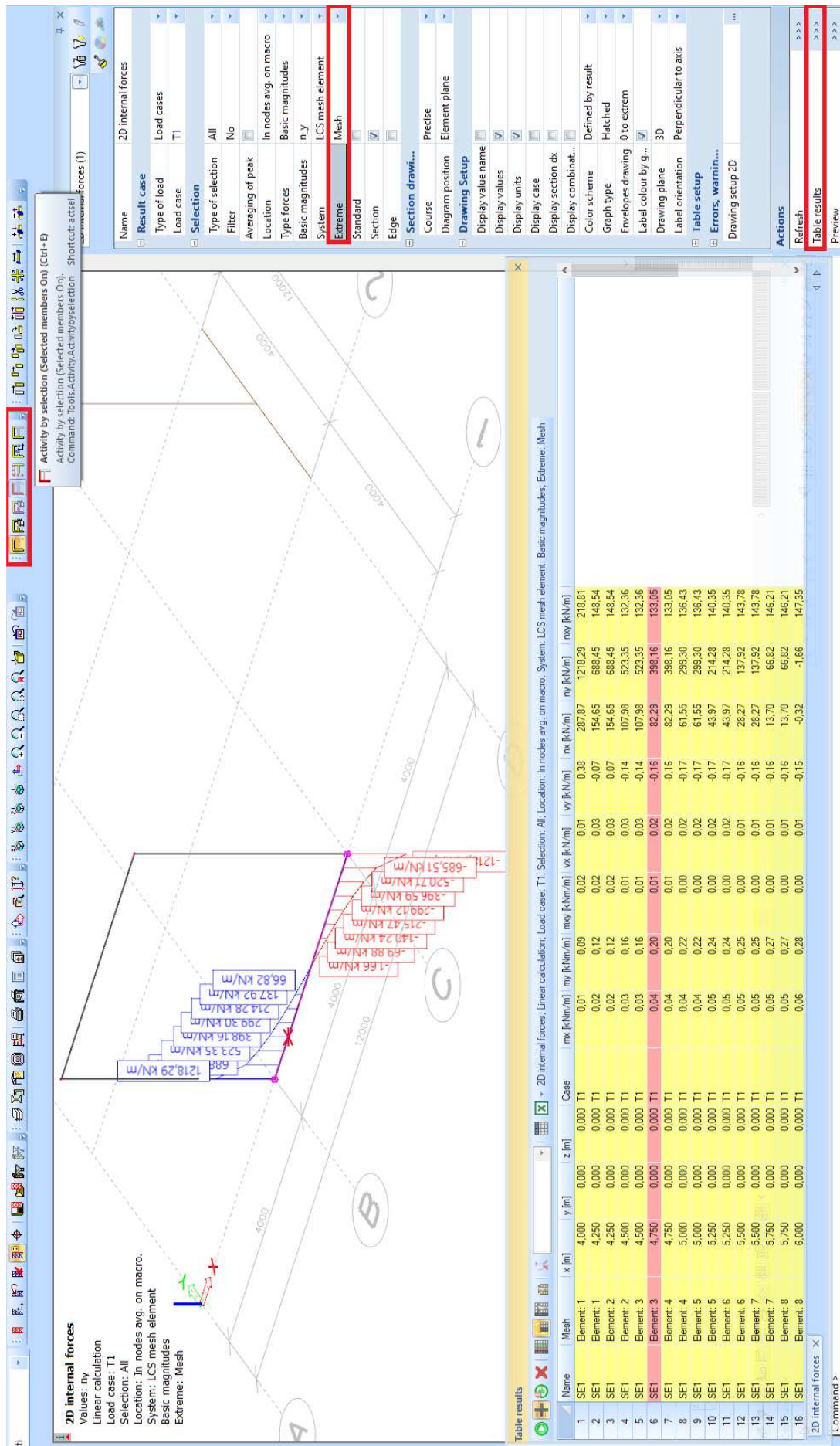


Slika 23. Moment savijanja u smjeru y osi za upeti oslonac

Sile prikazane na slici 21 prikazane su u tablici 1 opcijom „table results“. Na slici 24 prikazane su postavke i tablični rezultati. Najprije je potrebno postaviti izbornik „extreme“ na opciju „mesh“ čime se prikazuju rezultati u svakom konačnom elementu. Označi li se zid i pritisne opcija „activity by selection“ u alatnoj traci prikazuje se samo odabrani zid. Pritiskom na određeni element u tablici (kao što je na slici element 3) taj element se označi na slici iznad tablice crvenim x simbolom. U slučaju da nije tako, pritiskom desnog klika miša može se odabrati opcija „highlight in model“ (samo vizualna pomoć). Također je moguće filtrirati tablicu prema nekoj od opcija ili sortirati. Vrijednosti uzdužnih sila potrebno je kopirati (ručno) u Excel gdje će se proračunati moment. Proračun momenta prikazan je u tablici 1.

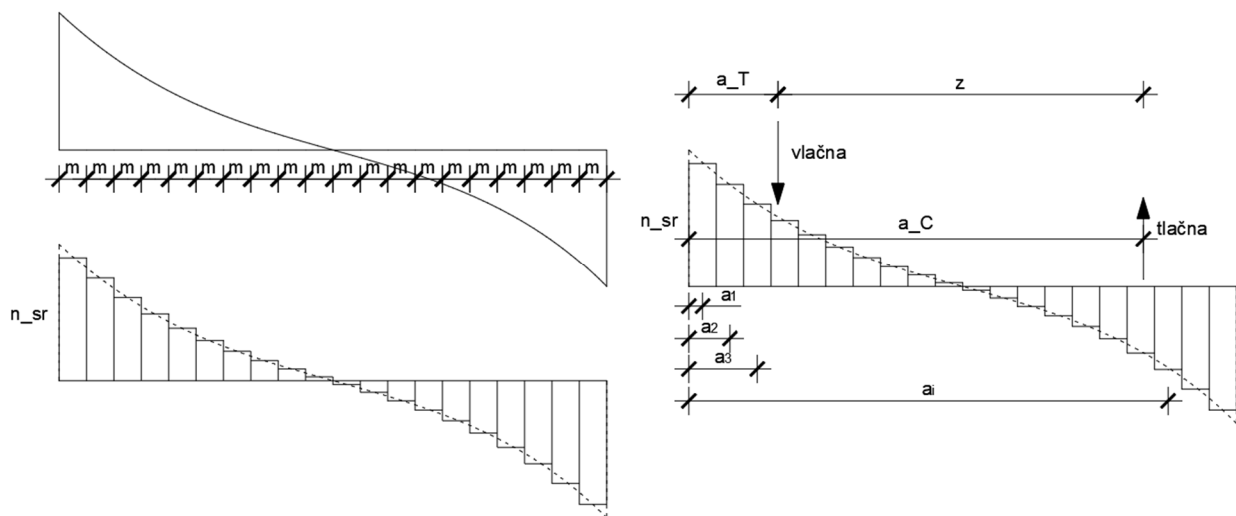
Tablica 1. Prikaz proračuna momenta savijanja pomoću uzdužnih sila

Mesh	x [m]	ny [kN/m]	mesh[m] m	n_sr [kN/m]	n_sr [kN]	sile	krak tež a	n_sr*tež.	položaj sile	krak sile	MOMENT	
Element: 1	4	1218,29		0,25	953,370	238,343	vlačna	0,125	29,79	a_T [m]	z [m]	M [kNm]
Element: 1	4,25	688,45		0,25	605,900	151,475	734,15	0,375	56,80	0,58	2,84	2085,72
Element: 2	4,25	688,45		0,25	460,755	115,189		0,625	71,99			
Element: 2	4,5	523,35		0,25	348,730	87,183		0,875	76,28			
Element: 3	4,5	523,35		0,25	256,790	64,198		1,125	72,22			
Element: 3	4,75	398,16		0,25	176,100	44,025		1,375	60,53			
Element: 4	4,75	398,16		0,25	102,370	25,593		1,625	41,59			
Element: 4	5	299,3		0,25	32,580	8,145		1,875	15,27			
Element: 5	5	299,3		0,25	-35,770	-8,943		2,125	-19,00			
Element: 5	5,25	214,28		0,25	-105,060	-26,265		2,375	-62,38			
Element: 6	5,25	214,28		0,25	-177,855	-44,464		2,625	-116,72			
Element: 6	5,5	137,92		0,25	-257,295	-64,324		2,875	-184,93			
Element: 7	5,5	137,92		0,25	-347,855	-86,964		3,125	-271,76			
Element: 7	5,75	66,82		0,25	-458,650	-114,663		3,375	-386,99			
Element: 8	5,75	66,82		0,25	-603,110	-150,778		3,625	-546,57			
Element: 8	6	-1,66		0,25	-952,245	-238,061	3,875	-922,49				
Element: 9	6	-1,66		0,25	-1218,98				a_C [m]			
Element: 9	6,25	-69,88		0,25					3,42			
Element: 10	6,25	-69,88		0,25								
Element: 10	6,5	-140,24		0,25								
Element: 11	6,5	-140,24		0,25								
Element: 11	6,75	-215,47		0,25								
Element: 12	6,75	-215,47		0,25								
Element: 12	7	-299,12		0,25								
Element: 13	7	-299,12		0,25								
Element: 13	7,25	-396,59		0,25								
Element: 14	7,25	-396,59		0,25								
Element: 14	7,5	-520,71		0,25								
Element: 15	7,5	-520,71		0,25								
Element: 15	7,75	-685,51		0,25								
Element: 16	7,75	-685,51		0,25								
Element: 16	8	-1218,98		0,25								



Slika 24. Tablični rezultati

Tlačna i vlačna sila razlikuju se za 0,04 % što je moguće zanemariti. U prvih 3 stupca nalaze se podaci iz programa koji odgovaraju vrijednostima na slici 24. U stupcu „mesh“ ispisana je razlika x koordinata, odnosno širina konačnog elementa. U stupcu „n_sr“ određena je srednja vrijednost sile unutar svakog elementa. Kako su vrijednosti po metru dužine zida množenjem stupaca mesh i n_sr dobije se sila u kN. Ukupna sila jednaka je zbroju sila svih elemenata. Posebno se zbroje tlačne, a posebno vlačne sile. Nakon toga, da bi se odredio moment potrebno je naći težište tih sila i njihov krak. To je učinjeno u preostalim stupcima tablice isto kao što se traži težište presjeka ili položaj centra posmika. Na slici 25 shematski je prikazan ovaj pristup.



Slika 25. Princip pronalaska momenta savijanja

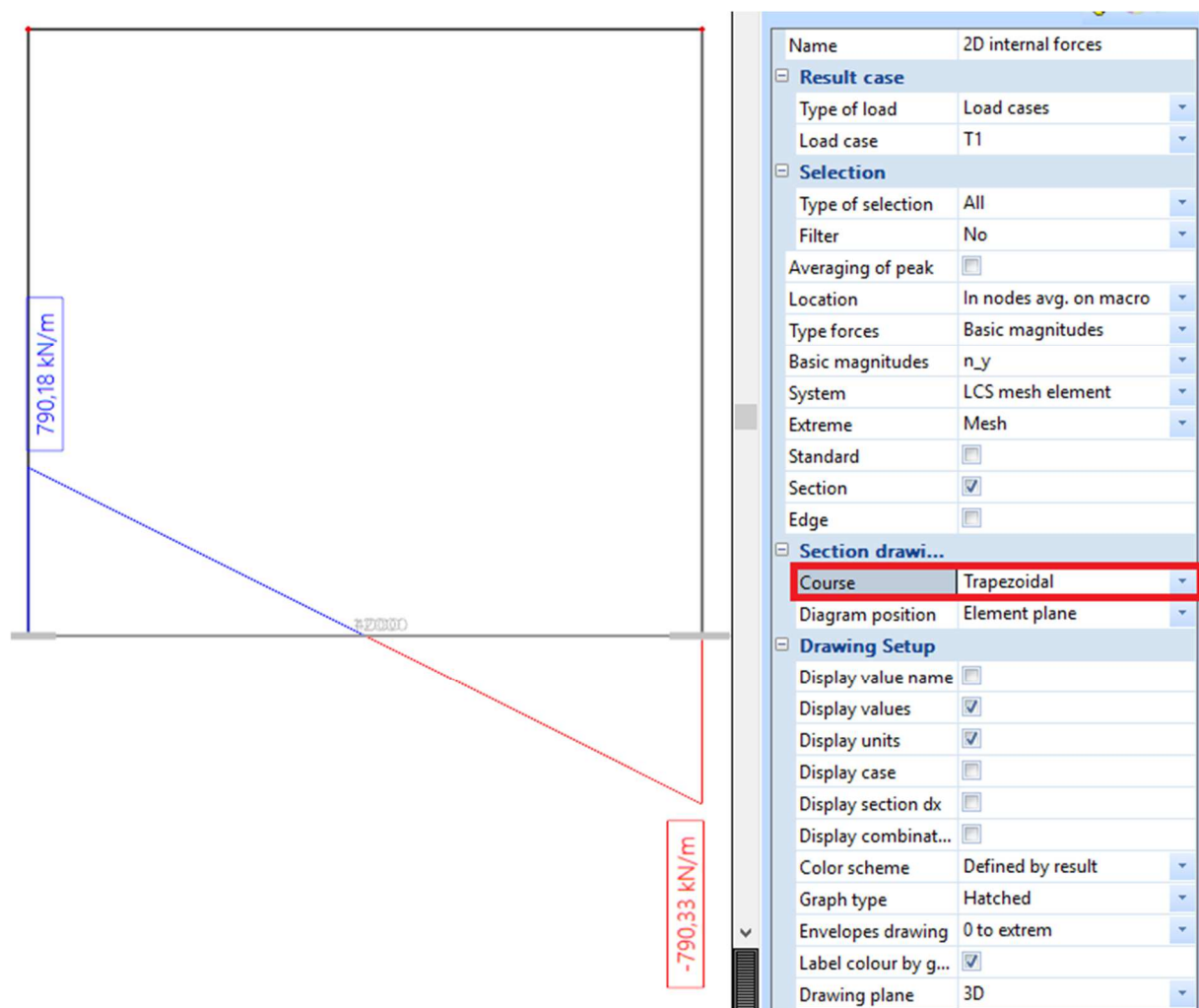
Osim prikazanog načina, moment se mogao jednostavnije izračunati jer je razdioba sila gotovo linearna. U programu je moguće prikazati i ekvivalentnu linearnu raspodjelu sila kada se u izborniku „course“ umjesto opcije „precise“ odabere opcija „trapezoidal“ (moguća je još i opcija „average“ koja bi u ovom slučaju pokazala vrlo malu vrijednost jer je rezultanta uzdužnih sila 0). Taj slučaj prikazan je na slici 26. Kad stvarna razdioba sila nije približno linearna, ne smije se koristiti opcija „trapezoidal“ jer tako određene sile ne odgovaraju realnim silama u konstrukciji. Kako je raspodjela sila trokutasta, rezultante sila se nalaze na $\frac{1}{3} \cdot \frac{L}{2}$ od svakog

kraja. Krak sila je $z = L - 2 \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{L}{2} = \frac{2}{3} \cdot 4 = 2,667 \text{ m}$. Rezultanta je jednaka površini trokuta,

odnosno $T = C = n_y \cdot \frac{L}{2} \cdot 0,5 = 790,33 \cdot 2 \cdot 0,5 = 790,33 \text{ kN}$. Moment savijanja iznosi

$M = T \cdot z = 790,33 \cdot 2,667 = 2107,81 \text{ kNm}$ što se razlikuje za 1% od postupka prikazanog u tablici 1. Taj postupak može se koristiti ako dijagram uzdužnih sila značajno odstupa od

trokutaste raspodjele (npr. kod visokostijenih nosača). U daljnjem proračunu se koristi opcija „resultant“ jer su rezultati prikazani na način kao za štapove.

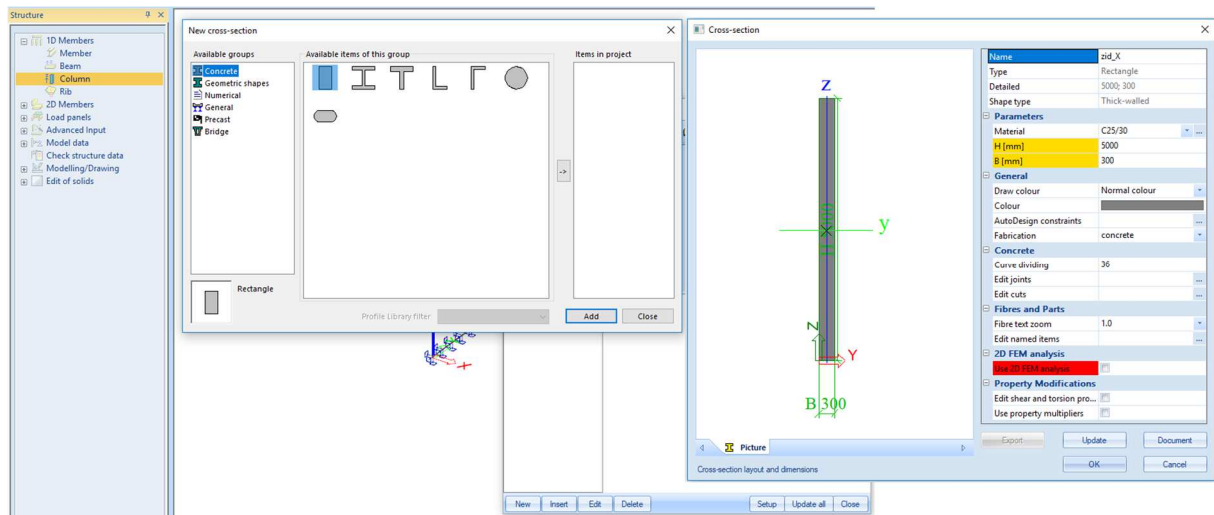


Slika 26. Ekvivalentna trapezna raspodjela sila

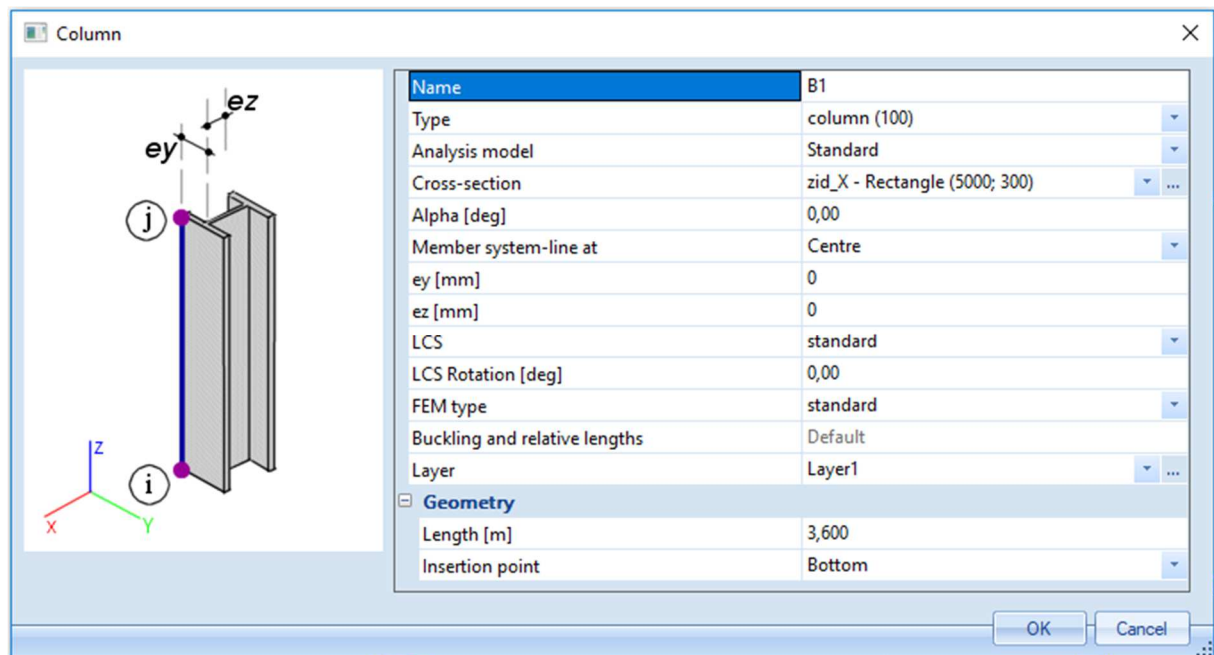
2.2.2 Zadavanje zida štapnim elementima

Zid se može modelirati pomoću štapnog elementa što je prikazano u nastavku. Zidovi u x i y-smjeru zamjenjuju se štapnim elementima i dobiveni momenti savijanja uspoređuju se s onima iz prethodnog proračuna. U glavnom („main“) izborniku odabere se „structure“ gdje se pod „1D members“ odabere stup („column“). Opcije „column“, „beam“ i „member“ razlikuju se po tome što se prva definira jednom točkom i visinom (u z-smjeru), druga jednom točkom i rasponom (u x ili y-smjeru), a posljednja s bilo koje dvije točke u prostoru. Prije nego što se definira položaj stupa potrebo je definirati poprečni presjek pa se automatski otvori izbornik za definiranje presjeka kao što je prikazano na slici 27. Najprije se odabere oblik presjeka, a zatim opcijom „add“ otvori novi izbornik gdje se definira ime presjeka, širina, visina i materijal. Odabere se širina i visina presjeka tako da odgovara poprečnom presjeku zida koji će se

zamijeniti. Nakon što je presjek definiran pritisne se „close“ dok se ne zatvore svi prozori za definiciju presjeka i otvori izbornik za definiranje stupa prikazan na slici 28. U tom se izborniku elementu pridružuje presjek, ekscentricitet (na slici 28 je vidljiva plava os koja se unosi u model, a ne poklapa se s težištem presjeka), duljina i mogućnost unosa definiranjem gornjeg ili donjeg kraja elementa. Pritiskom na „ok“ zatvara se izbornik i program zahtijeva unos stupa u model. Nakon toga potrebno je zadati oslonac elementu. Kako je sada proračunski element zida štapni, oslonac je točkasti, a ne linijski kao za „shell“ elemente.

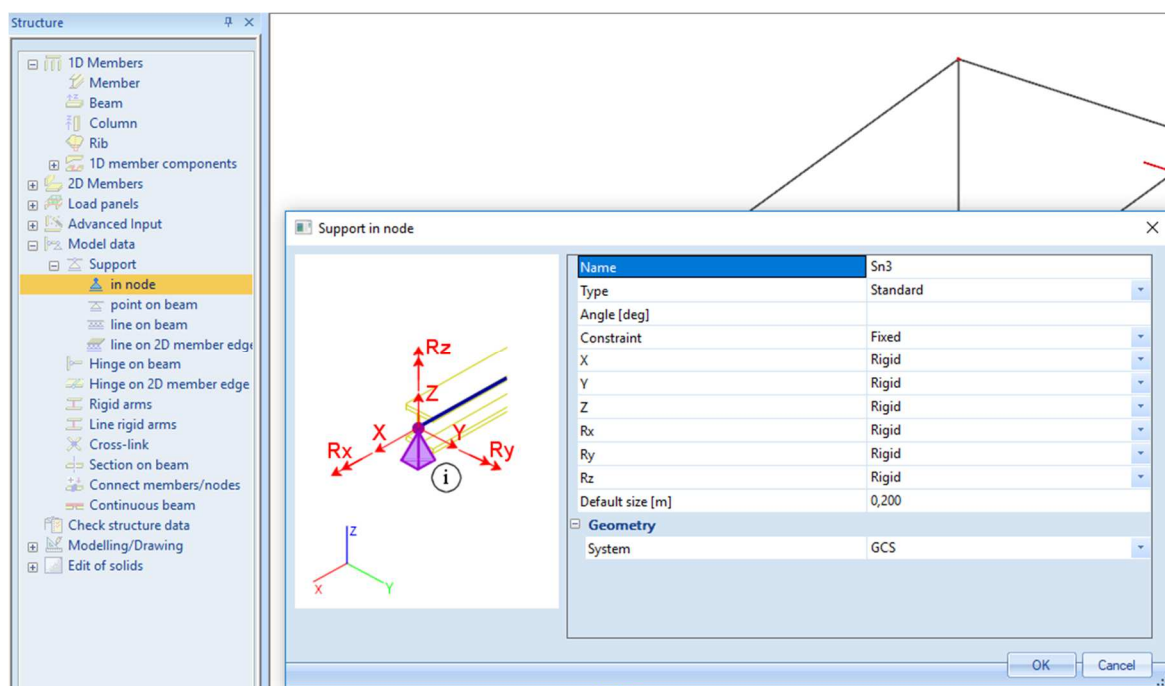


Slika 27. Definiranje poprečnog presjeka



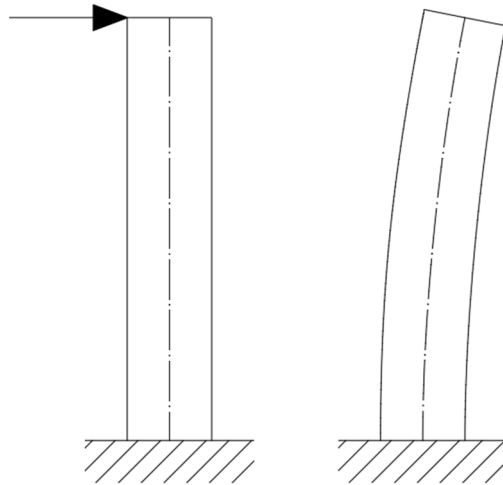
Slika 28. Zadavanje stupa

Zadavanje oslonaca prikazano je na slici 29. U izborniku „structure“, podizborniku „model data“ odabere se „support“ nakon čega se odabere opcija „in node“. Pod opcijom „constraint“ se mogu odabrati opcije „fixed“, „hinged“ „sliding“ i slično, čime se odabiru opcije upetog, zglobnog, kliznog, itd. oslonca. Opcijama „X“ do „Rz“ mogu se odrediti proizvoljni uvjeti oslanjanja. Moguće su opcije „rigid“ odnosno spriječeni pomak, „free“ odnosno slobodni pomak ili „flexible“ odnosno djelomično spriječen pomak (za tu opciju potrebno je unijeti krutost). Kako bi se štapnim elementom modelirao zid potrebno je na kontaktu ploče i stvarnog zida postaviti kinematička ograničenja. Osnovna pretpostavka štapnih i plošnih elemenata uobičajenih dimenzija je da presjeci nakon savijanja ostaju ravni (ta pretpostavka nije zadovoljena npr. kod zidnih (visokostijenih) nosača).



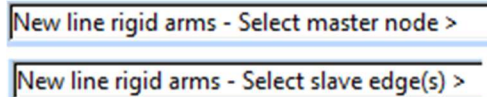
Slika 29. Zadavanje oslonca

Na slici 30 prikazan je jednostavan element opterećen bočnom silom i deformirani oblik elementa. Vidljivo je da dolazi do zaokreta gornjeg presjeka (a i ostalih presjeka) stvarnog zida. Kako je stvarni element modeliran samo pomoću osi (iscrtkana linija) potrebno je osigurati da se sve točke stvarnog presjeka zajedno rotiraju.



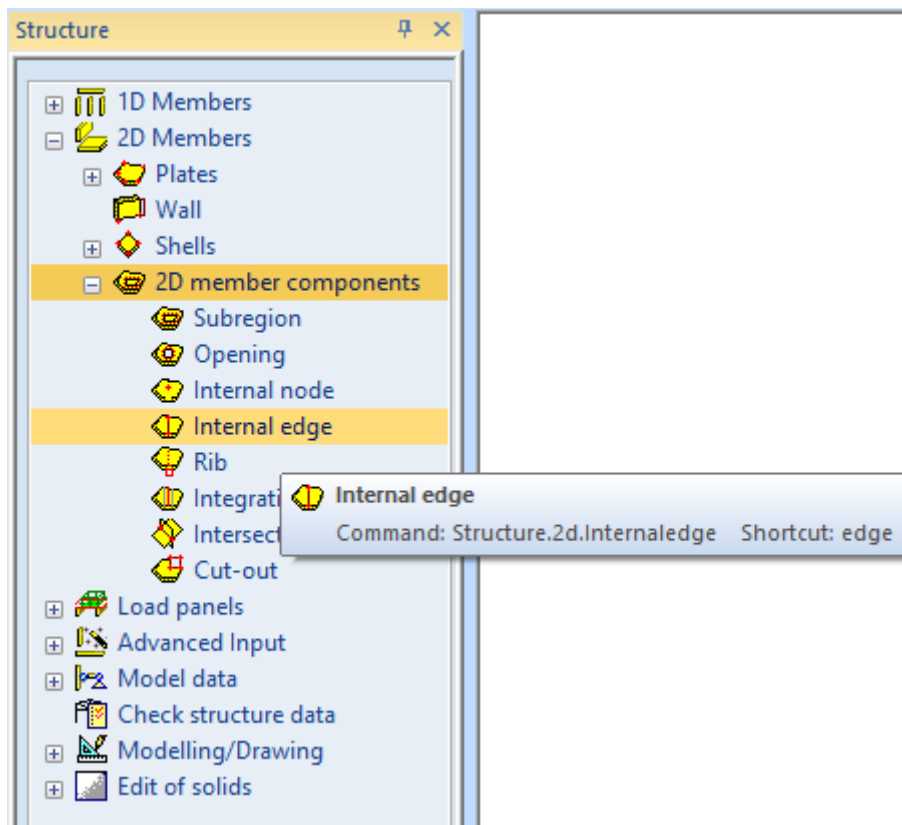
Slika 30. Deformacija zida

U izborniku „structure“ pod „model data“ se nalaze opcije „rigid arms“ i „line rigid arms“. Razlika je u tome što prva opcija povezuje dvije točke, a druga liniju povezuje s točkom. Pri tome je jedna točka „master“ odnosno ona koja definira pomake, a sve ostale su „slave“, odnosno prate „master“ čvor. Odabirom opcije „line rigid arms“ program zahtijeva označavanje „master“ čvora kako je prikazano na slici 31. Nakon što se označi „master“ čvor (u ovom slučaju vrh stupa) program zahtijeva unos linija „slave line(s)“ koje prate „master“ čvor.



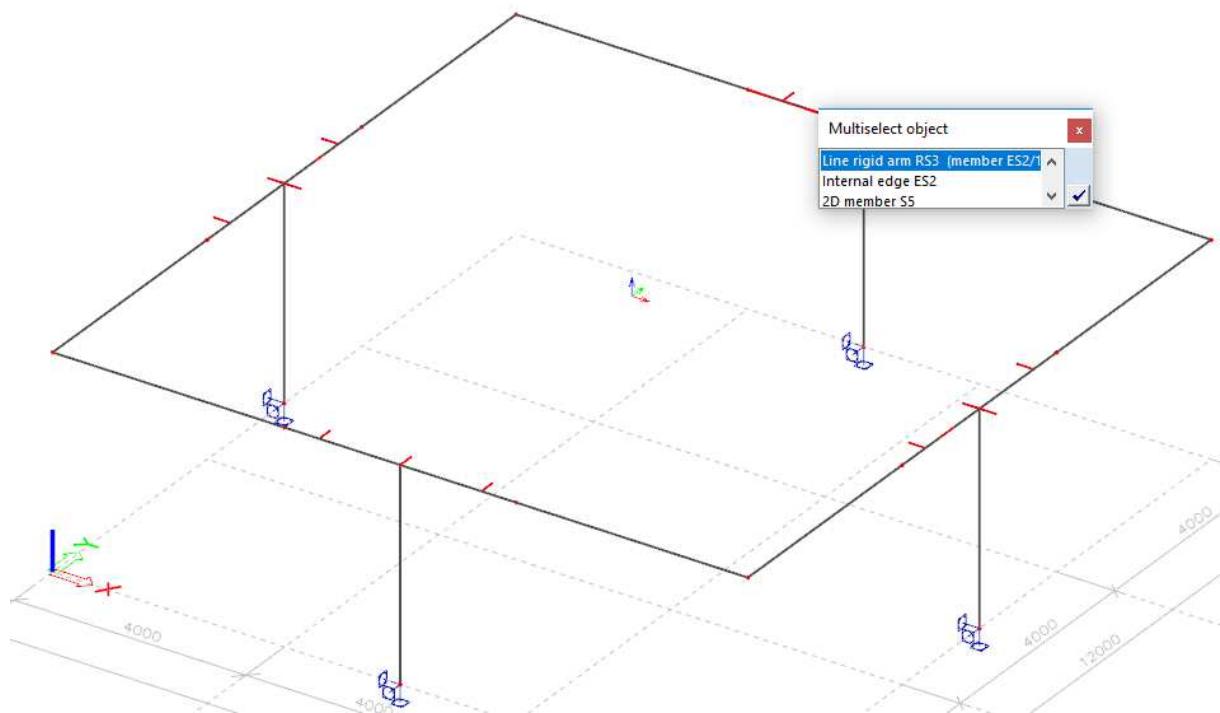
Slika 31. Unos kinematskih ograničenja

Potrebno je kreirati liniju koja će se povezati s točkom. Duljina linije odgovara duljini zida. Na slici 32 prikazan je unos linije opcijom „internal edge“. Najprije je potrebno odrediti 2D element unutar kojeg se nalazi linija, a zatim definirati njezinu duljinu i položaj pomoću početne i krajnje točke.



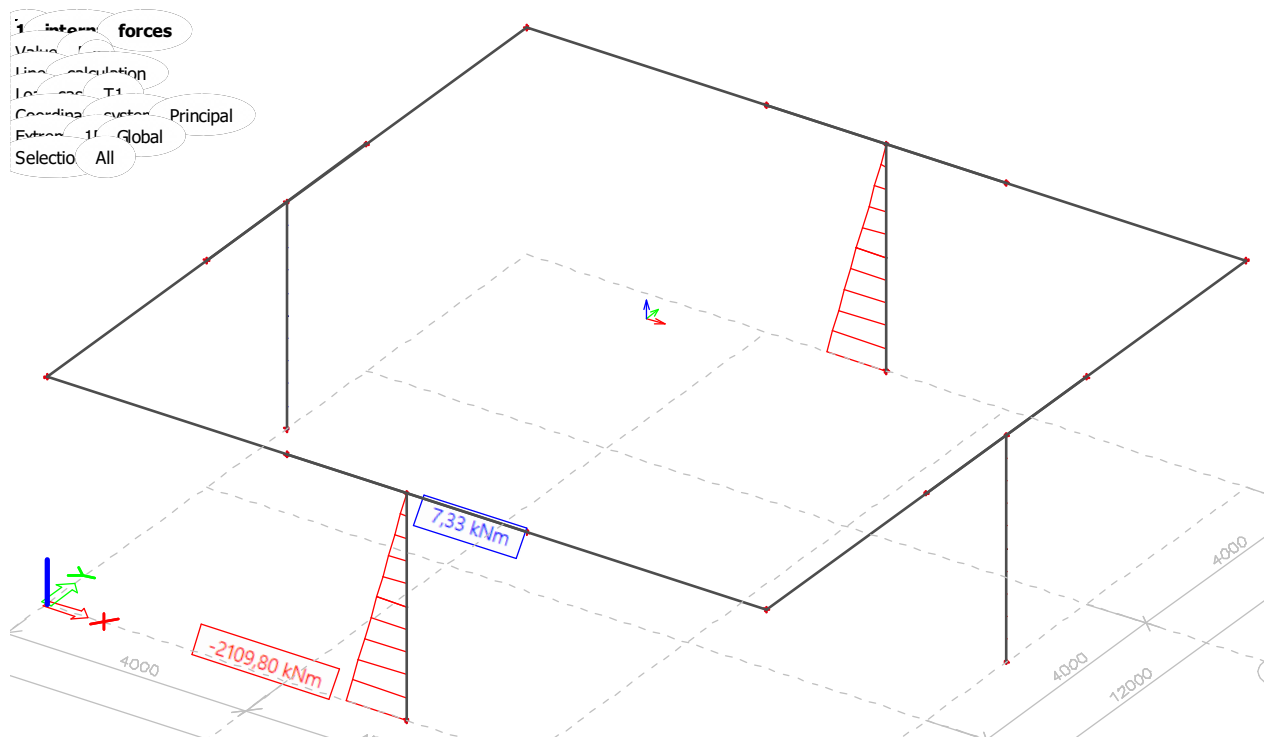
Slika 32. Zadavanje linije unutar ploče

Na slici 33 prikazan je model iste konstrukcije kao na slici 19, ali su umjesto shell elemenata za zidove su korišteni štapni elementi povezani kinematskim ograničenjima RS1, RS2, RS3 i RS4.



Slika 33. Štapni model s kinematskim ograničenjima

Na slici 34 prikazani su momenti savijanja elemenata B1 i B2.



Slika 34. Momenti savijanja na štapnom modelu

Moment dobiven štapnim modelom razlikuje se za 1% od rezultata dobivenog opcijom „precise“ i manje od 0,1% od rezultata dobivenog opcijom „trapezoidal“ na „shell“ elementu (ne znači da se štapnim modelom dobije pogrešna vrijednost za 1%, moguće je da su rezultati shell modela pogrešni zbog grešaka numeričkog proračuna). U slučaju da se zidovi nalaze vrlo blizu (npr. jezgra), svi zidovi se mogu zamijeniti jednim štapom jer rezultati mogu značajnije odstupati ako se svaki zid modelira zasebnim štapom. Pri tome je potrebno voditi računa da često jezgra unutar etaže nema konstantan presjek (zbog otvora koji se ne protežu kroz cijelu etažu) pa je često prikladnije jezgru modelirati „shell“ elementima. Prilikom dimenzioniranja jezgra je složen presjek pa pojednostavljenje modela nema značajan učinak (jer se dimenzioniranje ne može pojednostaviti). Rezultati štapnog modela su jasniji, a trenutno je poznata raspodjela momenata po visini elementa (dok je za „shell“ elemente potrebno pronaći moment u svakom presjeku zasebno). „Shell“ elementi su prikladniji za složenije presjeke promjenjive po visini i elemente u kojima je utjecaj posmika značajan (npr. zidni nosači).

2.3 Model konstrukcije

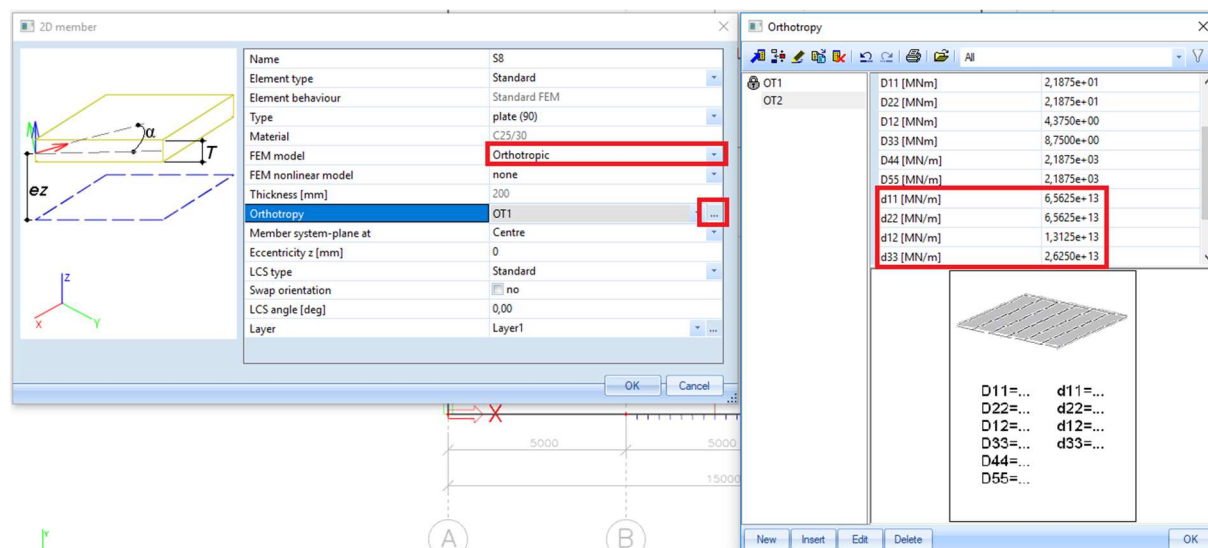
U ovom poglavlju nastavlja se opis modeliranja modela konstrukcije prikazane na slikama 1 do 5.

Nakon što je formirana mreža sa slike 15, redom se unose elementi konstrukcije. Najprije se unose elementi prizemlja i ploča pozicije 200 (između prizemlja i 1. kata), a oslonci elemenata modeliraju se kao upeti. Oslonci su upeti jer se u stvarnosti svi elementi i armatura u njima neprekinuto provode u podrumске elemente. Stupovi na sjecištu osi 2C i 2D oblikuju se kao sekundarni potresni elementi pa se modeliraju kao zglobno oslonjeni („pendl“) stupovi (preuzimaju samo uzdužnu silu). Kako bi se osiguralo prikladno ponašanje konstrukcije, uputno je provjeriti položaj centra krutosti u ranijoj fazi koncipiranja konstrukcije. Iako za sam proračun korištenjem računala to nije presudno, u sljedećem podpoglavlju je prikazan postupak određivanja položaja centra krutosti pomoću računala.

2.3.1 Određivanje centra krutosti

U prvom koraku ploča se modelira kao kruti disk radi pronalaska centra krutosti. Krutost elemenata moguće je modificirati na nekoliko različitih načina. Jedan način je modelirati ploču kao ortotropnu. Time program omogućuje definiranje različitih krutosti ploče u pojedinom smjeru (krutost na savijanje, na uzdužnu silu, torzijska krutost, posmična krutost)

Da bi se ploča modelirala kao ortotropna potrebno je, prilikom zadavanja ploče, opciju „FEM model“ postaviti na vrijednost „orthotropic“ kako je prikazano na slici 35.



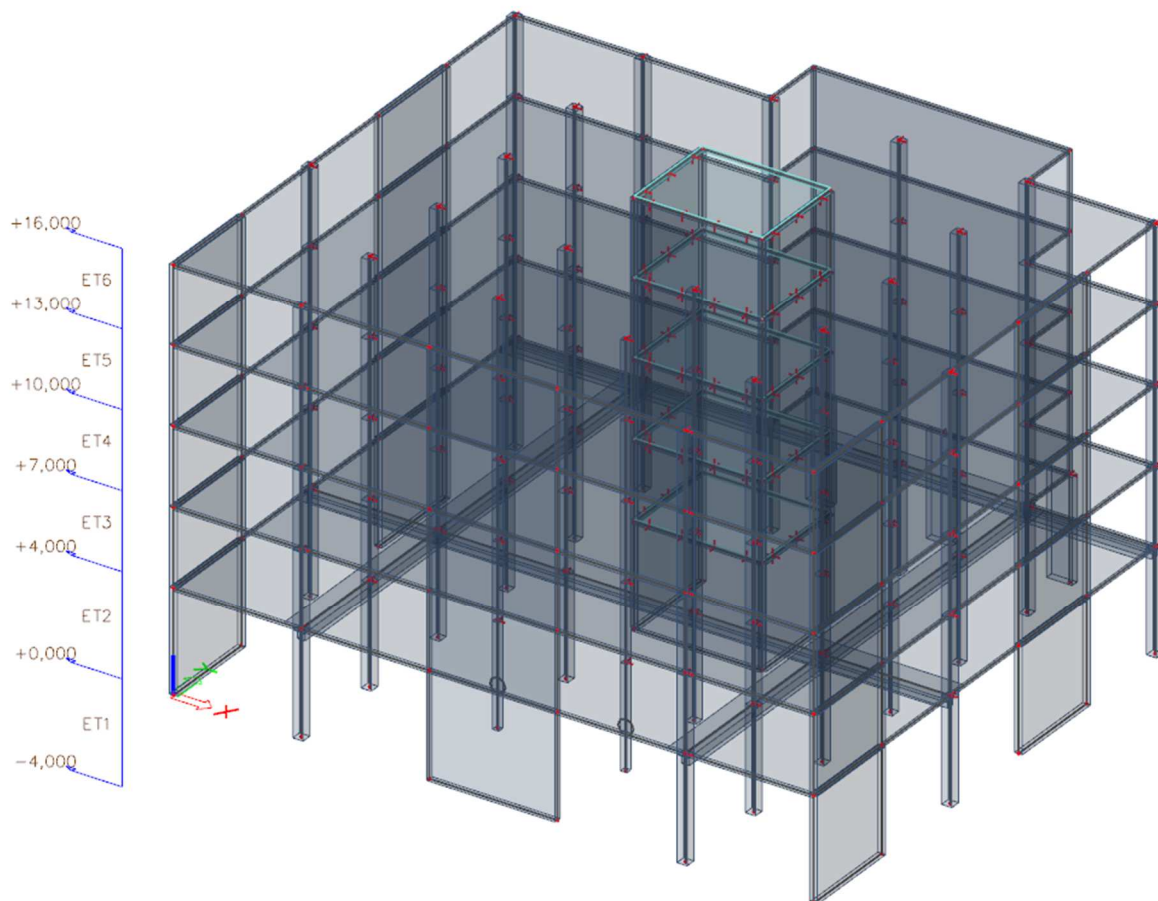
Slika 35. Zadavanje ortotropne ploče

Nakon toga, pritiskom tri točke kraj opcije „orthotropy“ otvara se novi izbornik koji je prikazan na desnoj strani slike 35. Zaokružene vrijednosti definiraju uzdužnu krutost. Opcije D11 do D33 vezane su za savojnu krutost. Krutost D11 je savojna krutost u x-smjeru, D22 je savojna

krutost u y -smjeru, D_{12} je odnos krutosti u x i y -smjeru (poissonov omjer), D_{33} je torzijska krutost (o njoj ovisi m_{xy}). Krutostima D_{44} i D_{55} uzima se u obzir utjecaj posmika na deformaciju (bitniji kod debelih ploča, a ako je zadana velika krutost, utjecaj posmika na savojne deformacije se zanemaruje). Krutost d_{11} je uzdužna krutost u x -smjeru, d_{22} je uzdužna krutost u y -smjeru (ista kao d_{11}), d_{12} je odnos krutosti u x i y -smjeru (poissonov omjer), a d_{33} je posmična krutost u ravnini zida. Kako ne bi došlo do deformacije ploče (nego samo pomaka kao krutog tijela) sve uzdužne krutosti (d_{11} do d_{33}) povećane su 10^{10} puta (na slici 33 prikazane su već modificirane vrijednosti). Ta vrijednost je odabrana proizvoljno kako ne bi došlo do lokalnih deformacija ploče.

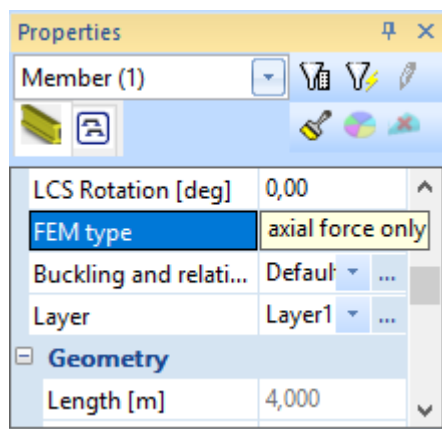
Centar krutosti moguće je pronaći tako da se kruta ploča optereti momentom torzije (za svaku etažu posebno jer se centar krutosti može razlikovati po etažama). Položaj zadavanja momenta torzije nije bitan (jer je ploča izrazito kruta pa se ne javljaju lokalne deformacije ploče. Kad ploča nije dovoljno kruta bitan je položaj unosa koncentriranog momenta jer se ploča lokalno deformira). Iznos momenta treba biti dovoljno velik da program prikaže vrijednost pomaka različitu od 0.

Na slici 36 prikazan je model konstrukcije bez podruma (radi jednostavnosti). Zidovi su zadani u skladu s prijašnjim napomenama kao plošni elementi. U ploči je zadan otvor unutar jezgre koji je definiran kao panel. To znači da se svo opterećenje koje se nalazi iznad otvora prenosi na rubove otvora.



Slika 36. Model konstrukcije bez podruma

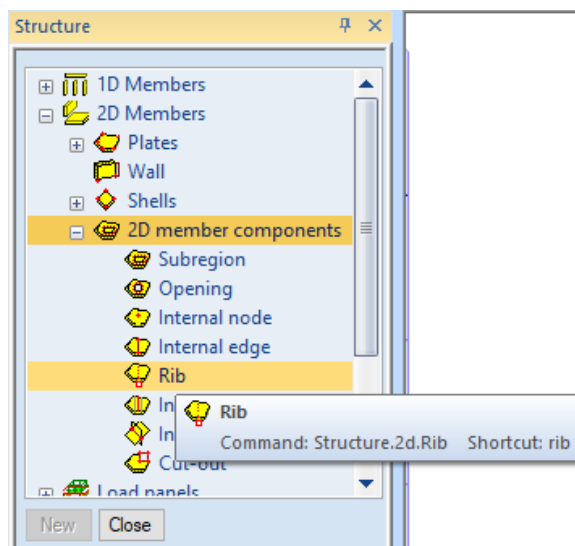
„Pendl“ stup se modelira na način da se dopusti samo unos uzdužne sile. Nakon što se stup označi u izborniku properties opcija „FEM type“ postavi se na vrijednost „axial force only“ kako je prikazano na slici 37. Elementi koji prenose samo uzdužnu silu označeni su na sredini visine krugom kao što je vidljivo na slici 37. Osim zidova i „pendl“ stupova, potrebno je modelirati i elemente okvira (stupove i grede).



Slika 37. Zadavanje pendl stupa

Definiranje stupova objašnjeno je ranije, u poglavlju 2.2 prema slici 28.

Grede se mogu modelirati na nekoliko načina. Moguće je modelirati štapni element sa stvarnim T presjekom (ili L presjekom) grede. Pri tome je potrebno osigurati da se masa i krutost pojasnice grede (pojasnica grede je ploča) ne pribraja 2 puta (jednom za gredu i jednom za ploču). Također je moguće modelirati gredu kao štap pravokutnog presjeka čija visina je manja od visine stvarne grede za debljinu ploče. Štapni element postavi se ekscentrično u odnosu na ploču i poveže „master-slave“ odnosom. Pri tome je potrebno voditi računa da se unutarnjim silama u štapnom elementu trebaju pridodati sile iz ploče. SCIA ima mogućnost zadavanja greda opcijom „rib“ koja se nalazi u izborniku „structure“, podizbornicima „2D members“ i „2D member components“ kao što je prikazano na slici 38. Nakon odabira opcije „rib“ potrebno je označiti ploču unutar koje se nalazi rebro.



Slika 38. Naredba za zadavanje rebra ploče

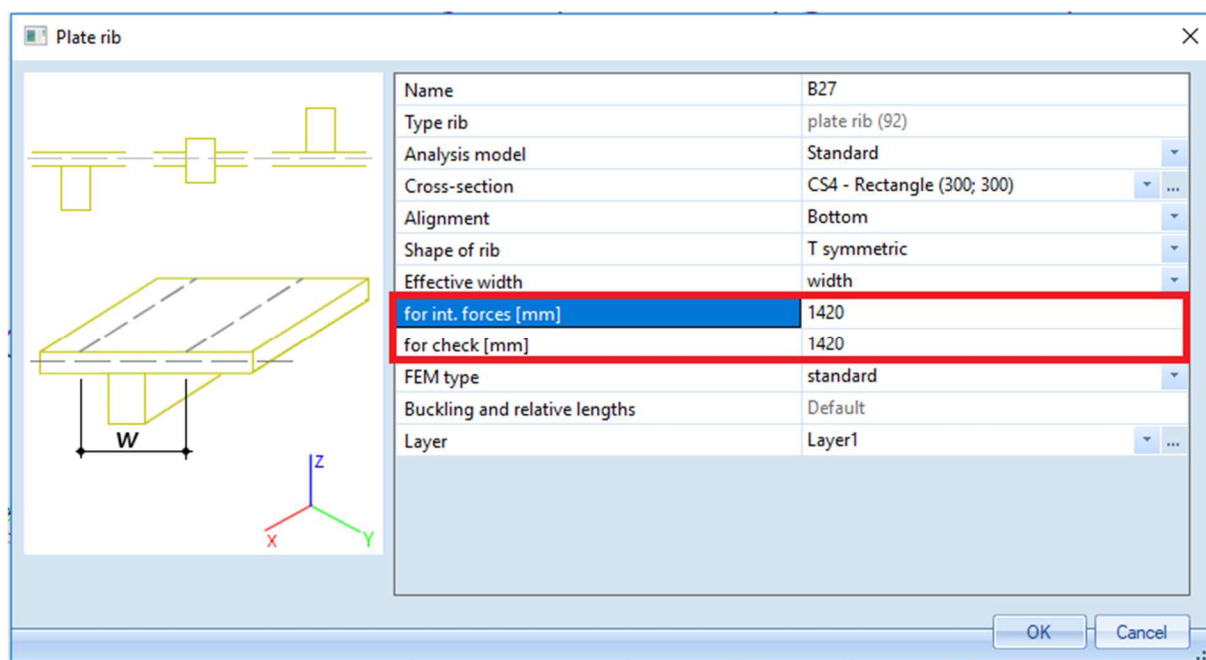
Nakon toga se otvori izbornik prikazan na slici 39 gdje se definira geometrija. S lijeve strane izbornika prikazani su mogući položaji grede (s donje strane, u sredini ili s gornje strane) što je povezano s opcijom „alignment“. Presjek rebra je pravokutni što se definira opcijom „cross-section“ (visina rebra je udaljenost od donjeg ruba grede do donjeg ruba ploče). Opcijom „shape of rib“ moguće je definirati oblik sudjelujuće širine (simetrični ili nesimetrični T presjek i L presjek s lijeve ili desne strane). Opcijama koje se nalaze u crvenom kvadratu definira se efektivna širina ploče koja se koristi za proračun, odnosno dimenzioniranje. Sudjelujuća širina grede postupno varira duž raspona. Zbog toga, pojednostavljeno se može uzeti da je efektivna širina jednaka za cijelu gredu i odgovara sudjelujućoj širini za srednje polje prema [1], točka 5.3.2.1. Okvir u osi 6 dijelom je na rubu zgrade (pa greda ima oblik slova L), a dijelom nije (pa greda ima oblik nesimetričnog slova T). Ostali okviri su unutarnji. U tablici 2 prikazani su

presjeci određeni na standardni način (uz $l_0 = 0,7 \cdot l$). Širina hrpta grede iznosi 30 cm, a visina 50 cm.

Tablica 2. efektivne širine greda

smjer	u osi	raspon l [cm]	b_1 [cm]	b_2 [cm]	l_0 [cm]	$b_{ef,1}$ [cm]	$b_{ef,2}$ [cm]	b_{ef} [cm]
y	B	400	235	235	280	56	56	142
y	E	400	235	235	280	56	56	142
x	3	500	185	185	350	70	70	170
x	6-vanjski	500	185	0	350	70	0	100
x	6-unutarnji	500	185	110	350	70	57	157

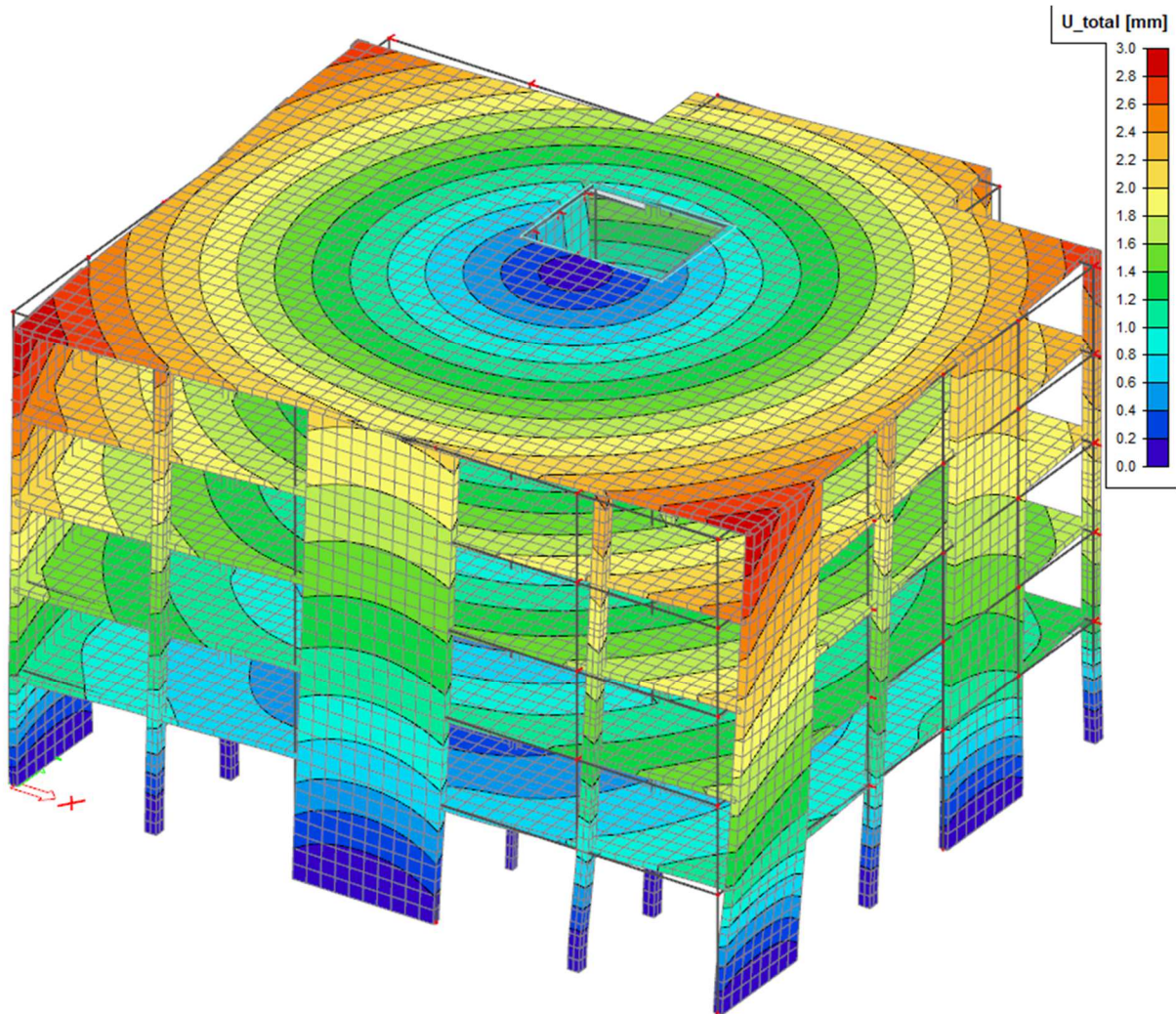
Napomena: krutost T-presjeka veća je od krutosti pravokutnog presjeka. Promatra li se presjek u stanju naprezanja 2 (raspucani poprečni presjek) na mjestu gdje je pojasnica u vlaklu (npr. nad osloncem) taj presjek se ne smatra obrnutim T-presjekom, nego pravokutnim i ima manju krutost, što je zanemareno u proračunu.



Slika 39. Izbornik za zadavanje rebra ploče

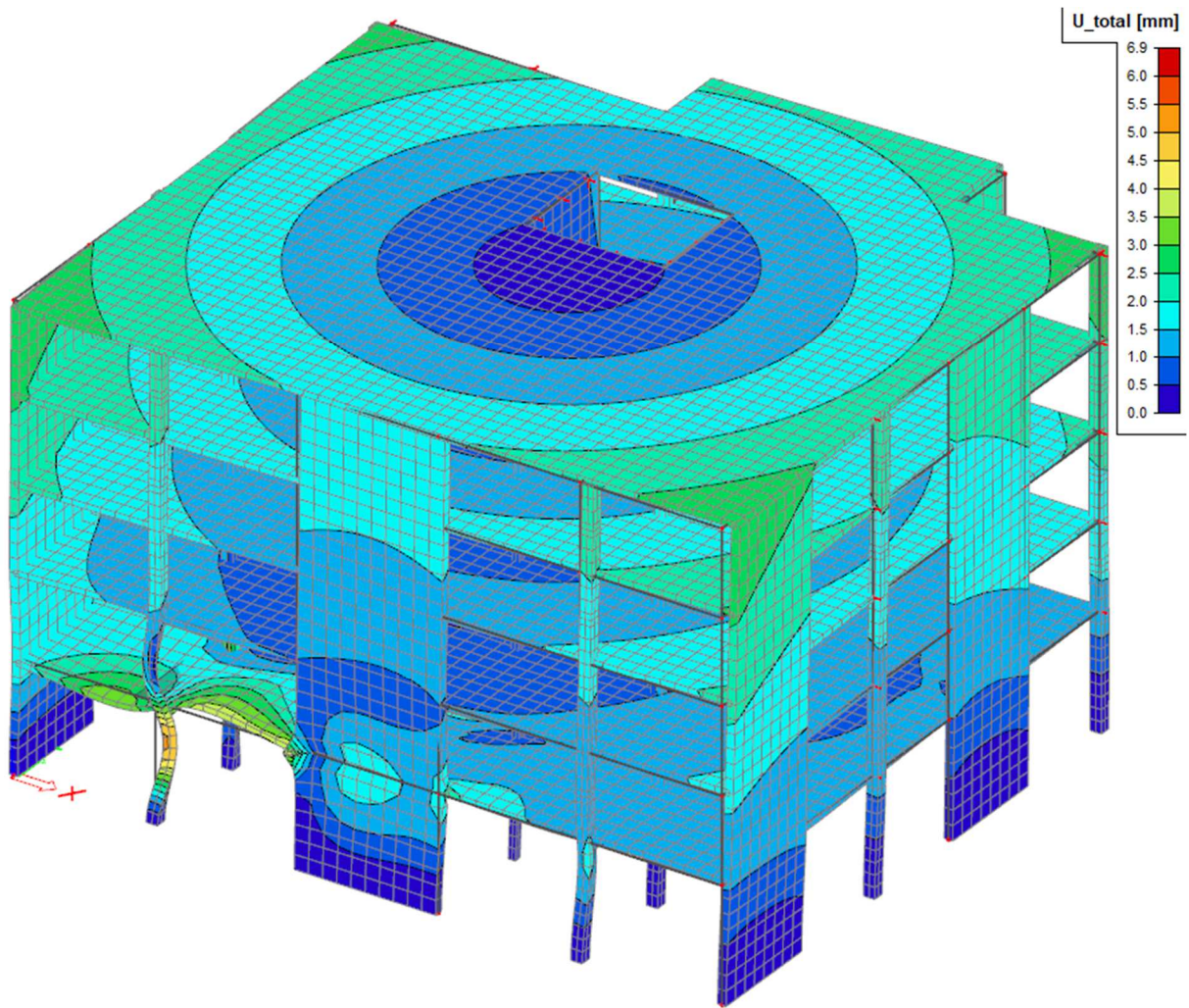
Nakon pritiska na opciju „OK“ potrebno je unutar ploče postaviti gredu (početnom i krajnjom točkom ako je greda ravna). Opcijom „rib“ problemi ostalih metoda (dvostruka krutost i masa, integriranje rezultata) su izbjegnuti. Vrijednosti krutosti i masa modela opcijom „rib“ su najbliže stvarnim. Vrlo je važno pravilno procijeniti krutost i masu konstrukcije jer o tome ovise potresne sile i njihova raspodjela.

Na slici 40 prikazan je deformirani oblik konstrukcije pod zadanim momentom torzije (100000 kNm). Vidljivo je da se ploča rotira kao kruti disk bez značajnih lokalnih deformacija. Početni položaj elemenata vidljiv je linijama. Radi usporedbe, na slici 41 prikazan je isti model opterećen istim momentom, ali kad je ploča modelirana pomoću stvarne krutosti na uzdužnu silu. Vidljiva je vrlo velika razlika u rezultatima.



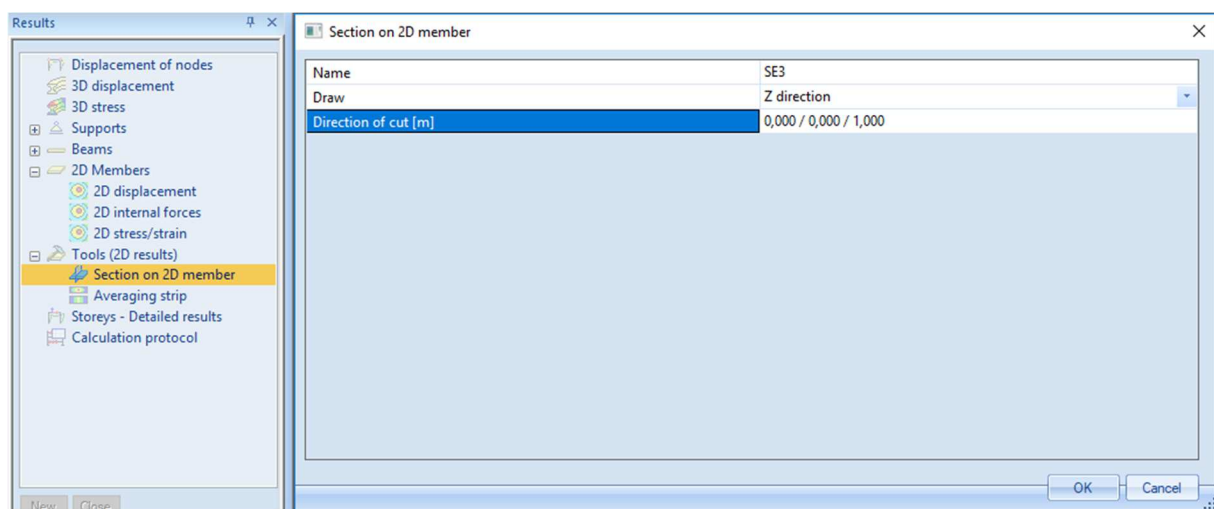
Slika 40. Deformirani oblik konstrukcije s pločom velike uzdužne krutosti

Centar krutosti (pol rotacije) nalazi se na mjestu gdje je vrijednost pomak jednaka nuli. Pomaci u x -smjeru definiraju y koordinatu centra posmika, a pomaci u y -smjeru x koordinatu centra posmika (vidljivo na slici 44). Kako bi se lakše definirao centar posmika, postavljaju se rezne plohe na ploču. Nakon što se konstrukcija proračuna, u glavnom izborniku odabere se izbornik „results“ za prikaz rezultata.



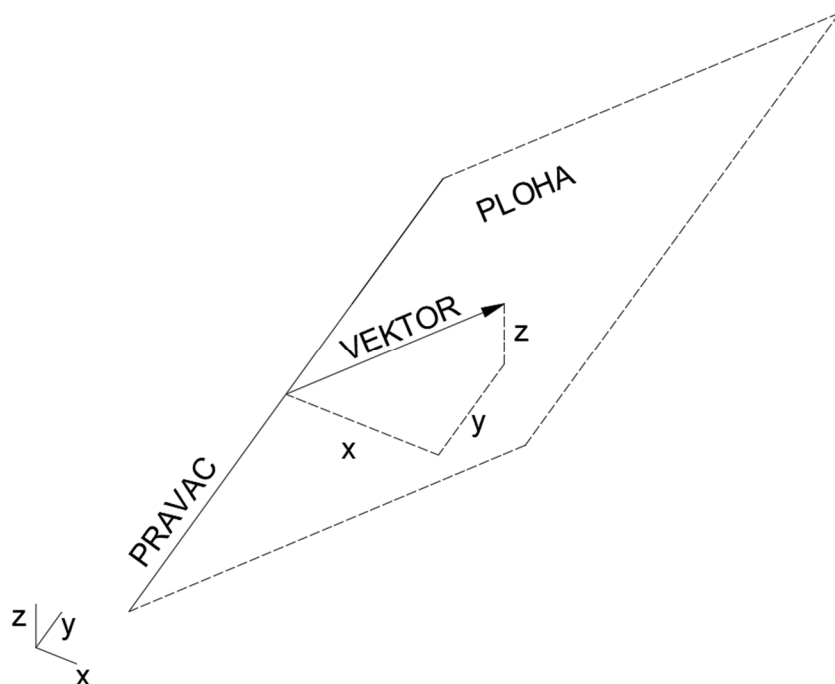
Slika 41. Deformirani oblik konstrukcije s pločom male uzdužne krutosti

Kako bi se rezultati prikazali linijski potrebno je definirati liniju („section“). Opcija „section“ nalazi se u podizborniku „tools“ kao što je prikazano na slici 42.



Slika 42. Definiranje presjeka

Opcijom „draw“ definira se način crtanja rezultata (u ravnini ploče, okomito na nju...), ali je tu opciju moguće promijeniti i prilikom prikaza rezultata pa je manje bitna vrijednost koja je ovdje postavljena. Opcijom „section on 2D member“ postavlja se ravna ploha koja prikazuje rezultate u svim elementima koje siječe. Ravna ploha se (između ostalih načina) može definirati pomoću pravca i vektora koji leže u njoj. Pravac definira korisnik nakon pritiska na opciju „OK“ unosom početne i krajnje točke. Vektor koji leži u ravnini zadaje se opcijom „direction of cut“. Unose se tri vrijednosti koje predstavljaju x, y i z komponentu vektora (kao na slici 43). Početna točka vektora nalazi se na zadanom pravcu. Na slici 43 je shematski prikazan način zadavanja rezne plohe.



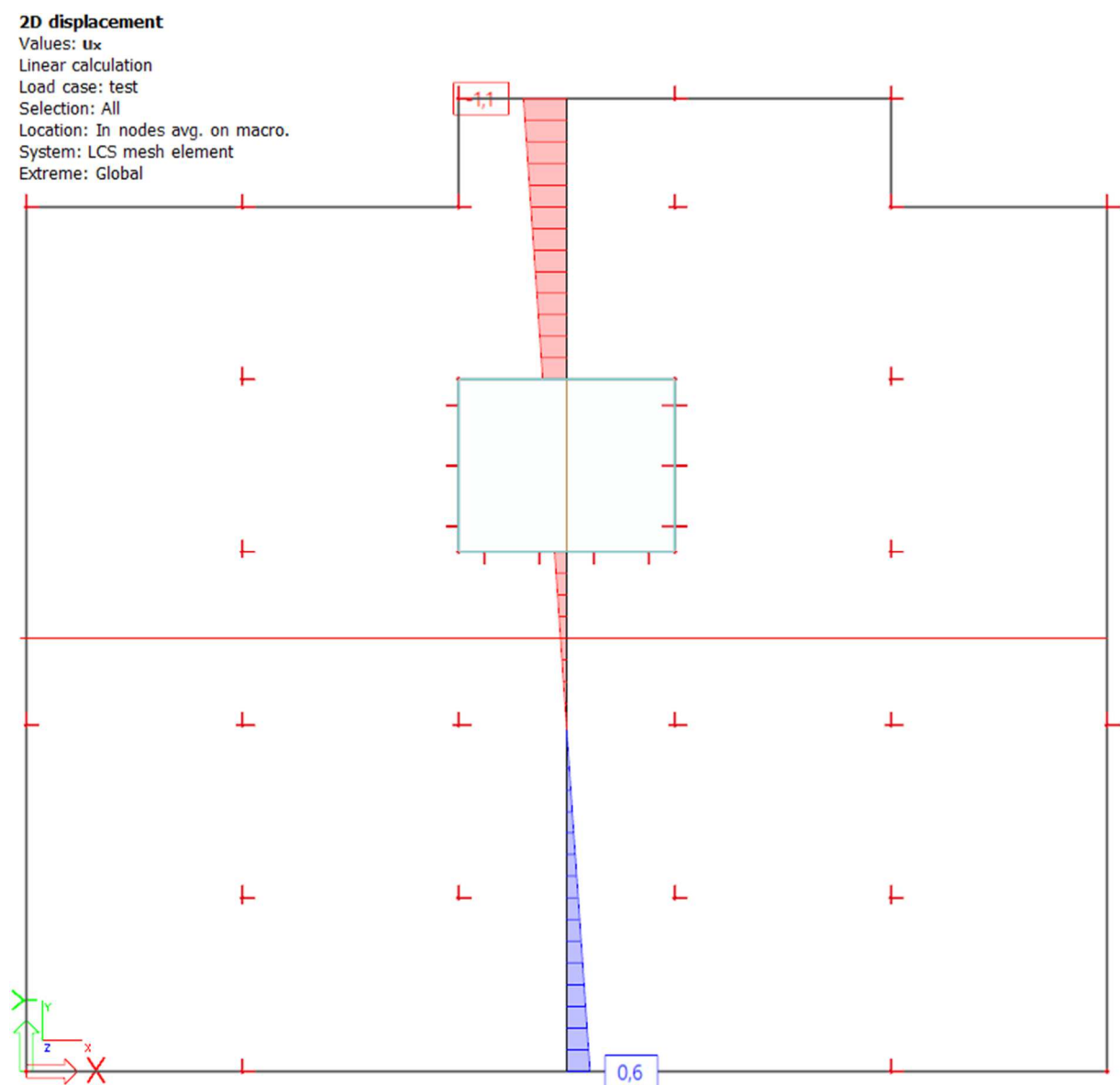
Slika 43. Shematski prikaz zadavanja rezne plohe

U slučaju sa slike 44 ravnina je definirana vektorom u smjeru osi z i pravcem u smjeru y-osi. (zadana je vertikalna ravnina u smjeru y-osi). Na slici 44 prikazan je pomak prve etaže (jer je ona opterećena) u x-smjeru na presjeku u polovici zgrade. Na slici 45 prikazan je pomak prve etaže (jer je ona opterećena) u y-smjeru na presjeku u polovici zgrade. Prema slici 44 y

koordinata centra krutosti etaže prizemlja iznosi: $y_{ck} = \frac{0,6}{0,6 - (-1,1)} \cdot 22,5 = 7,94 \text{ m}$.

Sa slike 45 je vidljivo da je x koordinata centra krutosti jednaka polovici duljine zgrade u x smjeru i iznosi 12,5 m. Koordinate centra krutosti u prizemlju su $CK_1(12,5 ; 7,94)$. Položaj centra masa ovisi o geometriji ploče, ali i o tlocrtnom rasporedu vertikalnih elemenata. Kada je raspored elemenata simetričan u tlocrtu, centar masa se nalazi u težištu ploče. Kada

raspored elemenata nije tlocrtno simetričan, centar masa se pomiče iz težišta ploče. Točan položaj može se odrediti ekvivalentno određivanju težišta poprečnog presjeka. Jedina razlika u postupku je što se umjesto površina uvrštavaju težine elemenata. Na višim etažama centar krutosti se prema slici 46 pomiče u točku $CK_2(12,5 ; 11,25)$. Potresna sila djeluje u centru masa, a zgrada se rotira oko centra krutosti. Zbog toga što se centar krutosti i centar masa ne poklapaju dolazi do rotacije zgrade i javlja se moment torzije. Nakon što je određen položaj centra krutosti, potrebno je smanjiti uzdužnu krutost ploče na stvarnu vrijednost tako da se označe sve ploče, a zatim vrijednost opcije „FEM model“ postavi na „isotropic“ (opcija je vidljiva na slici 35).



Slika 44. Pomak točaka ploče pozicije 300 u x smjeru

Napomena: pozicija 100 je temeljna ploča, pozicija 200 ploča između podruma i prizemlja, pozicija 300 je ploča između prizemlja i prvog kata itd.

2D displacement

Values: u_y

Linear calculation

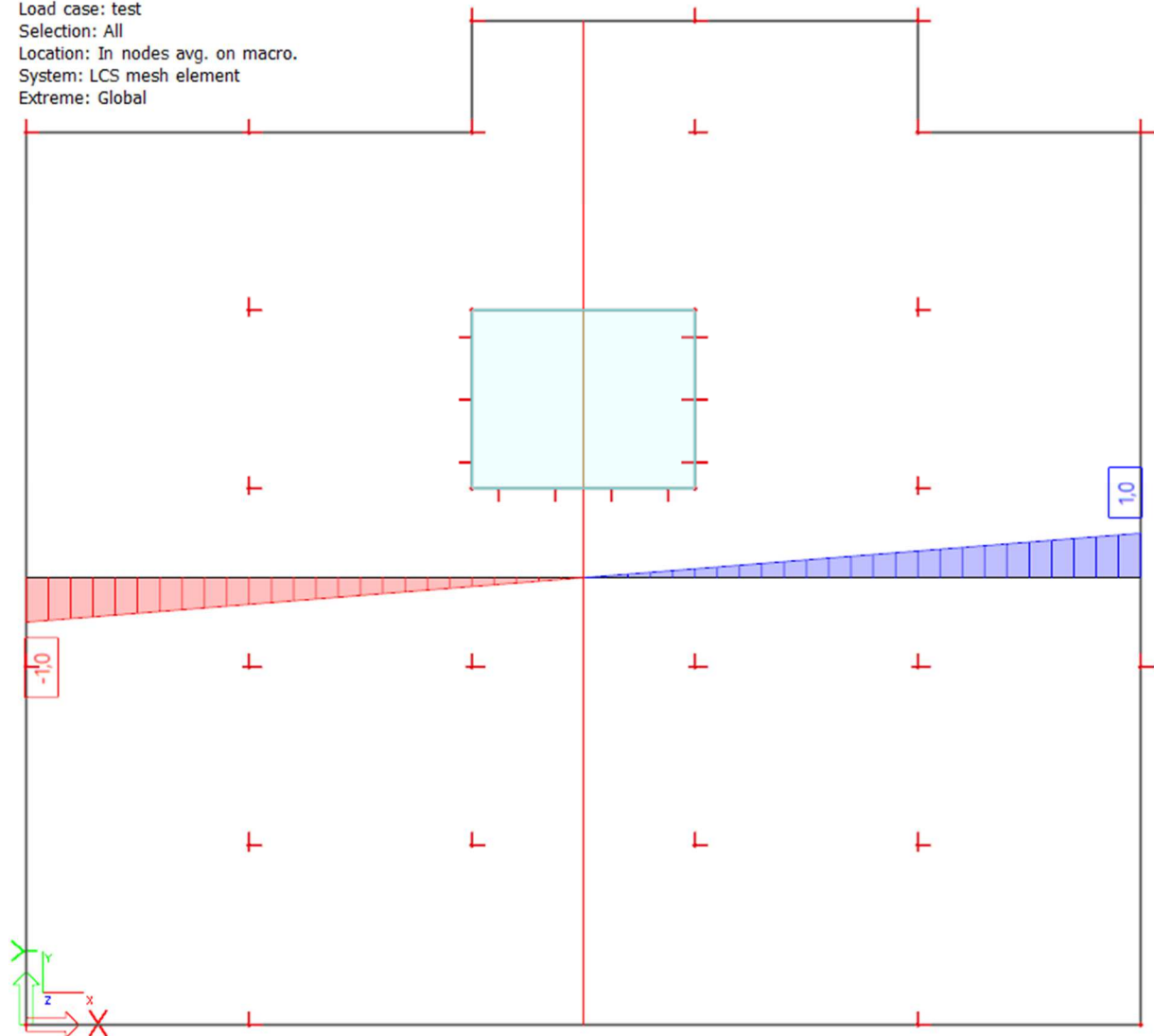
Load case: test

Selection: All

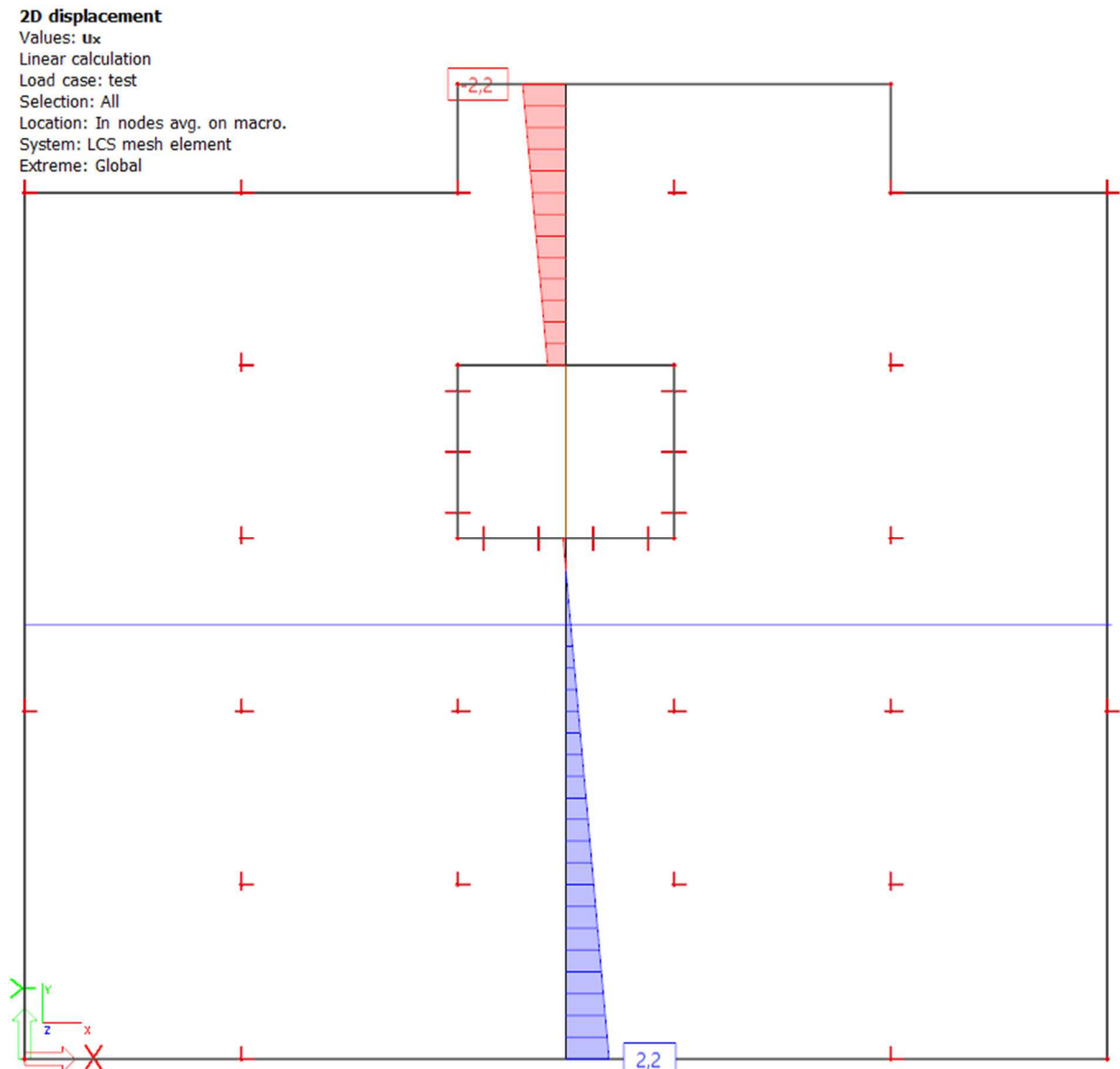
Location: In nodes avg. on macro.

System: LCS mesh element

Extreme: Global



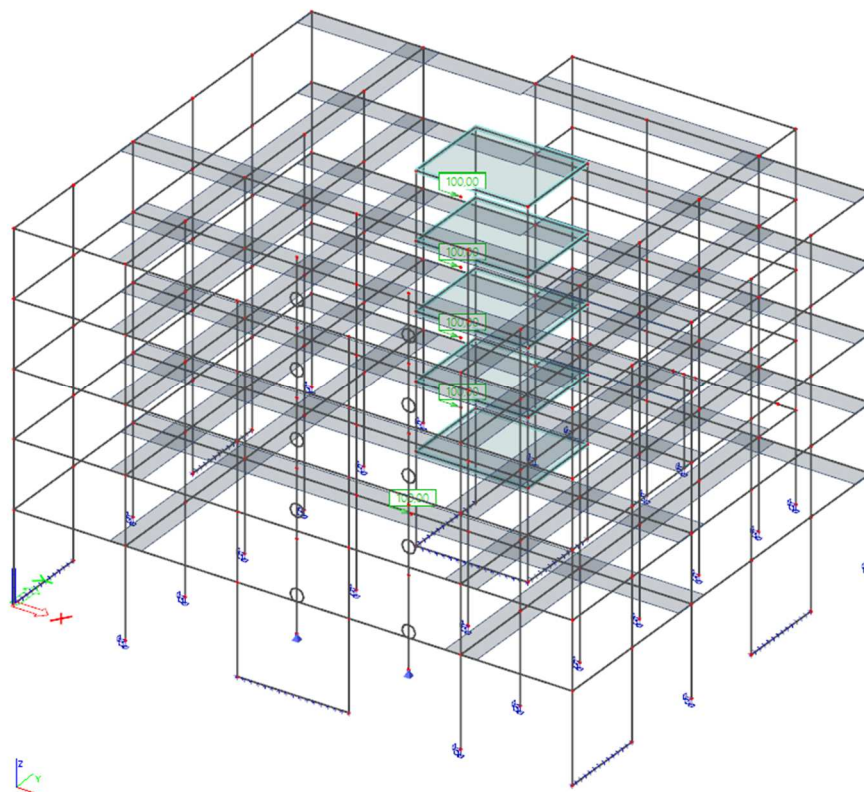
Slika 45. Pomak točaka ploče pozicije 300 u y smjeru



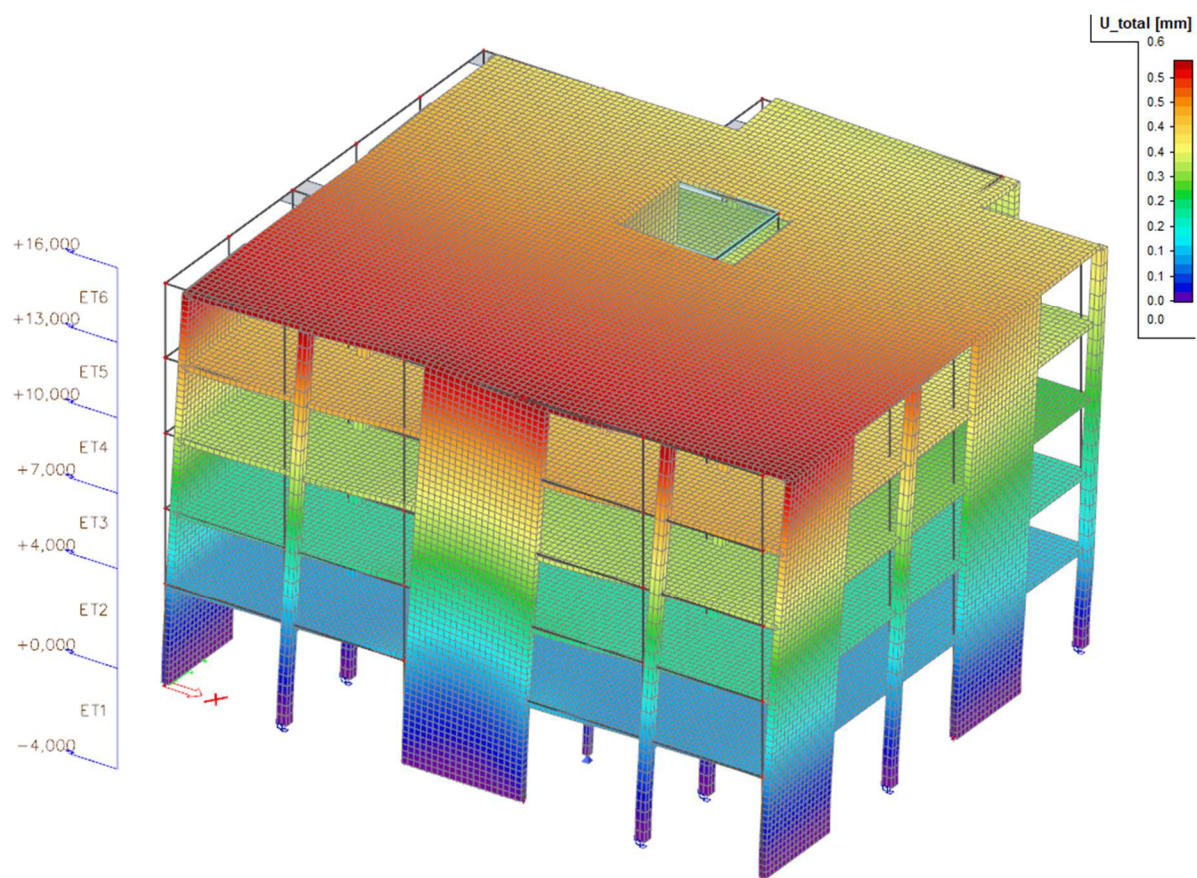
Slika 46. Pomak točka ploče pozicije 400 u x smjeru

Na slici 47 prikazana je konstrukcija opterećena silama iznosa 100 kN (vrijednost nije bitna) na svakoj etaži u centru krutosti. Na slici 48 prikazan je pomak prema kojem je vidljivo da se zgrada gotovo nimalo ne rotira. Postupak nije u potpunosti točan što je vidljivo iz blage rotacije ploča, ali je dovoljno precizan za većinu proračuna (čak i u ovom primjeru gdje je konstrukcija nepravilna po visini).

Kada se radi računalni proračun takve konstrukcije, nije potrebno ručno proračunavati položaj centra krutosti i centra masa jer su oni uzeti u obzir u računalnom modelu.



Slika 47. Proizvoljne sile u centru krutosti pojedine etaže



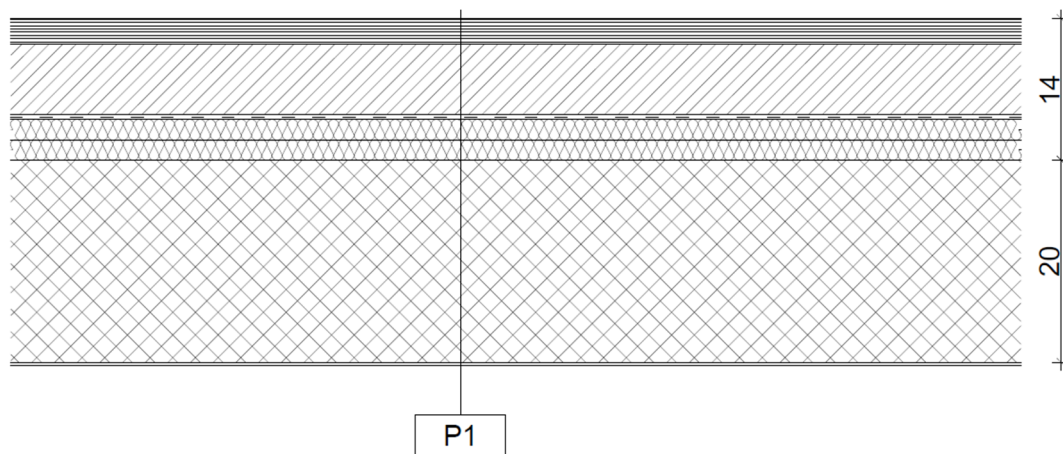
Slika 48. Pomaci konstrukcije zbog sila sa slike 47

2.4 Opterećenja

Promatra se ponašanje konstrukcije pod djelovanjem stalnog opterećenja, uporabnog i potresnog opterećenja. Djelovanje vjetra se zanemaruje jer je zgrada niska i armiranobetonska. Dominantno bočno djelovanje je seizmičko djelovanje (potres) pa se istovremeno djelovanje potresa i vjetra/snijega se ne razmatra.

2.4.1 Stalno i uporabno opterećenje

Stalno opterećenje sastoji se od vlastite težine i dodatnog stalnog opterećenja. Na slici 49 prikazan je presjek ploče karakterističnog kata s težinama slojeva, a ispod, u tablici 3 to opterećenje je i proračunano.



- završna podna obloga
drvena podna obloga (600 kg/m³) 2,5 cm
- mikroarmirani plivajući cementni estrih (2200 kg/m³)
fino zaglađen u izvedbi, armiran s vlaknima 7,0 cm
- pjenasta PE folija (50 kg/m³)
za prigušenje udarnog zvuka 0,5 cm
- ekspandirani polistiren EPS, ploče u dva sloja
s izmakom preklopa (30 kg/m³) 2,0+2,0 cm
- armiranobetonska stropna ploča (2500 kg/m³) 20,0 cm
- polimercementna žbuka
armirana mrežicom (2200 kg/m³) 0,3 cm

Slika 49. Slojevi karakteristične ploče

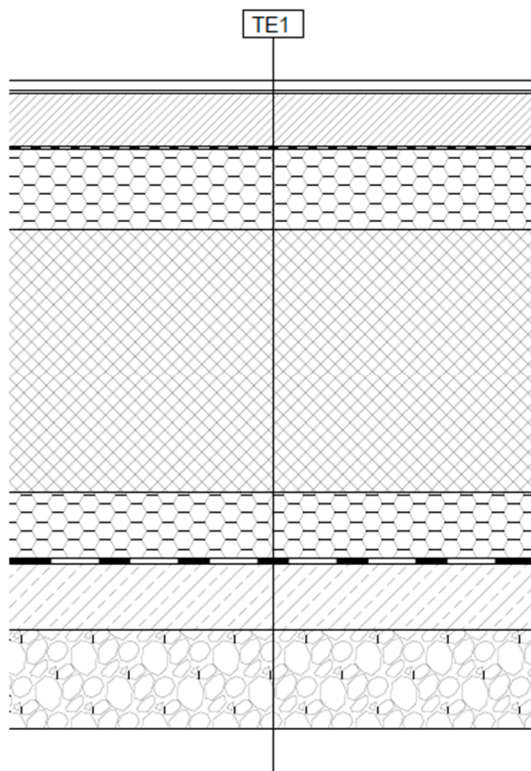
Tablica 3. Stalno opterećenje karakteristične ploče

sloj	debljina [cm]	gustoća [kg/m ³]	opterećenje [kN/m ²]
drvena obloga	2,5	600	0,15
cementni estrih	7	2200	1,54
PE folija	0,5	50	0,0025
EPS	4	30	0,012
AB ploča	20	2500	5
žbuka	0,3	2200	0,066
		Σ	6,7705

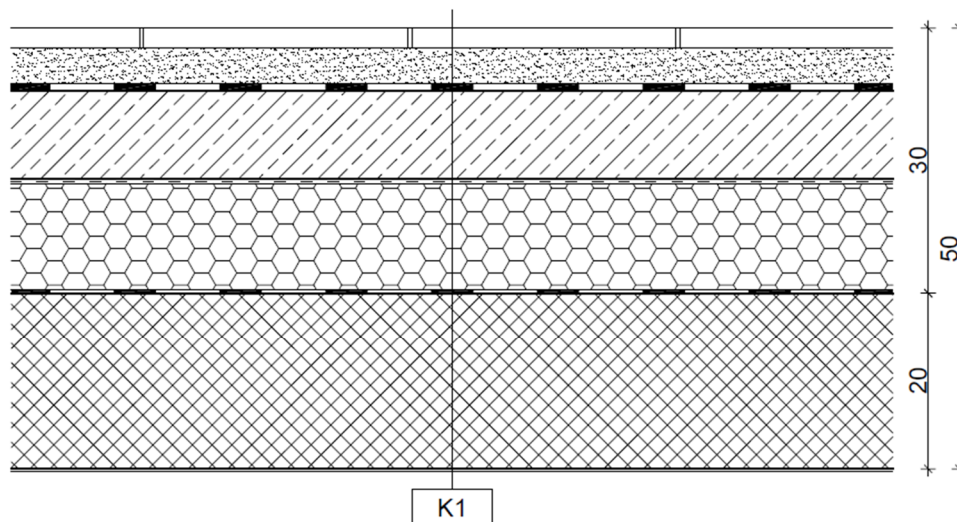
Težinu AB ploče program računa sam pa ju nije potrebno unositi. U program se unosi dodatno stalno opterećenje u iznosu $g_{ds,k} = 1,77 \text{ kN/m}^2$. Činjenica da hodnik ili određene prostorije imaju drugu podnu oblogu zanemaruje se u ovom primjeru. Slojevi temeljne ploče prikazani su na slici 50, a slojevi krova na slici 51. U skladu sa slikom 50 opterećenje na temelj iznosi $g_{te,k} = 4,77 \text{ kN/m}^2$. Podrum zgrade ne koristi se kao garaža, nego samo kao spremište.

(Napomena: šljunak se nije uračunavao kao opterećenje, nego kao oslonac, tj. tlo. Također, ploču opterećuju samo slojevi iznad nje, ali radi smanjenja broja kombinacija, armirat će se na isto opterećenje na koje se računa temelj. Predimenzioniranje temelja je prihvatljivo jer je bilo kakvo oštećenje temelja izrazito nepovoljno.)

- | | |
|---|--------|
| - završna podna obloga, punoplošno lijepljene protuklizne pločice (2200 kg/m ³) | 2 cm |
| - armirani plivajući cementni estrih (2200 kg/m ³) fino zaglađen u izvedbi, armiran s vlaknima | 8 cm |
| - pjenasta PE folija (50 kg/m ³), za prigušenje udarnog zvuka | 0,5 cm |
| - vodoneupojne ploče toplinske izolacije, ekstrudirani polistiren XPS 300, u jednom sloju (30 kg/m ³) | 12 cm |
| - armiranobetonska temeljna ploča (2500 kg/m ³), debljina prema statičkom proračunu | |
| - vodoneupojne ploče toplinske izolacije, ekstrudirani polistiren XPS 500, ploče za povećana opterećenja u jednom sloju (50 kg/m ³) | 10 cm |
| - višeslojna polimerbitumenska hidroizolacija (1000 kg/m ³) i hladni bitumenski prednamaz, dvije trake 2 x 0,4 cm | 0,8 cm |
| - zaglađena betonska podloga, lagano armirana (2400 kg/m ³) | 10 cm |
| - tlo, glina (1800 kg/m ³) | |



Slika 50. Slojevi temeljne ploče



- | | |
|---|----------|
| - završna podna obloga, kamene ploče (2700 kg/m ³) | 2,3 cm |
| - zbijeni pijesak (1800 kg/m ³) | 4 cm |
| - višeslojna polimerbitumenska hidroizolacija (1000 kg/m ³) i hladni bitumenski prednamaz, dvije trake 2 x 0,4 cm | 0,8 cm |
| - betonska ploča s padom 2% (2500 kg/m ³) | 15-25 cm |
| - pjenasta PE folija (50 kg/m ³), za prigušenje udarnog zvuka | 0,5 cm |
| - vodoneupojne ploče toplinske izolacije, ekstrudirani polistiren XPS 300, u jednom sloju (30 kg/m ³) | 12 cm |
| - parna brana | 0,4 cm |
| - armiranobetonska krovna ploča (2500 kg/m ³) | 20,0 cm |
| - polimercementna žbuka armirana mrežicom (2200 kg/m ³) | 0,3 cm |

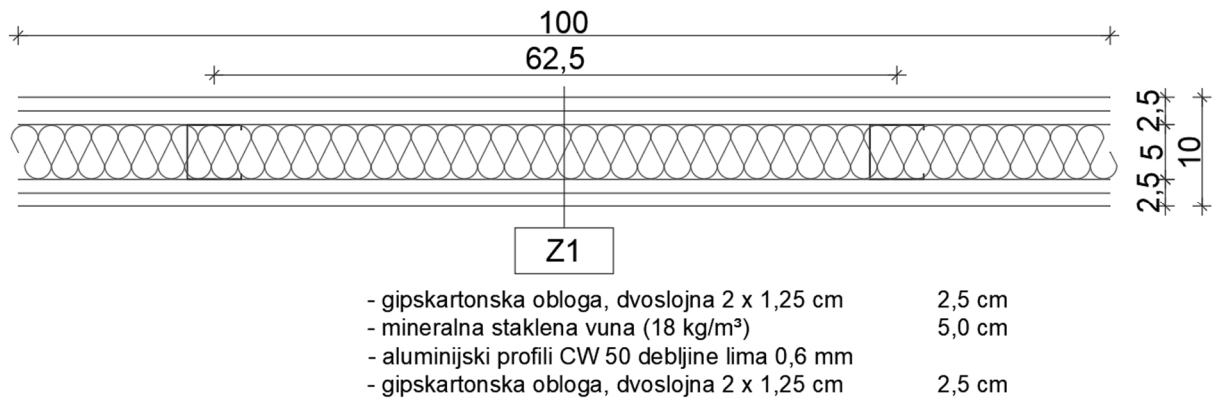
Slika 51. Slojevi krovne ploče

(Napomena: za opterećenje ploče zanemarena je vlastita težina, koja se automatski generira u programu. Kako je za odvodnju potreban nagib izvodi se gornja ploča pod nagibom od 2%. Za njezinu težinu uzeta je srednja vrijednost, a nagib se izvodi višestrešno. Plan nagiba krovne ploče radi odvodnje nije prikazan.)

U skladu sa slikom 51 dodatno stalno opterećenje na krov iznosi $g_{kr,k} = 4,03 \text{ kN/m}^2$.

Kao pregrade se koriste zidovi od gipskartonskih (knauf) ploča s dvoslojnom oblogom. Na slici 52 prikazan je karakteristični presjek zida. Iz kataloga proizvođača obloge masa zida bez izolacije (4 sloja obloge i aluminijska potkonstrukcija) iznosi $m_o = 45 \text{ kg/m}^2$. U skladu sa slikom 52 masa izolacije (mineralna staklena vuna) iznosi

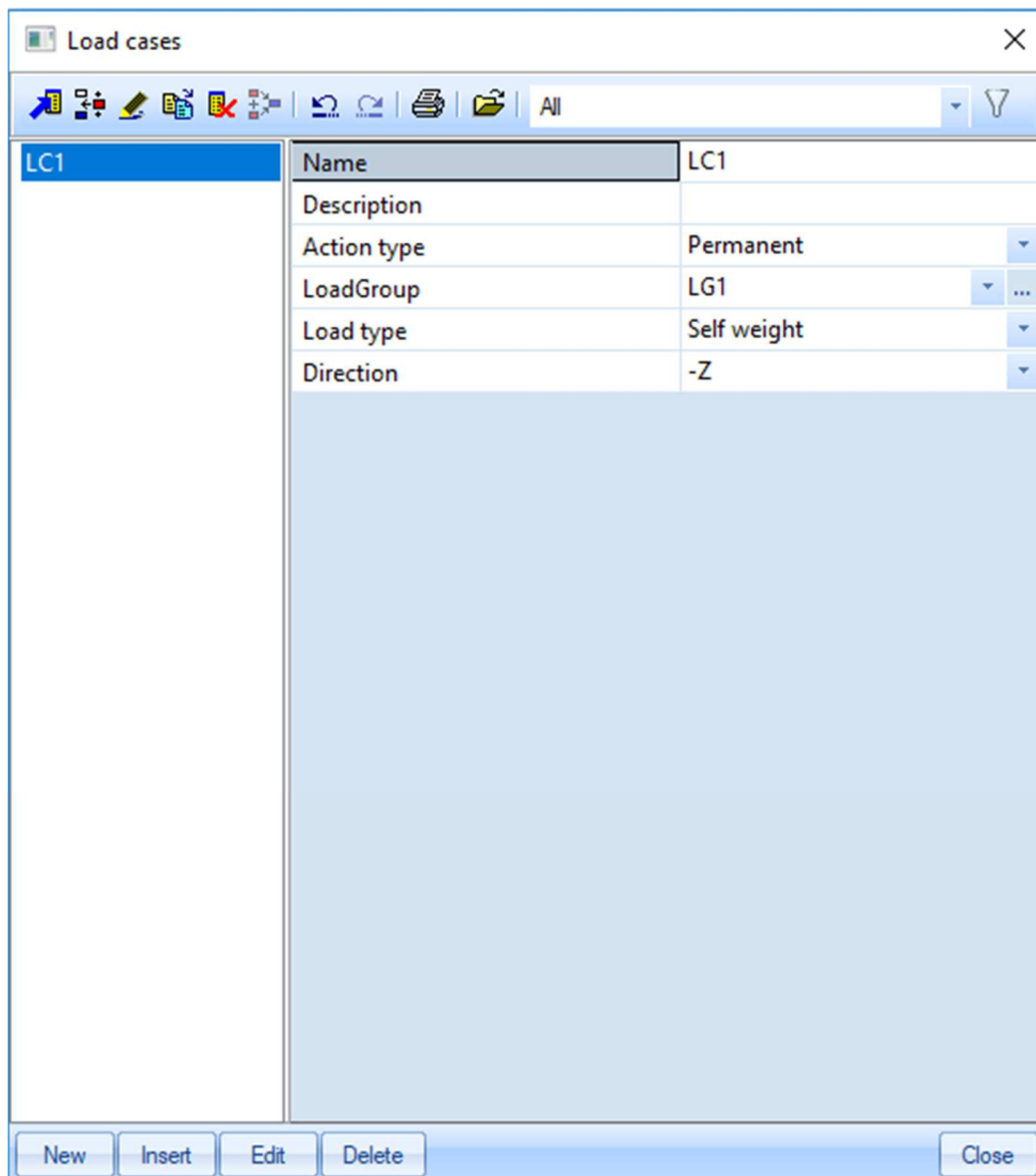
$$m_i = 18 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,05 \text{ m} = 0,9 \text{ kg/m}^2.$$



Slika 52. Slojevi knauf zida

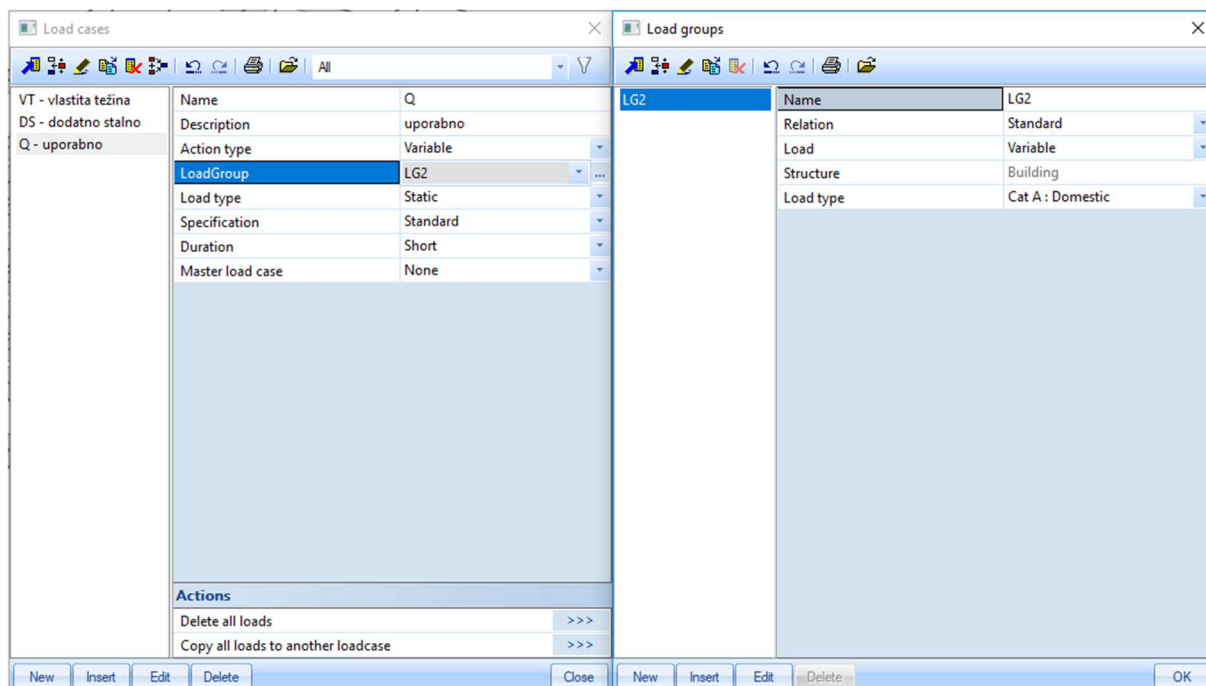
Ukupna masa pregradnog zida iznosi $m_{pz} = 45 + 0,9 = 45,9 \text{ kg/m}^2$. Visina pregradnih zidova prizemlja iznosi 3,8 m pa je masa pregradnog zida po metru dužnom zida $m_{pz} = 45,9 \cdot 3,8 = 174 \text{ kg/m}^1$, odnosno opterećenje iznosi $q_{pz} = 1,74 \text{ kN/m}^1$ (zidovi gornjih etaža su niži za 1 metar pa je opterećenje pregradnih zidova na tim etažama $1,29 \text{ kN/m}^1$). Kako je moguće tijekom životnog vijeka konstrukcije proizvoljno mijenjati položaj i broj pregradnih zidova njihovo stvarno linijsko opterećenje zamjenjuje se površinskim opterećenjem u skladu s normom EN 1991-1-1 [5], točka 6.3.1.2 i s knjigom Betonske konstrukcije 1 [6]. Linijska opterećenja iznosa između $1,0 \text{ kN/m}^1$ i $2,0 \text{ kN/m}^1$ mogu se zamijeniti površinskim opterećenjem u iznosu $q_{pz,k} = 0,8 \text{ kN/m}^2$ koje se smatra uporabnim. Uporabno opterećenje za poslovni prostor i stubišta iznosi za skladište (u podrumu) $q_{skl,k} = 5,0 \text{ kN/m}^2$ prema EN 1991-1-1:NA [7], tablica 6.1 i u skladu s knjigom [6], a za krov $s_k = 1,0 \text{ kN/m}^2$ (uporabno opterećenje ne kombinira se sa snijegom, a manje je).

U programu se opterećenja zadaju u izborniku „load“ koji se nalazi u glavnom izborniku. Pritiskom na izbornik „load“ prvi put, otvara se izbornik „load cases“ prikazan na slici 53.



Slika 53. Zadavanje slučajeva opterećenja

Prvi slučaj opterećenja vezan je za vlastitu težinu konstrukcije, što je vidljivo, jer opcija „load type“ ima vrijednost „self weight“. Za ime je dobro postaviti kraticu koja će biti razumljiva (npr. VT za vlastitu težinu), a zatim u opis, odnosno „description“ napisati punim riječima (vlastita težina). Opcijom „action type“ određuje se je li opterećenje stalno ili promjenjivo (što utječe na automatsko generiranje kombinacija). Pri zadavanju stalnih opterećenja ne treba voditi računa o opciji „load group“. Za promjenjiva opterećenja tom opcijom može se odrediti koja opterećenja djeluju istovremeno (bitno npr. za postavljanje šahovske raspodjele opterećenja). Pritiskom na tri točke pored opcije „load group“ otvara se novi izbornik prikazan na slici 54. Opcijom „relation“ definira se odnos opterećenja zadanih u toj grupi. U slučaju da je vrijednost „standard“ program kombinira opterećenja unutar grupe na sve moguće načine.



Slika 54. Grupe opterećenja

Odabirom vrijednosti „exclusive“ opterećenja se ne kombiniraju međusobno, već samo svako posebno sa stalnim opterećenjima. Opcijom „together“ sve opterećenja se kombiniraju i ne razmatraju se zasebno. Opcijom „load“ moguće je postaviti na vrijednost „variable“ što je standardno opterećenje, „accidental“ što je izvanredno ili „seismic“ što je potresno opterećenje. Opcijom „load type“ definira se kategorija opterećenja prema kojoj se automatski u skladu s normom, ovisno o vrsti kombinacije (GSN, GSU karakteristična, GSU nazovistalna...) opterećenja množe s prikladnim faktorima kombinacije (ψ_i).

U tablici 4 prikazane su kombinacije za granična stanja nosivosti i provjeru temeljnog tla za primjer s dva uporabna opterećenja kad je opcija „relation“ definirana kao „standard“ (kao na slici 54). Kako bi se vidjeli koeficijenti svih kombinacija, osnovna kombinacija rastavila se na linearne (što je objašnjeno kasnije). Vidljivo je da se u kombinacijama 4, 5, 7 i 8 razmatra svako uporabno opterećenje zasebno, a u kombinacijama 6 i 9 zajedno. Od svih 9 slučajeva program generira anvelopu. U tablici 5 prikazane su kombinacije pri istim opterećenjima, ali kad je odabrana opcija „together“, a u tablici 6 kad je odabrana opcija „exclusive“. U slučaju da su bila tri uporabna opterećenja, opcijom „standard“ kombiniraju se svako posebno, sva tri zajedno ili bilo koja dva. Za veći broj opterećenja veći je i broj kombinacija.

Tablica 4. kombinacije za GSN kad je odabrana opcija „standard“

Name	Description	Type	Load cases	Coeff. [-]
CO1		EN-ULS (STR/GEO) Set B	VT - vlastita težina	1,00
			DS - dodatno stalno	1,00
			Q - uporabno	1,00
			Q1 - uporabno	1,00
CO2		Linear - ultimate	VT - vlastita težina	1,35
			DS - dodatno stalno	1,35
CO3		Linear - ultimate	VT - vlastita težina	1,00
			DS - dodatno stalno	1,00
CO4		Linear - ultimate	VT - vlastita težina	1,35
			DS - dodatno stalno	1,35
			Q - uporabno	1,50
CO5		Linear - ultimate	VT - vlastita težina	1,35
			DS - dodatno stalno	1,35
			Q1 - uporabno	1,50
CO6		Linear - ultimate	VT - vlastita težina	1,35
			DS - dodatno stalno	1,35
			Q - uporabno	1,50
			Q1 - uporabno	1,50
CO7		Linear - ultimate	VT - vlastita težina	1,00
			DS - dodatno stalno	1,00
			Q - uporabno	1,50
CO8		Linear - ultimate	VT - vlastita težina	1,00
			DS - dodatno stalno	1,00
			Q1 - uporabno	1,50
CO9		Linear - ultimate	VT - vlastita težina	1,00
			DS - dodatno stalno	1,00
			Q - uporabno	1,50
			Q1 - uporabno	1,50

Tablica 5. kombinacije za GSN kad je odabrana opcija „together“

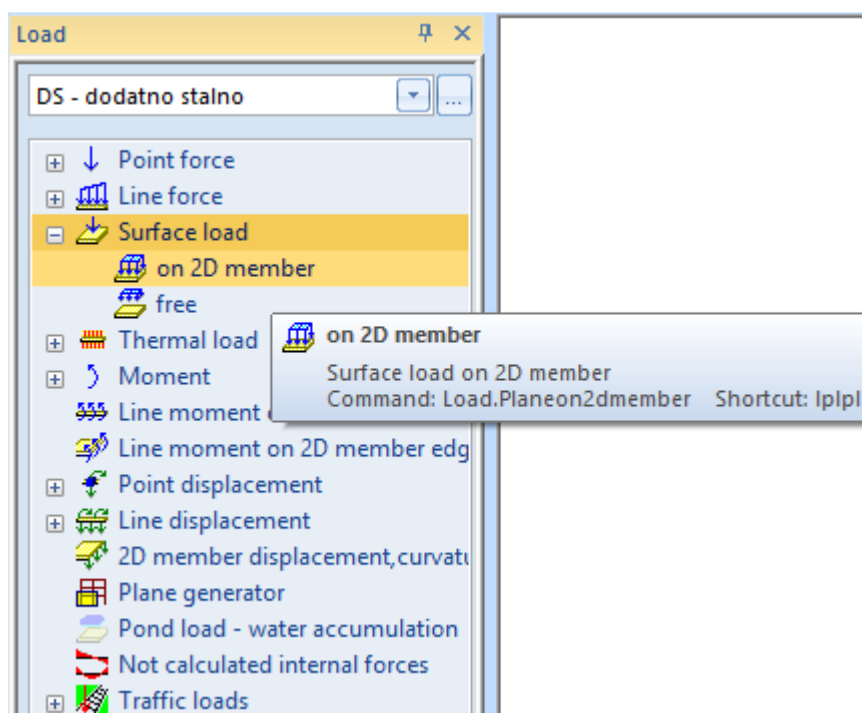
Name	Description	Type	Load cases	Coeff. [-]
GSN		EN-ULS (STR/GEO) Set B	VT - vlastita težina	1,00
			DS - dodatno stalno	1,00
			Q - uporabno	1,00
			Q1 - uporabno	1,00
GSN1		Linear - ultimate	VT - vlastita težina	1,35
			DS - dodatno stalno	1,35
GSN2		Linear - ultimate	VT - vlastita težina	1,00
			DS - dodatno stalno	1,00
GSN3		Linear - ultimate	VT - vlastita težina	1,35
			DS - dodatno stalno	1,35
			Q - uporabno	1,50
			Q1 - uporabno	1,50
GSN4		Linear - ultimate	VT - vlastita težina	1,00
			DS - dodatno stalno	1,00
			Q - uporabno	1,50
			Q1 - uporabno	1,50

Tablica 6. kombinacije za GSN kad je odabrana opcija „exclusive“

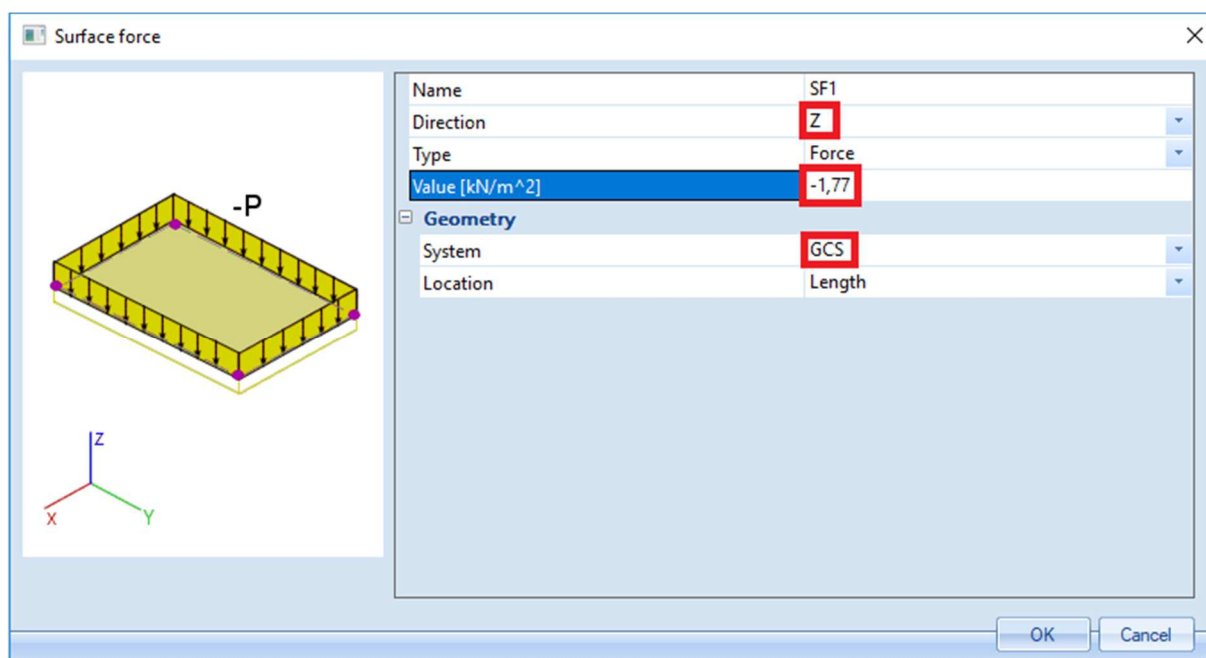
Name	Description	Type	Load cases	Coeff. [-]
GSN		EN-ULS (STR/GEO) Set B	VT - vlastita težina	1,00
			DS - dodatno stalno	1,00
			Q - uporabno	1,00
			Q1 - uporabno	1,00
GSN1		Linear - ultimate	VT - vlastita težina	1,35
			DS - dodatno stalno	1,35
GSN2		Linear - ultimate	VT - vlastita težina	1,00
			DS - dodatno stalno	1,00
GSN3		Linear - ultimate	VT - vlastita težina	1,35
			DS - dodatno stalno	1,35
			Q - uporabno	1,50
GSN4		Linear - ultimate	VT - vlastita težina	1,35
			DS - dodatno stalno	1,35
			Q1 - uporabno	1,50
GSN5		Linear - ultimate	VT - vlastita težina	1,00
			DS - dodatno stalno	1,00
			Q - uporabno	1,50
GSN6		Linear - ultimate	VT - vlastita težina	1,00
			DS - dodatno stalno	1,00
			Q1 - uporabno	1,50

Nakon što se definiraju grupe i slučajevi opterećenja, postavljaju se opterećenja na konstrukciju. Vlastita težina se automatski generira prema unesenoj geometriji i karakteristikama materijala. U taj slučaj opterećenja („load case“) nije moguće dodati nikakva druga opterećenja. Ostala opterećenja mogu se nanijeti plošno ili linijski. Unutar izbornika „load“ moguće je u padajućem izborniku odabrati slučaj opterećenja ili pritiskom na tri točke kreirati novi slučaj. Na slici 55 prikazan je odabir plošnog opterećenja.

U podizborniku „surface load“ odabire se opcija „on 2D member“. Tom opcijom opterećenje se nanosi jednoliko po cijeloj ploči. Opcijom „free“ moguće je nanijeti opterećenje na dio ploče, a također se tom opcijom odjednom može generirati projekcija opterećenja na više ploča što je korisno kod velikog broja ploča te kod nepravilnih ili kosih ploča ili pri složenijem opterećenju (od zemlje ili vode). Opcija „on 2D member“ ima prednost što se iz tako zadanih opterećenja automatski mogu generirati mase bitne za potresnu analizu. Opterećenja zadana opcijom „free“ ako ulaze u masu konstrukcije moraju se ručno unositi kao mase jer ih program ne uzima automatski. Nakon što se odabere opcija „on 2D member“ otvori se izbornik prikazan na slici 56. Crvenom bojom uokvirene su vrijednosti bitne za automatsko zadavanje masa. Opcija „direction“ treba biti odabrana u smjeru gravitacije (standardnim crtanjem to je uvijek opcija „z“). Vrijednost mora biti zadana tako da orijentacijski odgovara gravitacijskom djelovanju (dakle negativna), a sustav u kojem je opterećenje zadano mora biti globalni koordinatni sustav (GCS).



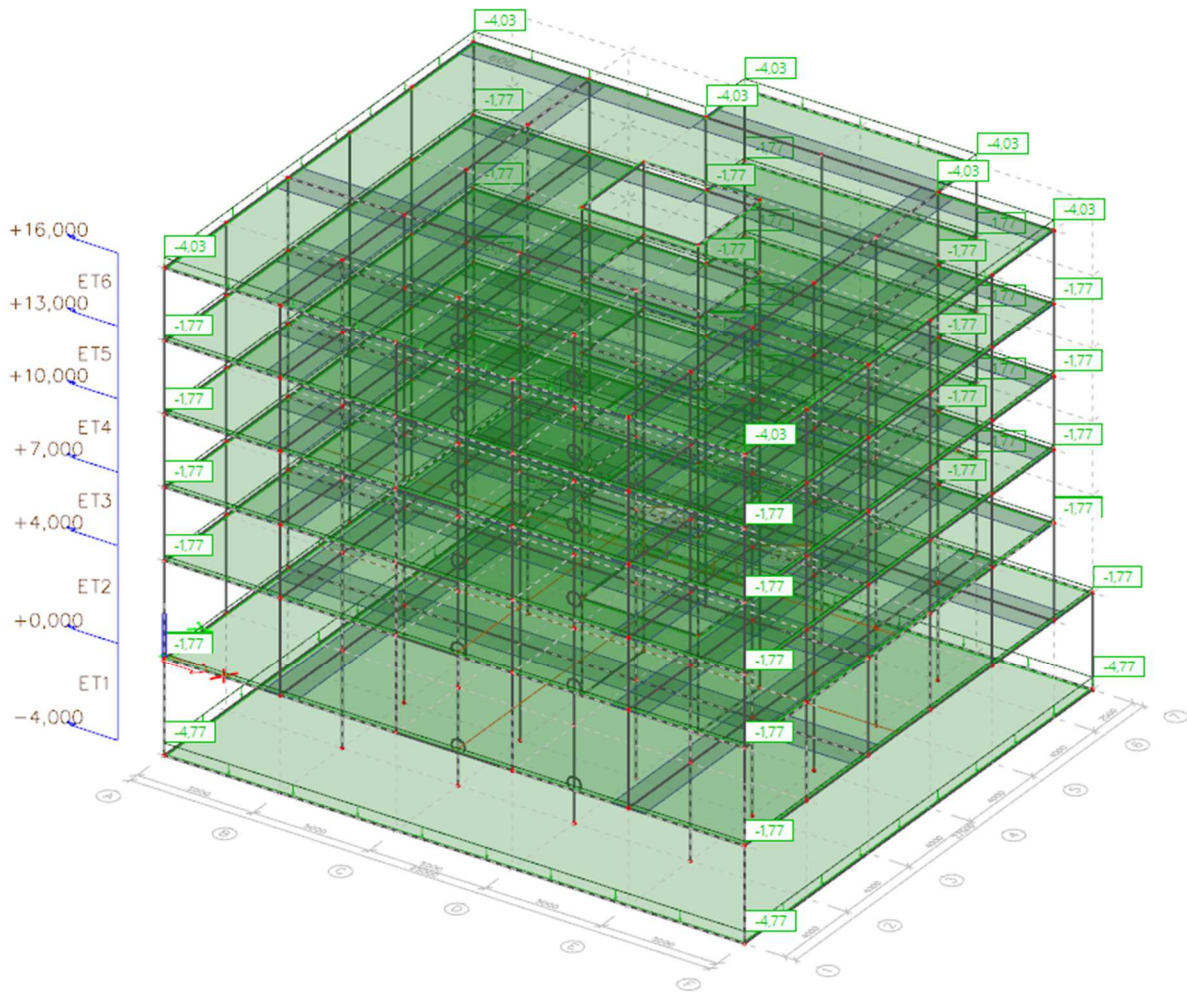
Slika 55. Zadavanje plošnog opterećenja



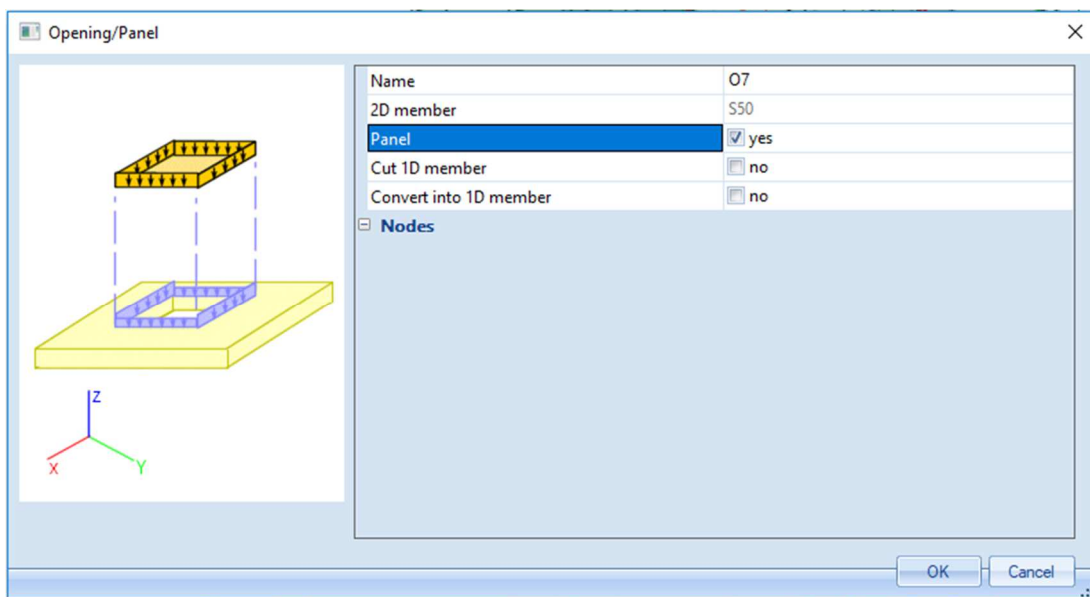
Slika 56. Opterećenje

Nakon pritiska na opciju „ok“ u izborniku sa slike 56 program zahtijeva odabir ploča na koje se opterećenje nanosi.

Prije nanošenja opterećenja u primjeru su postavljeni elementi podruma i temelj da se opterećenje zada i na te ploče. Prva pretpostavka debljine temeljne ploče je 40 cm. Na slici 57 prikazan je model sa zadanim dodatnim stalnim opterećenjem. Vidljivo je da nedostaju linijska opterećenja koja se prenose sa stubišta na rub otvora. Otvor se zadaje u izborniku „structure“, podizborniku „2D members“, „2D member components“ opcijom „opening“ što je vidljivo na slici 38. Nakon odabira opcije potrebno je označiti ploču na kojoj se nalazi otvor, nakon čega se otvara izbornik prikazan na slici 58. Označi li se opcija „panel“, dio opterećenja koji bi se nalazio na ploči prenosi se preko rubova što je vidljivo na slikama 58 i 59 (npr. reakcija stubišta koje nije u modelu).

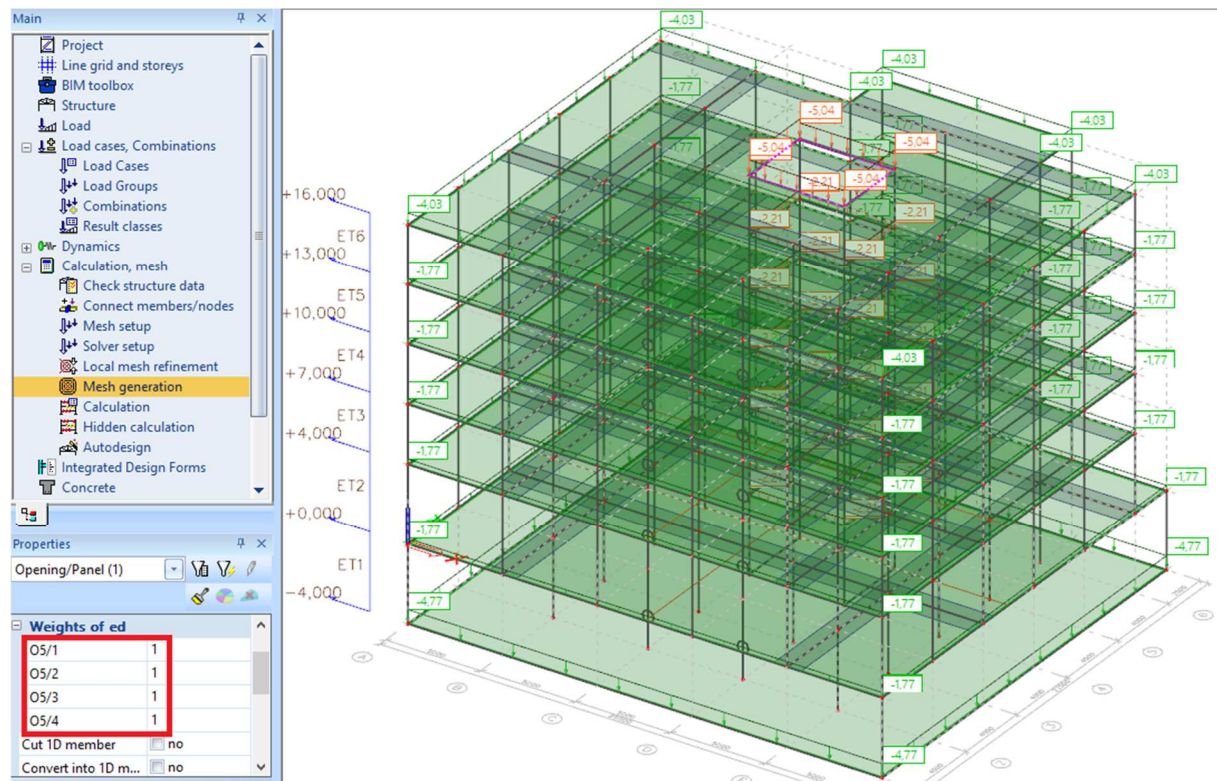


Slika 57. Dodatno stalno opterećenje



Slika 58. Zadavanje otvora

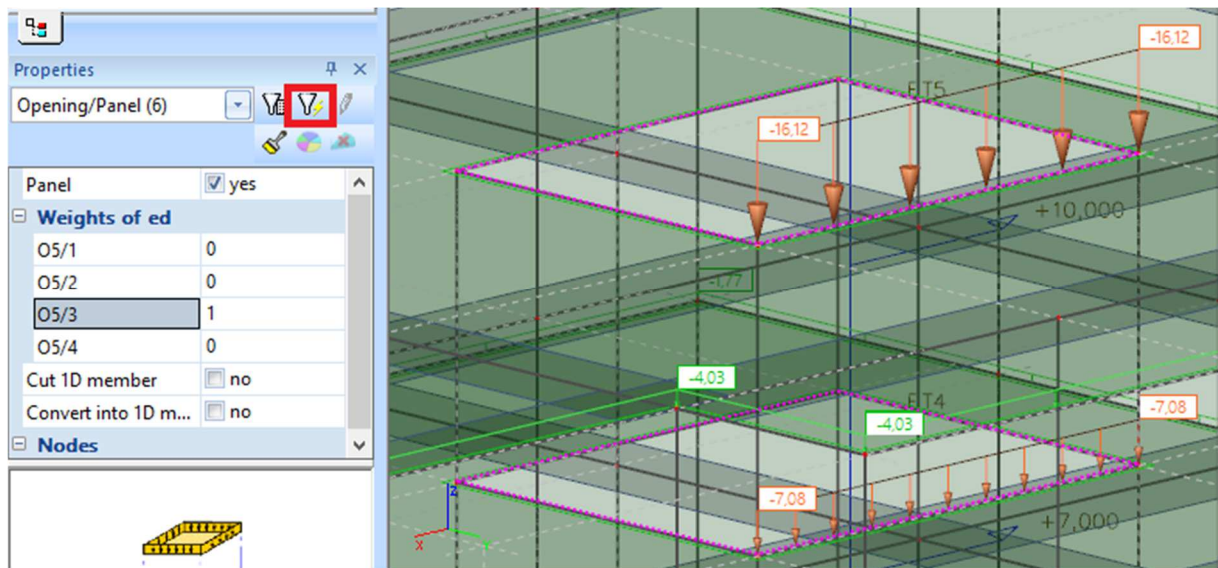
Nakon pritiska na opciju „ok“ zadaje se geometrija otvora. Linijsko opterećenje nije vidljivo u trenutku zadavanja opterećenja, nego tek pri generiranju mreže konačnih elemenata. Generiranje konačnih elemenata je opcija „mesh generation“ koja se nalazi u izborniku „calculation, mesh“ što je na slici 59 označeno žutom bojom. Veličina konačnih elemenata trenutno nije bitna, ali je bitna za proračun konstrukcije.



Slika 59. Opterećenje na otvorima

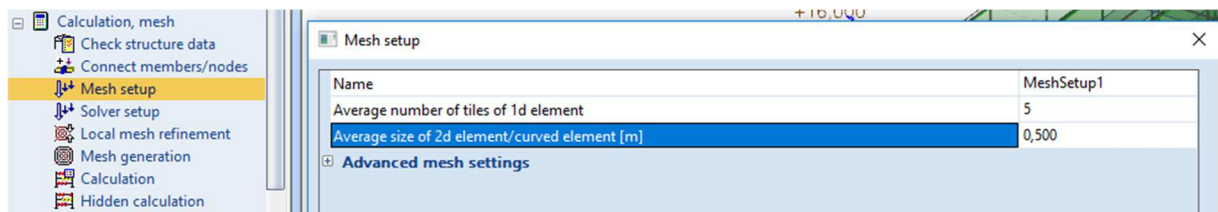
Iz slike 59 je vidljivo da se opterećenje s otvora prenosi na sva 4 ruba, a na istoj slici uokvireno crvenom bojom vidljivi su faktori „sudjelovanja“ pojedinog ruba u prijenosu opterećenja (izbornik „properties“ prilikom prvog pokretanja programa nalazi se s desne strane, a otvori se tek u trenutku kad se označi element, u ovom slučaju otvor). Prijenos opterećenja ovisi djelomično o oblikovanju stubišta, ali se u primjeru pretpostavlja da se svo opterećenje prenosi samo na slobodni rub ploče (koji nije oslonjen na zid) što se ostvaruje tako da se tri od četiri koeficijenta postave na vrijednost nula, a posljednji ostavi na jedan. Na slici 59 prikazana je postavka koeficijenata i generirano opterećenje. Radi jednostavnosti, moguće je prvo označiti sve otvore. Najprije se lijevom pritiskom miša označi opcija koja je zajednička svim otvorima (npr. to da su svi „panel“), ali tako da se pritisne na mjesto gdje piše „panel“, a ne gdje je kućica na kojoj je kvačicom moguće označiti „yes“ (dakle, na lijevi dio, a ne desni). Nakon toga se pritisne opcija crveno uokvirena na slici 60. Tako je moguće označiti sve slične elemente u

konstrukciji što je vrlo korisno (moguće je npr. označiti sve stupove pa pritisnuti opciju da se samo oni prikazuju). Time se mnogo jasnije mogu prikazati rezultati kompleksnijih sustava.



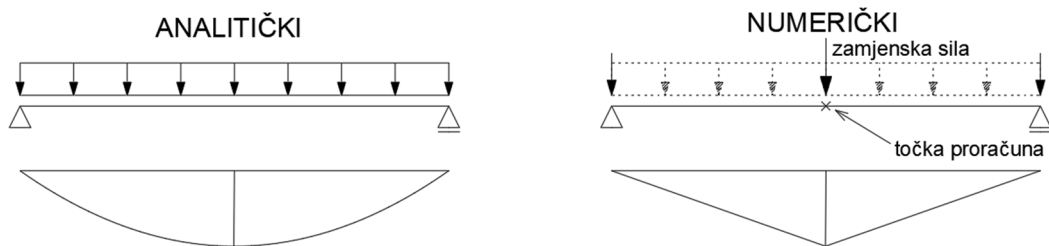
Slika 60. Opterećenje na jednom rubu otvora

Veličina konačnih elemenata namješta se u podizborniku „mesh setup“ koji se nalazi u izborniku „calculation, mesh“. Na slici 61 prikazan je izbornik s postavkom mreže.



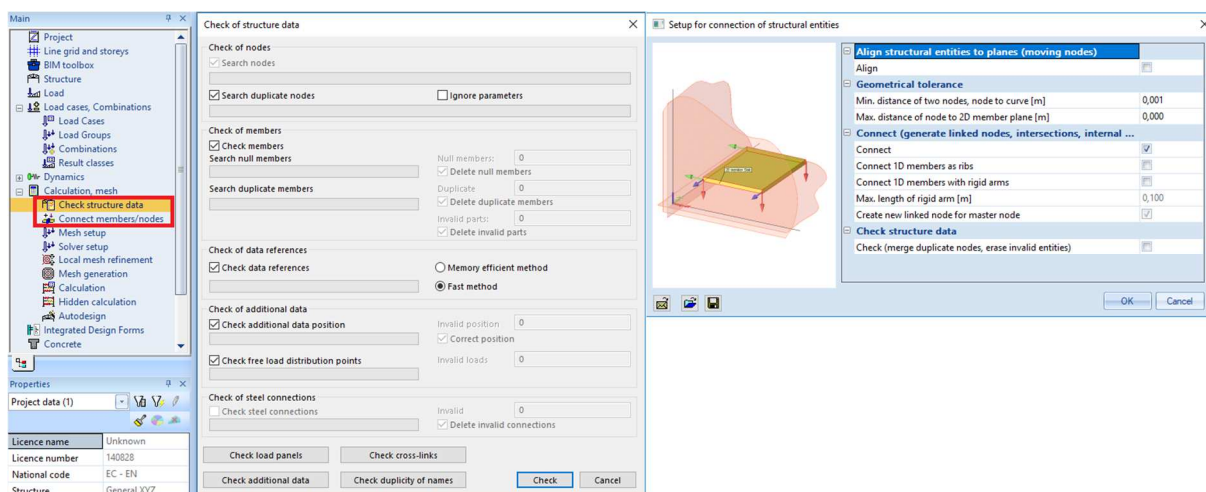
Slika 61. Postavke mreže konačnih elemenata

Opcijom „average number of tiles of 1d element“ podešava se prosječan broj konačnih elemenata štapnih elemenata. Početna vrijednost je „1“, ali je moguće povećati broj elemenata, što je korisno pri dinamičkoj ili nelinearnoj analizi (gdje je moguće više promjena zakrivljenosti, npr. viši oblici izvijanja štapa). U ovom slučaju odabire se vrijednost „5“. Opcijom „average size of 2d element“ postavlja se veličina konačnog elementa. U slučaju da je zadan premali broj elemenata (prevelik razmak) rezultati će biti netočni. Na slici 62 prikazan je primjer elementa s premalim brojem konačnih elemenata. Vidljivo je da oblik dijagrama ne odgovara stvarnom momentu savijanja (koji je na ovom primjeru analitički lako određen). U slučaju da je zadan prevelik broj konačnih elemenata mogu se javiti numerički problemi (npr. u blizini otvora ili ugla naprezanja rastu prema beskonačnosti što nije realno, materijal se ponaša plastično).



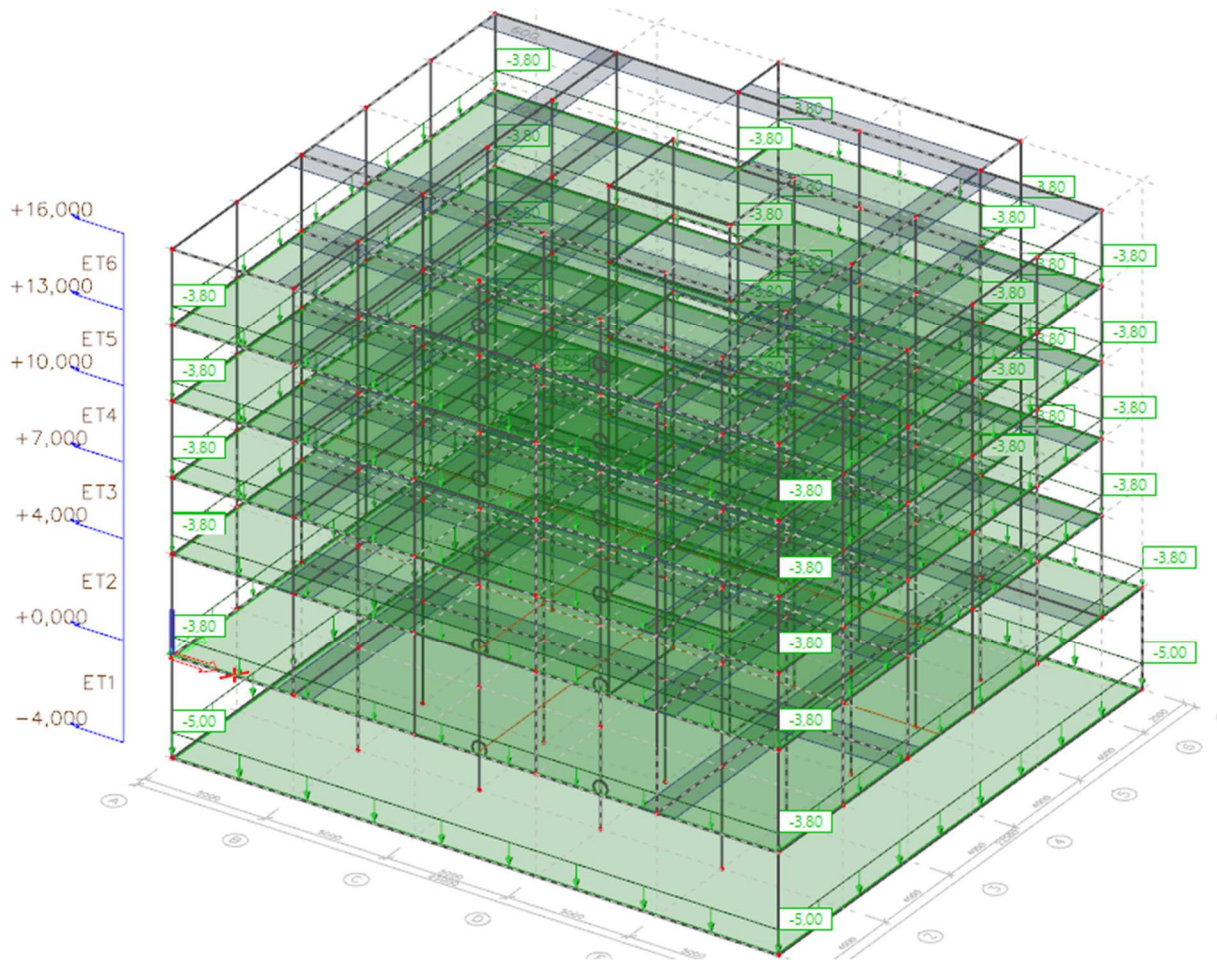
Slika 62. Usporedba analitičkog i numeričkog proračuna

Maksimalna veličina konačnog elementa trebala bi biti između debljine plošnog elementa i dvostruke vrijednosti njegove debljine. Dvostruka vrijednost debljine elementa može se odabrati za standardni proračun, dok se debljina elementa može odabrati pri modeliranju spojeva ili dijelova konstrukcije [8]. U slučaju većeg broja elemenata, može se pronaći vrijednost koja odgovara svim elementima (npr. ako je debljina karakteristične ploče 20 cm, a temelja 40 cm može se veličina konačnog elementa odabrati kao 40 cm). U ovom slučaju odabrana je veličina konačnog elementa 0,5 m (što je nešto veće od dvostruke debljine karakteristične ploče, ali je prihvatljivo). Broj konačnih elemenata unutar raspona trebao bi biti dovoljan (npr. barem pet elemenata) da se ne dogodi slučaj sa slike 62, odnosno da se sve unutarnje sile mogu prikazati relativno glatko. Prije nego što se provede proračun uputno je provjeriti konstrukciju opcijama „check structure data“ i „connect members/nodes“ u izborniku „calculation, mesh“ prikazane na slici 63. Navedenim opcijama se uklanjaju suvišne točke, povezuju stupovi i plošni elementi i slično. U slučaju da se prilikom proračuna javi upozorenje (warning) vjerojatno će se ukloniti ponovnim prolaskom kroz ove opcije. Isto vrijedi i u slučaju da su rezultati nesuvisli ili ih program ne prikazuje.



Slika 63. Opcije za provjeru konstrukcije

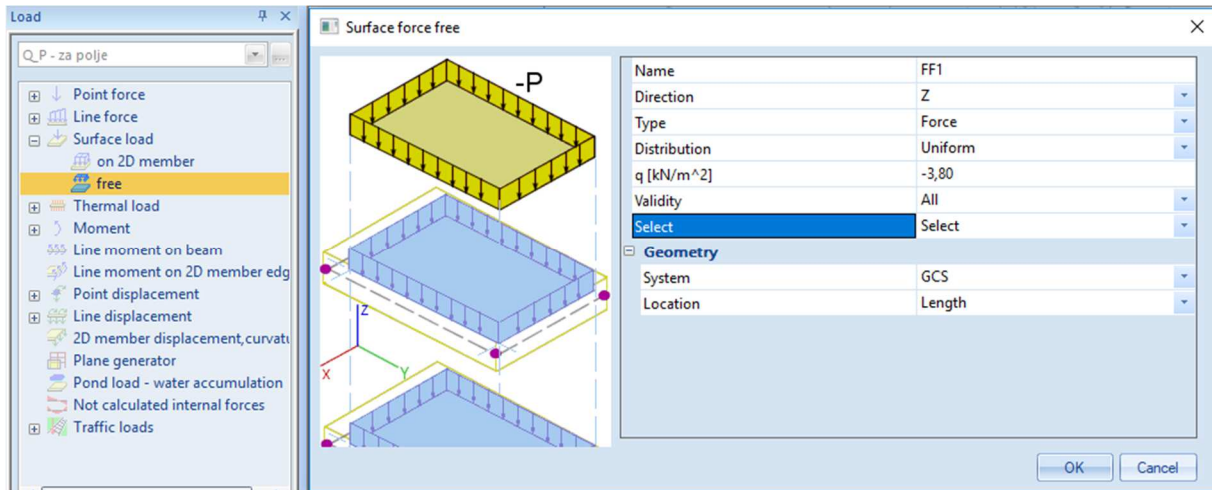
Na slici 64 prikazano je zadavanje uporabnog opterećenja (bez snijega) na konstrukciju (prijenos opterećenja stubišta sam se generira kao prema slici 60).



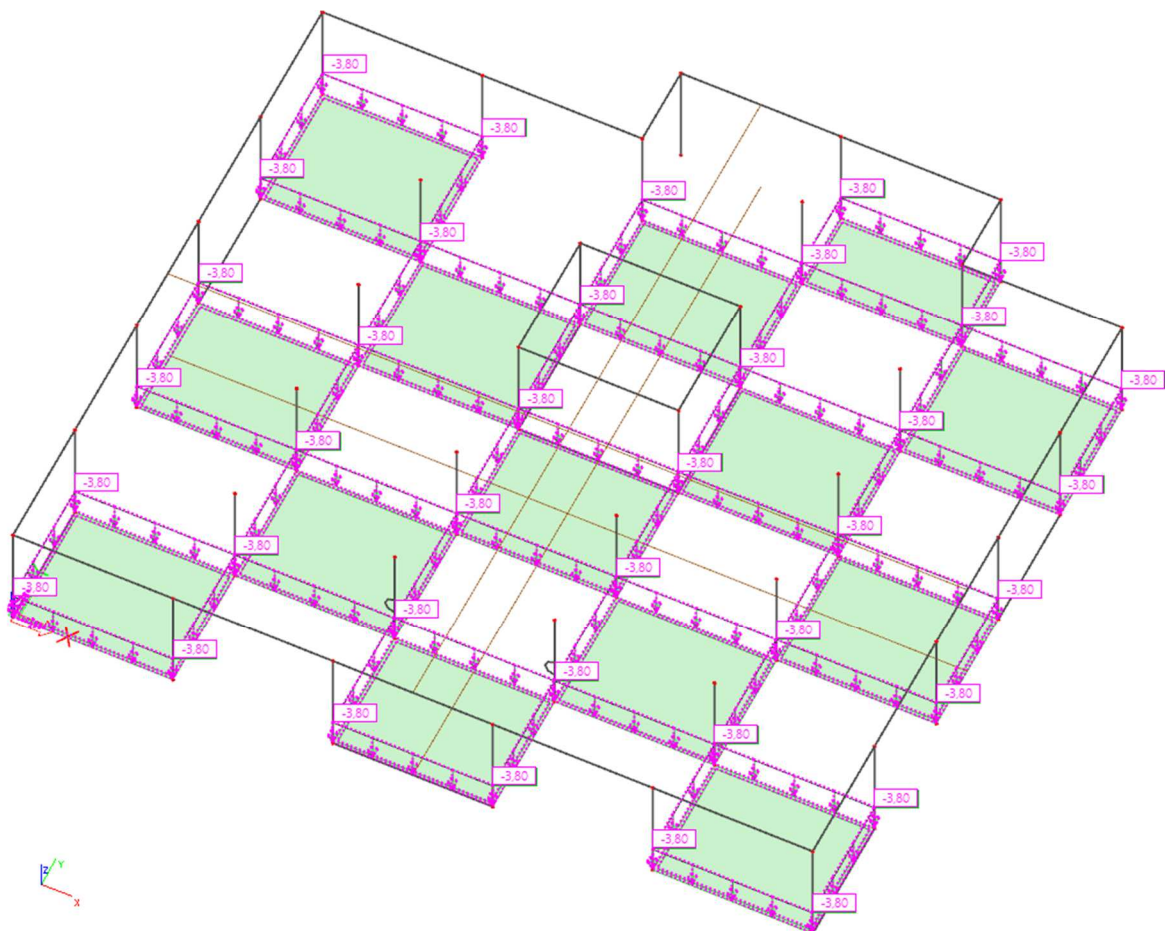
Slika 64. Uporabno opterećenje preko svih polja

Zadavanje šahovskog opterećenja potrebno je za određivanje armature ploče pri čemu je potrebno napraviti anvelopu svih kombinacija. Opterećenje na dio ploče postavlja se opcijom „free“ u podizborniku „surface load“ sa slike 55. Nakon odabira opcije otvara se izbornik sa slike 65. Razlika u odnosu na zadavanje opterećenja „on 2d member“ je u tome što je ovom opcijom moguće zadati promjenjivo opterećenje (npr. bočno opterećenje vode ili tla) opcijom „distribution“ i opterećenje na samo dio ploče. Osim toga, opcijom „select“ može se automatski generirati opterećenje na sve ploče iznad ili ispod mjesta zadavanja opterećenja ili se mogu označiti ploče na koje će se generirati opterećenje. Odabire se druga opcija (opcija „select“ vidljiva na slici 65) jer se šahovska raspodjela postavlja samo na promatranu etažu, a na ostale se postavlja jednoliko opterećenje prema [5], točka 6.2.1. Kako nije točno poznat raspored prostorija u poslovnom prostoru, pretpostavlja se da su polja dimenzija 5 m × 4 m (prema rasteru vertikalnih elemenata) te se opterećenje postavlja šahovski po tim poljima. Na slici 66 prikazano je šahovski raspoređeno opterećenje. Kako je potrebno postaviti opterećenje samo na jednu ploču potrebno je svako opterećenje označiti zasebno. Zatim se odabire opcija

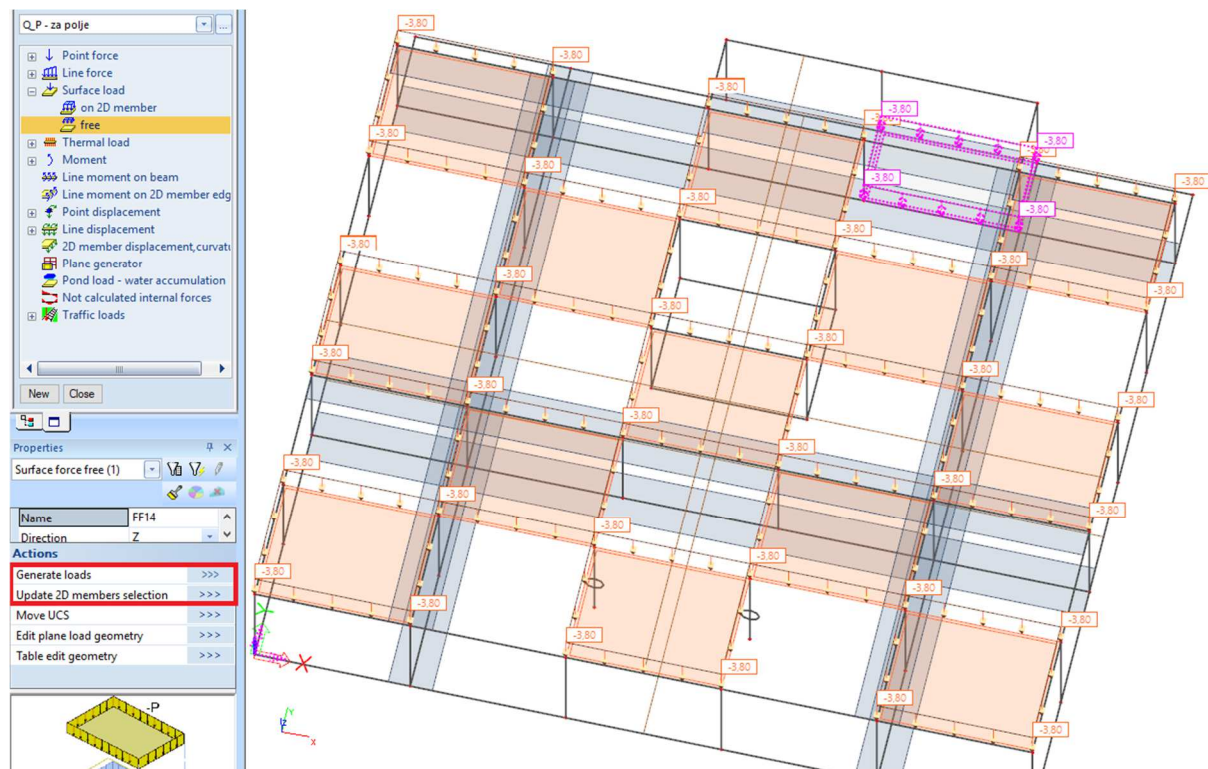
„update 2d member selection“ i odabire se ploča/ploče na koje je potrebno generirati opterećenje. Nakon toga se odabirom opcije „generate loads“ opterećenje generira i poprima smeđu (ili narančastu) boju. Postupak je prikazan na slici 67.



Slika 65. Zadavanje slobodnog opterećenja



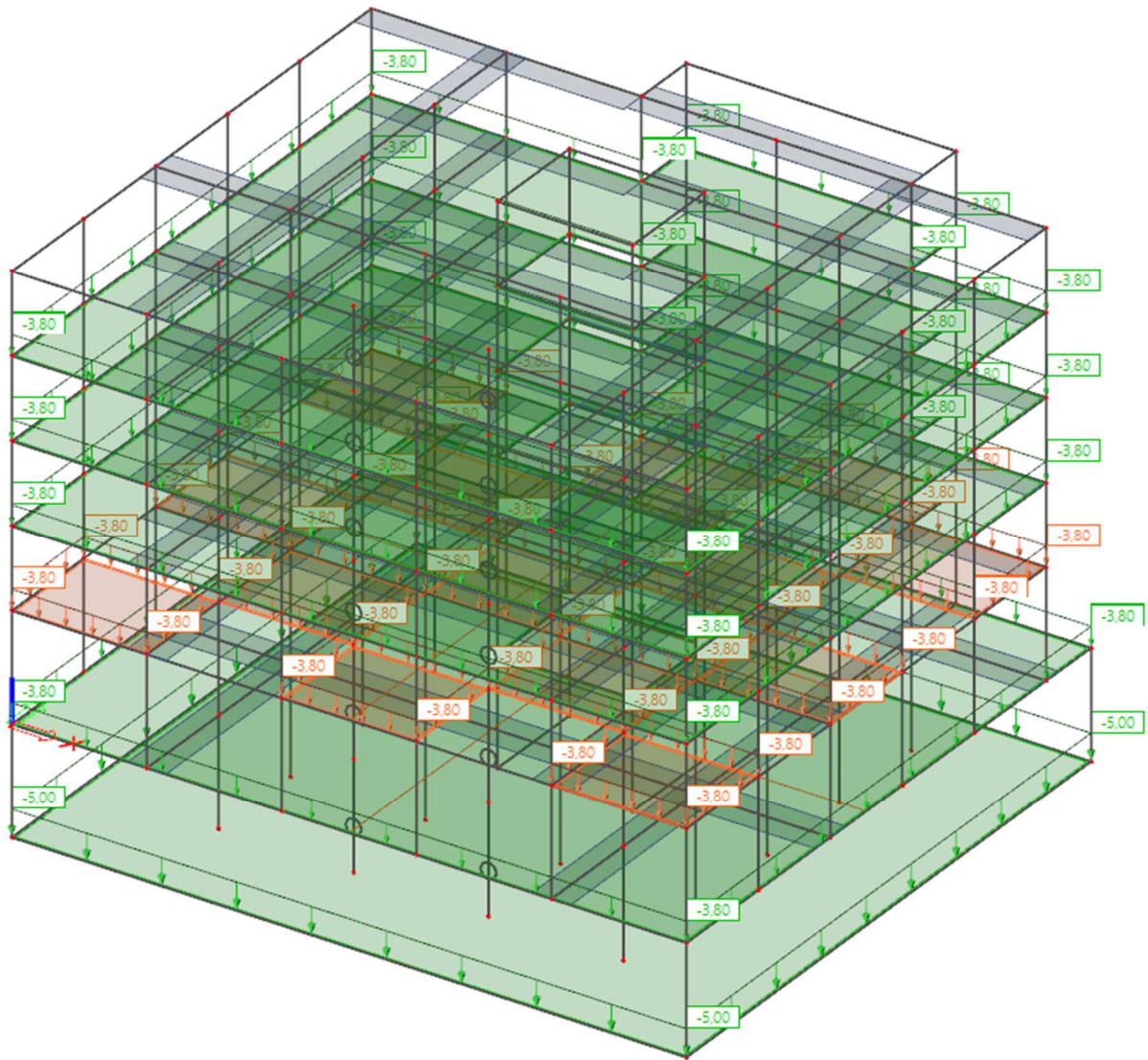
Slika 66. Šahovski raspored opterećenja



Slika 67. Generiranje opterećenja

Na slici 68 prikazano je uporabno opterećenje na cijeloj konstrukciji za dimenzioniranje polja ploče. Suprotno šahovsko opterećenje nije prikazano jer je princip jednak, a broj kombinacija bi bio veći. Sve ostale ploče su jednake (osim ploča temelja i prizemlja) pa se armiraju jednako (samo će se temelj drukčije armirati). Nakon što su zadana statička opterećenja potrebno je zadati mase, provesti modalnu analizu i odrediti potresna opterećenja.

Prikazani postupak šahovske raspodjele opterećenja koristan je za provjeru graničnog stanja nosivosti pojedine stropne ploče, a za potresnu kombinacije se ne koristi. Pri potresnim kombinacijama opterećenja se pretpostavlja da je opterećenje jednoliko raspodijeljeno po cijeloj ploči.



Slika 68. Šahovsko uporabno opterećenje za cijelu konstrukciju

2.4.2 Imperfekcije sustava

U proračunu konstrukcije moraju se uzeti u obzir geometrijske nesavršenosti (imperfekcije), uglavnom uzrokovane zbog zakrivljenosti stupova pod djelovanjem opterećenja, rubnih uvjeta, temperaturnih promjena i sl. Imperfekcije su, u skladu s normom EN 1992-1-1 [1], točka 5.2] i knjigom Betonske konstrukcije 2 [9], uzete u obzir kutem θ , odnosno otklonom od vertikale:

$$\theta_i = \theta_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m = \frac{1}{200} \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m \quad (2.1)$$

Gdje je: θ_0 osnovna vrijednost nagiba, preporučuje se $\theta_0 = 1/200$
 α_h $\alpha_h = 2/\sqrt{l}$; $2/3 \leq \alpha_h \leq 1,0$
faktor smanjenja za duljinu ili visinu gdje je l u m

$$\alpha_m = \sqrt{0,5(1 + 1/m)}$$

faktor smanjenja za broje elemenata m , koji pridonose ukupnom učinku

U navedenom primjeru l je ukupna visina konstrukcije, od razine tla, odnosno 16 m. Prema tome, slijedi da je: $\alpha_n = 2 / \sqrt{16} = 0,5 < 2 / 3 \rightarrow \alpha_n = 2 / 3$.

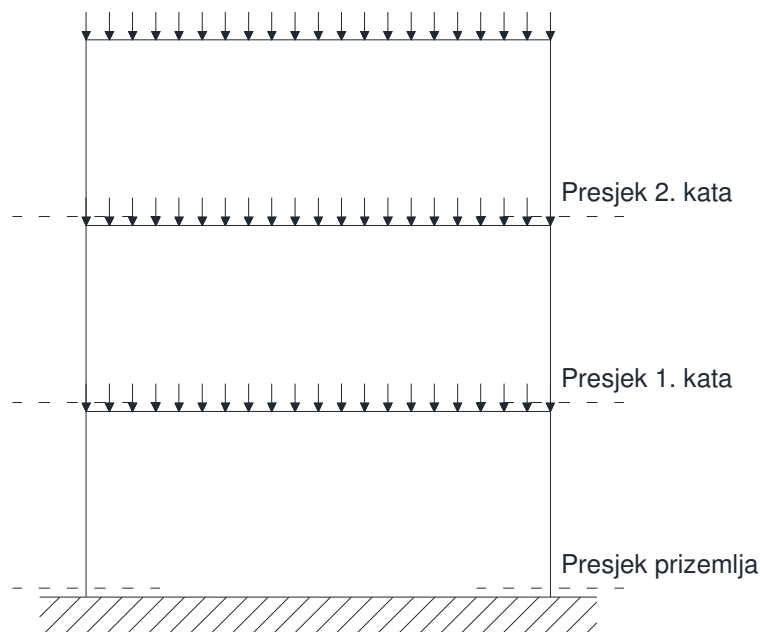
Broj elemenata m uzima se kao broj elemenata koji preuzimaju silu veću od 70 % prosječne vertikalne sile na etaži, koja se dobije tako da se ukupna vertikalna sila na jednoj etaži podijeli s ukupnim brojem vertikalnih elemenata – zidova i stupova (prema knjizi Stahlbeton – Projekt [10]).

Specifičnost ove konstrukcije je nejednaki broj vertikalnih elemenata po etažama. Konstrukcija ima 33 elementa u prizemlju i 31 element u ostalim etažama.

Kako bi se dobio broj elemenata m , promatra se jedna etaža (1.kat) sa pripadajućim vertikalnim elementima i veličini uzdužnih sila u njima. Mogla se promatrati i etaža prizemlja, ali ona ima veći broj elemenata, a povećanjem broja m , smanjuje se faktor α_m , čime se ujedno i smanjuje nagib θ , odnosno na kraju i veličina bočne sile od imperfekcija ΔH_j . Iz istog razloga ne uzima se ukupan broj vertikalnih elemenata, nego onaj broj elemenata koji preuzimaju silu veću od 70% prosječne sile na katu, čime se dobije manji broj elemenata.

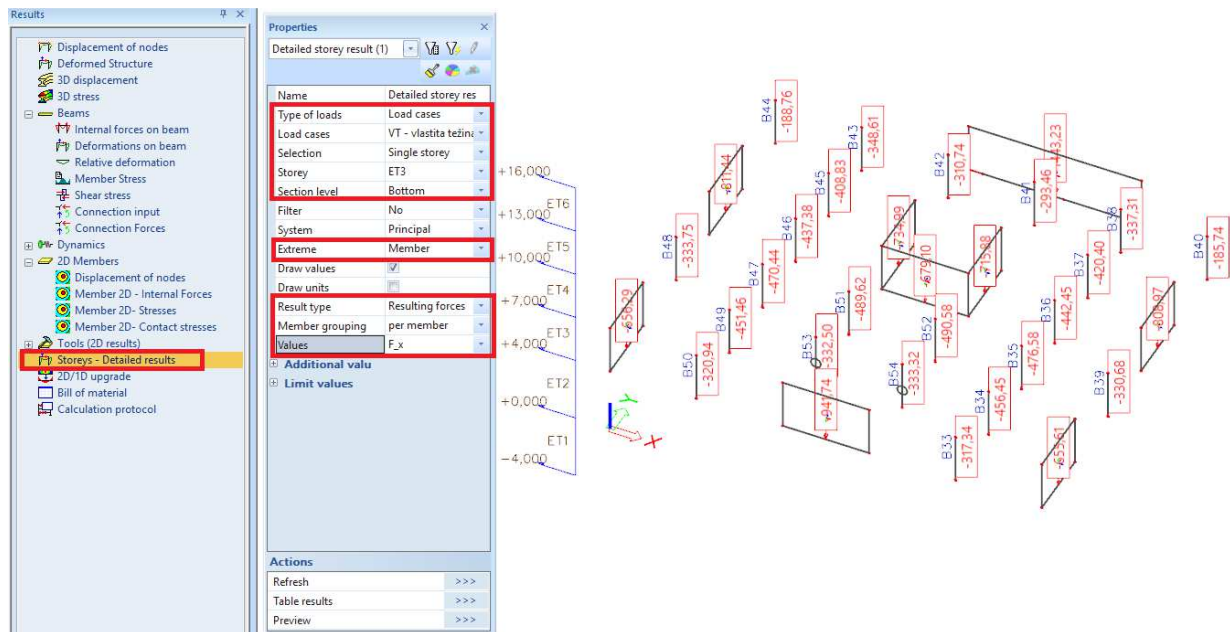
Kako bi se utvrdila sila koju preuzima pojedini element promatra se presjek vertikalnih elemenata na dnu, kao što je prikazano na slici 69. Time se veličina unutarnje sile u mjerodavnom presjeku određuje opterećenjem koje se nalazi na etaži iznad i težinom samog elementa.

Sile u elementima promatraju se odvojeno za vlastitu težinu, dodatno stalno i promjenjivo opterećenje kako bi se u konačnici dobile bočne sile H_i od imperfekcija za svako pojedino opterećenje, zbog različitih vrijednosti parcijalnih faktora sigurnosti za stalno i promjenjivo opterećenje u kombinacijama.

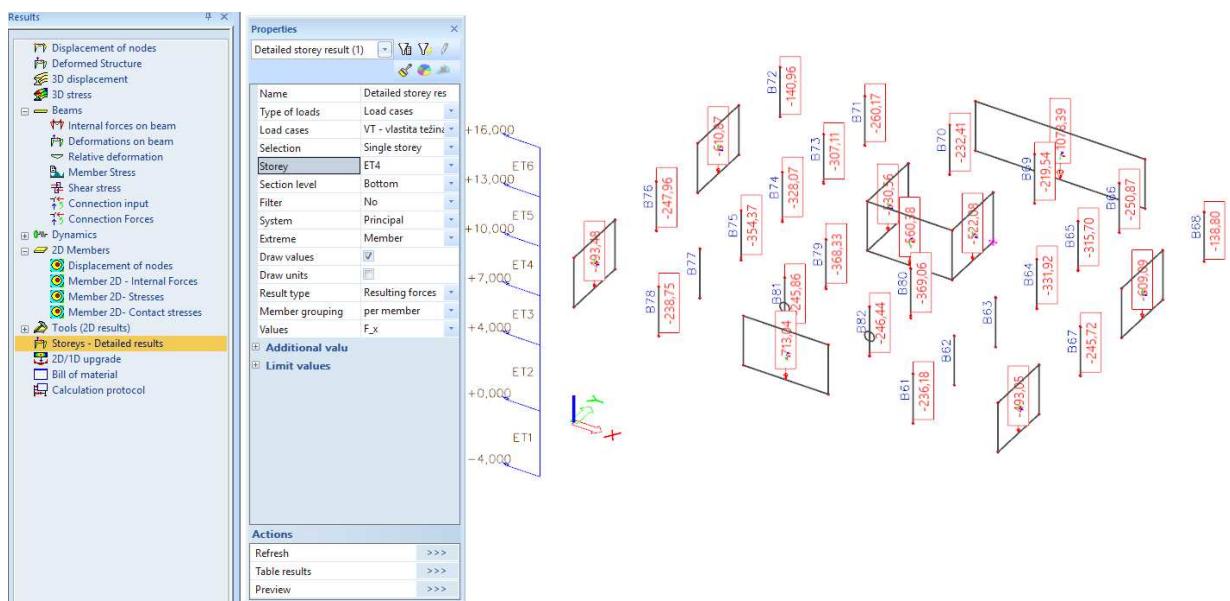


Slika 69. Mjerodavni presjeci vertikalnih elemenata za određivanje sile u njima

Na slikama 70 i 71 prikazane su unutarnje uzdužne sile za opterećenje vlastitom težinom u vertikalnim elementima 1. i 2. kata redom, koje su dobivene tako da se u izborniku „results“ odabere opcija „storeys – detailed results“ pri čemu se rezultati prikazuju po etažama. Mogu se označiti samo oni elementi u kojima je potrebno vidjeti rezultate. U podizborniku se pod opcijom „type of loads“ odabere „load cases“ ako se svaki slučaj opterećenja gleda posebno, zatim se pod opcijom „load cases“ odabere pripadajuće opterećenje, u ovom slučaju vlastita težina. Kako bi se prikazala određena etaža bitno je opciju „selection“ postaviti na „single storey“, a u opciji „storey“ odabire se pripadajuća etaža, u ovom slučaju 2. kat, zatim 1. kat. Opcija „section level“ daje mogućnost odabira presjeka koji može biti vrh, sredina ili dno. U opciji „extreme“ treba odabrati „member“ kako bi se prikazale vrijednosti sila u svakom elementu. Opciju „result type“ treba postaviti na „resulting forces“, opciju „member grouping“ na „per member“ a „values“ na „F_x“.

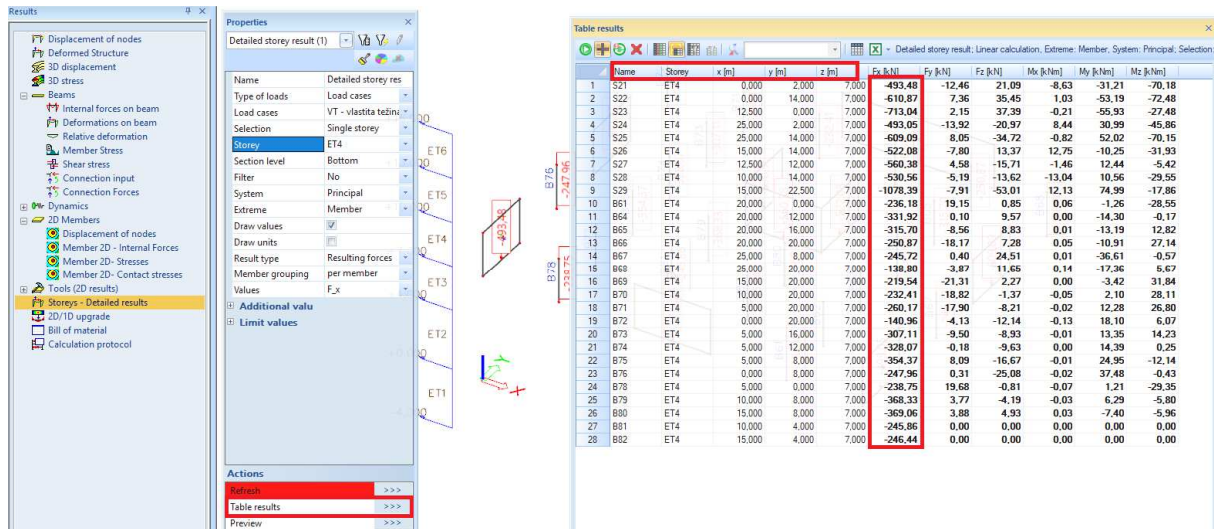


Slika 70. Unutarnje sile na 1. katu



Slika 71. Unutarnje sile na 2. katu

Kako bi se dobile sile samo 1. kata, moraju se oduzeti vrijednosti sila u svakom elementu 1. i 2. kata. Scia ima opciju tabličnog prikazivanja rezultata koju je moguće kopirati u Excel što značajno olakšava postupak.



Slika 72. Tablični prikaz rezultata 2. kata

Na slici 72 dan je tablični prikaz rezultata 2. kata. Prvi stupac u tablici prikazuje ime pojedinog elementa, drugi stupac naziv etaže za koju se prikazuju rezultati, zatim iduća tri stupca daju koordinate x, y i z elementa što je bitno pri određivanju razlike u veličini sila u elementima po etažama. U šestom stupcu nalaze se vrijednosti uzdužne sile po elementima etaže. Prebace li se vrijednosti za sve unutarnje sile (vlastitu težinu, dodatno stalno i uporabno opterećenje) za prvi i drugi kat u excel, može se izračunati razlika tih sila, prosječna vrijednost sile u elementu, 70% prosječne vrijednosti sile, te odrediti koliko elemenata preuzima veću silu od tog, kako bi se odredio njihov doprinos nagibu θ , što je prikazano u tablici 7.

Tablica 7. Sile u elementima 1. i 2. kata te njihova razlika

Element 1. kata	Sile od v.t. na 1. katu [kN]	Sile od v.t. na 2. katu [kN]	Razlika sila od v.t. [kN]	Sile od d.s. na 1. katu [kN]	Sile od d.s. na 2. katu [kN]	Razlika sila od d.s. [kN]	Sile od up. opt. na 1. katu [kN]	Sile od up. opt. na 2. katu [kN]	Razlika sila od up. opt. [kN]
S11	656,29	493,48	162,81	141,37	114,04	27,33	176,35	120,08	56,27
S12	811,44	610,87	200,57	208,43	167,29	41,14	262,84	181,64	81,2
S13	941,74	713,04	228,7	242,16	195,22	46,94	305,65	214,74	90,91
S14	655,61	493,05	162,56	141,27	113,99	27,28	176,23	120,03	56,2
S15	808,97	609,09	199,88	208,12	167,06	41,06	262,53	181,44	81,09
S16	715,88	522,08	193,8	280,58	227,46	53,12	351,88	233,78	118,1
S17	679,1	560,38	118,72	176,16	150,39	25,77	216,67	167,09	49,58
S18	734,99	530,56	204,43	284,3	230,5	53,8	356,04	235,65	120,39
S19	1443,23	1078,39	364,84	234,34	181,08	53,26	301,24	214,75	86,49
B33	317,34	236,18	81,16	117,39	92,41	24,98	147,79	101	46,79
B34	456,45	343,47	112,98	172,79	142,73	30,06	205,4	134,04	71,36
B35	476,58	358,82	117,76	179,15	148,16	30,99	213,23	138,73	74,5
B36	442,45	331,92	110,53	166,35	136,14	30,21	199,59	130,59	69
B37	420,4	315,7	104,7	155,79	129,05	26,74	184,41	118,46	65,95
B38	337,31	250,87	86,44	114,41	92,3	22,11	139,03	90,93	48,1

B39	330,68	245,72	84,96	119,6	94,16	25,44	151,04	102,94	48,1
B40	185,74	138,8	46,94	52,03	41,28	10,75	65,74	45,08	20,66
B41	293,46	219,54	73,92	108,48	91,76	16,72	125,36	75,94	49,42
B42	310,74	232,41	78,33	110,51	90,67	19,84	132,99	85,77	47,22
B43	348,61	260,17	88,44	114,24	90,51	23,73	142,48	97,35	45,13
B44	188,76	140,96	47,8	52,53	41,73	10,8	66,14	45,2	20,94
B45	408,83	307,11	101,72	153,34	127,42	25,92	180,85	115,38	65,47
B46	437,38	328,07	109,31	165,46	135,45	30,01	198,28	129,62	68,66
B47	470,44	354,37	116,07	178,07	147,37	30,7	211,75	137,66	74,09
B48	333,75	247,96	85,79	120,14	94,56	25,58	151,75	103,46	48,29
B49	451,46	339,86	111,6	171,93	142,1	29,83	204,23	133,2	71,03
B50	320,94	238,75	82,19	117,92	92,78	25,14	148,5	101,5	47
B51	489,62	368,33	121,29	187,56	152,86	34,7	227,12	151,18	75,94
B52	490,58	369,06	121,52	187,74	153	34,74	227,38	151,38	76
B53	332,5	245,86	86,64	137,56	112,24	25,32	165,86	105,05	60,81
B54	333,32	246,44	86,88	137,67	112,31	25,36	166,02	105,15	60,87
Σ	15624,6	11731,3	3893,28	4937,39	4008,02	929,37	6064,37	4068,81	1995,56

Prosječna vrijednost vlastite težine po elementima 1. etaže jednaka je $3893,28 / 31 = 125,59$ kN, a 70% te vrijednosti iznosi 87,91 kN. Elementi koji su u tablici u ćelijama narančaste boje imaju silu manju od 70% prosječne po elementima, što znači da je za vlastitu težinu $m = 20$. Prosječna vrijednost dodatnog stalnog opterećenja po elementima 1. etaže jednaka je $929,37 / 31 = 29,98$ kN, a 70% te vrijednosti iznosi 20,99 kN. Elementi koji su u tablici u ćelijama narančaste boje imaju silu manju od 70% prosječne po elementima, što znači da je za dodatno stalno opterećenje $m = 27$.

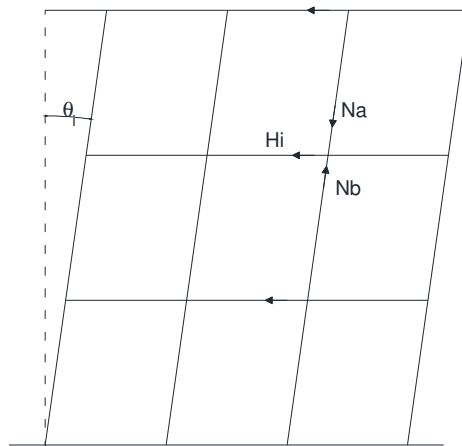
Prosječna vrijednost uporabnog opterećenja po elementima 1. etaže jednaka je $1995,56 / 31 = 64,37$ kN, a 70% te vrijednosti iznosi 45,07 kN. Elementi koji su u tablici u ćelijama narančaste boje imaju silu manju od 70% prosječne po elementima, što znači da je za uporabno opterećenje $m = 29$.

S obzirom na to da je za vlastitu težinu m najmanji, on se uzima u obzir kao mjerodavan jer daje najveći kut otklona. Slijedi da je $\alpha_m = \sqrt{0,5(1 + 1/20)} = 0,725$.

Prema izrazu (2.1) slijedi da je otklon od vertikale $\theta_i = \theta_0 \cdot \alpha_n \cdot \alpha_m = \frac{1}{200} \cdot \frac{2}{3} \cdot 0,725 = 0,0024167$

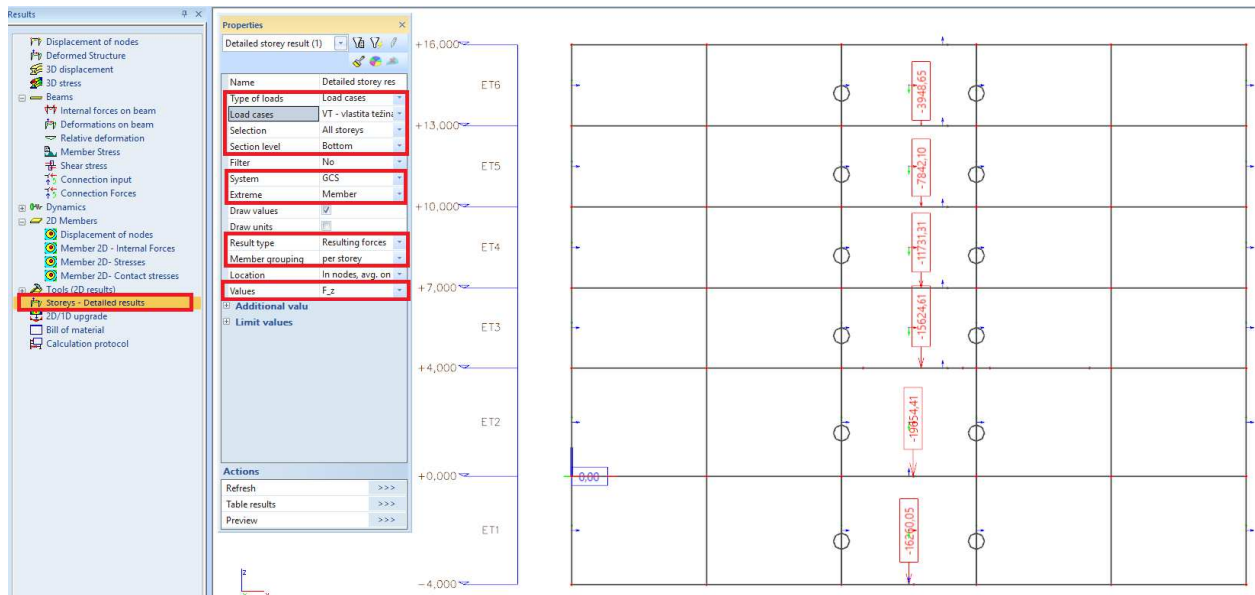
Nakon što se proračuna ukupan kut otklona, na vrhu svakog kata i kao opterećenje proračunava se bočna sila $H_i = \sum_{j=1}^n N_{ij} \cdot \theta_i$ gdje je $\sum_{j=1}^n N_{ij}$ ukupna uzdužna sila u svim elementima j jedne etaže (odnosno zbroj uzdužnih sila u svim vertikalnim elementima j jedne etaže).

Prema točki 5.2 norme [1] i u knjizi [9], kao na slici 73 bočna sila H_i se definira kao $H_i = \theta_i \cdot (N_b - N_a)$ pri čemu je N_a sila u presjeku na dnu vertikalnog elementa etaže iznad promatrane etaže, a N_b sila u presjeku na vrhu vertikalnog elementa etaže ispod promatrane etaže, što bi značilo da u bočnu silu ulazi samo opterećenje pojedine etaže, ne i težine vertikalnih elemenata. Prema [9], [10] sila N_b je sila u presjeku na dnu vertikalnog elementa ispod promatrane etaže, što bi značilo da u bočnu silu ulazi i opterećenje pojedine etaže i težina vertikalnih elemenata te etaže (iste veličine sila kao i za određivanje broja m). Time se vrijednost bočne sile H_i povećava, što je ponovo sigurnije za proračun.



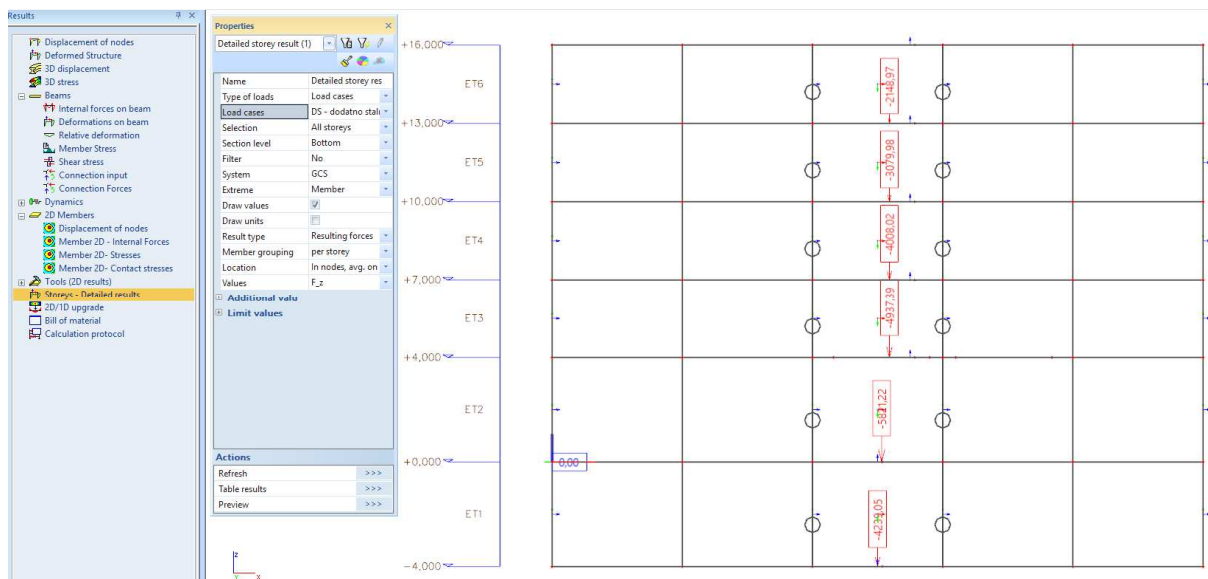
Slika 73. Učinak geometrijskih imperfekcija

Za razliku od određivanja broja elemenata m , kod određivanja sila po etažama nije bitna sila u svakom pojedinom elementu. Važna je ukupna sila na svakoj etaži. Na slici 74 prikazane su vertikalne sile po etažama za vlastitu težinu. U izborniku „results“ potrebno je odabrati opciju „storey – detailed results“ čime se otvara podizbornik. U njemu se pod opcijom „load cases“ odabere opterećenje, opciju „selection“ potrebno je postaviti na „all storeys“, a opciju „section level“ na „bottom“ kako bi se prikazala vrijednost sila na dnu. Zada se globalni koordinatni sustav (GCS), pa se i vrijednost sile pod opcijom „values“ postavi kao „F_z“ – vertikalno. Elemente treba grupirati po katovima tako da se opcija „member grouping“ postavi na „per storey“.

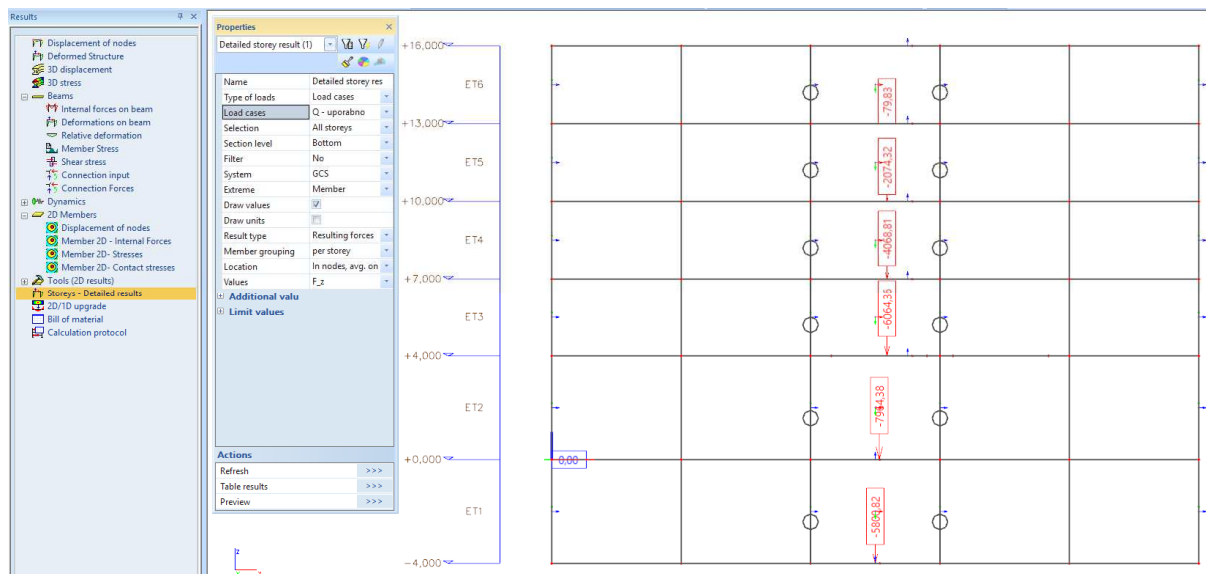


Slika 74. Vertikalne sile po etažama za vlastitu težinu

Na slikama 75 i 76 prikazane su sile po etažama za dodatno stalno i uporabno opterećenje.



Slika 75. Vertikalne sile po etažama za dodatno stalno opterećenje



Slika 76. Vertikalne sile po etažama za uporabno opterećenje

Nakon što su u Scii prikazane vrijednosti vertikalnih unutarnjih sila po etažama, proračunava se sila na svakoj etaži. Sile na 4. katu prikazane su u presjeku na dnu 4. kata, tj. vrijednost sile za npr. vlastitu težinu je 3948,65 kN. Sile na trećem katu dobiju se tako da se od sile 3. kata oduzme sila 4. kata (npr. za vlastitu težinu $N_b - N_a = 7842,1 - 3948,65 = 3893,45$ kN). I tako redom do etaže prizemlja.

U tablici 8 prikazane su ukupne sile po etažama redom za vlastitu težinu, dodatno stalno i uporabno opterećenje, izračunate po prethodno opisanom postupku.

Tablica 8. Ukupne vertikalne sile po etažama za svako opterećenje

Opterećenje	Ukupna vertikalna sila na etaži (u kN)				
	PRIZEMLJE	1. KAT	2. KAT	3. KAT	4. KAT
VLASTITA TEŽINA	4029,6	3893,28	3889,21	3893,45	3948,65
DODATNO STALNO	883,83	929,37	928,04	931,01	2148,97
UPORABNO	1900,02	1995,55	1994,49	1994,49	79,83

Ukupna bočna sila $H_i = \sum_{j=1}^n N_{ij} \cdot \theta_i$ proračunava se zajedno za vlastitu težinu i dodatno stalno opterećenje, te posebno za uporabno opterećenje. Npr., bočna sila H_4 za vlastitu težinu i dodatno stalno opterećenje je $H_4 = (3948,65 + 2148,97) \cdot 0,0024167 = 14,74$ kN

U tablici 9 prikazane su ukupne sile po etažama redom za vlastitu težinu, dodatno stalno i uporabno opterećenje, izračunate po prethodno opisanom postupku.

Tablica 9. Bočne sile po etažama

Opterećenje	Bočna sila na etaži (u kN)				
	PRIZEMLJE	1. KAT	2. KAT	3. KAT	4. KAT
VLASTITA TEŽINA	11,87	11,65	11,64	11,66	14,74
DODATNO STALNO	4,59	4,82	4,82	4,82	0,19

Sile H_i djeluju na konstrukciju u x ili y -smjeru i dodaju se ostalim horizontalnim djelovanjima (npr. potresu). One se mogu jednoliko raspodijeliti po rubovima okomitim na smjer djelovanja sile i -te etaže. Tako je opterećenje po etaži: $q_{Edx,i} = H_{x,i} / L_y$ ili $q_{Edy,i} = H_{y,i} / L_x$

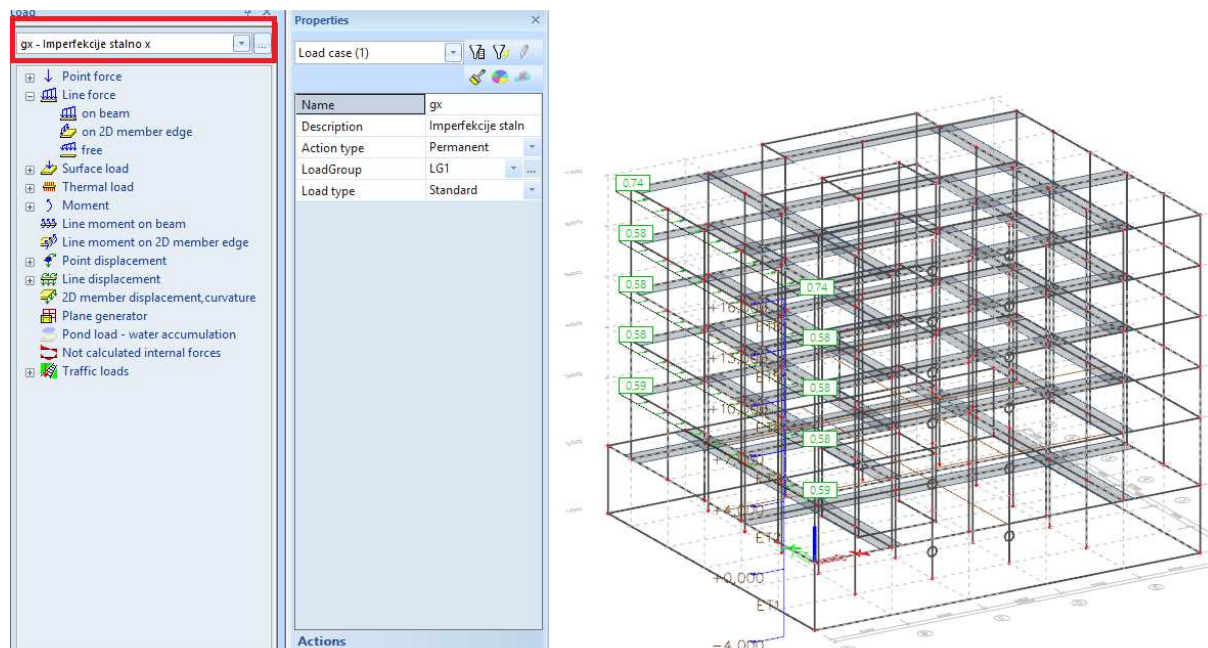
$$L_x = 25 \text{ m i } L_y = 20 \text{ m}$$

U tablici 10 prikazane su vrijednosti bočnog linijskog opterećenja po etažama za x i y -smjer.

Tablica 10. Bočne sile po etažama za svaki smjer

Opterećenje	Bočna sila na etaži (u kN/m)				
	x -smjer ($L_y = 20 \text{ m}$)				
	PRIZEMLJE	1. KAT	2. KAT	3. KAT	4. KAT
V.T + D.S.	0,59	0,58	0,58	0,58	0,74
UPORABNO	0,23	0,24	0,24	0,24	0,01
	y -smjer ($L_x = 25 \text{ m}$)				
	PRIZEMLJE	1. KAT	2. KAT	3. KAT	4. KAT
V.T + D.S.	0,47	0,47	0,47	0,47	0,59
UPORABNO	0,18	0,19	0,19	0,19	0,01

Potrebno je napraviti nove slučajeve opterećenja imperfekcije u x i y -smjeru za stalno i uporabno opterećenje te zadati opterećenja po etažama kao što je prikazano na slici 77 za x -smjer imperfekcije od stalnog opterećenja u x -smjeru.



Slika 77. Bočne sile za stalno opterećenje u x-smjeru

2.5 Modalna i spektralna analiza

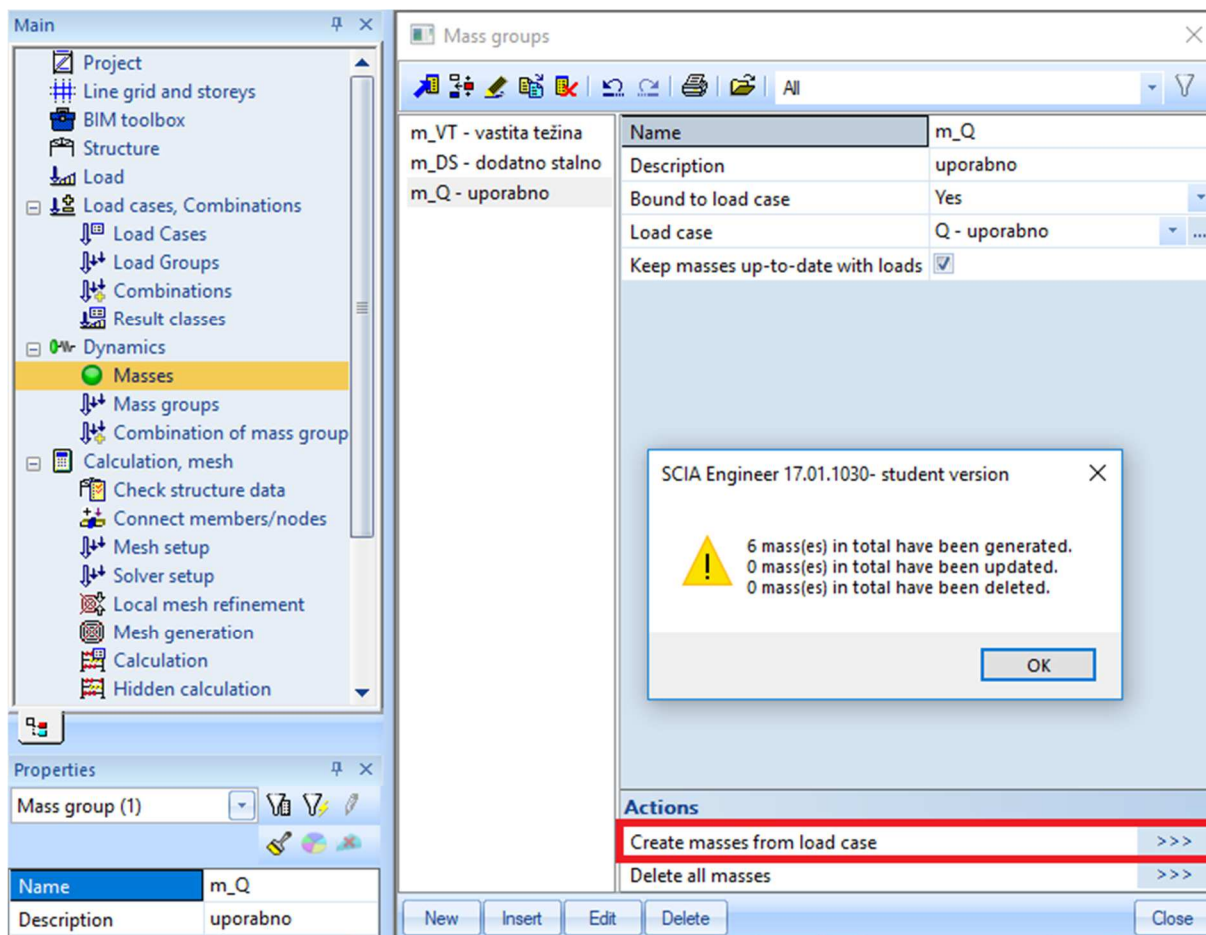
2.5.1 Općenito

Potres na konstrukciju djeluje dinamički i prostorno. Odgovor konstrukcije ovisi o masi, krutosti i prigušenju konstrukcije, o tlu i o potresnom djelovanju. Prigušenje konstrukcije uglavnom ovisi o materijalu i predstavlja nepovratni proces transformacije kinetičke energije u toplinsku. Faktor prigušenja betonskih konstrukcija je $\zeta = 0,05$, odnosno 5%. Norma [2] dopušta nekoliko metoda proračuna. Najčešće korištene su metoda bočnih sila i višemodalna spektralna analiza. Obje metode su kvazistatičke. To znači da se dinamička svojstva djelovanja (a i materijala) u proračunu uzimaju implicitno, neizravno. U obje metode, sile u konstrukciji određene su na temelju spektra (najčešće na temelju spektra pseudoubznanja, u daljnjem tekstu spektar ubznanja). Spektralna analiza metoda je kojom se određuje vršni odgovor konstrukcije na potresnu pobudu u ovisnosti o periodu konstrukcije i vrsti tla. Potresna pobuda je standardizirana u normi [2] pa se spektar modificira samo u skladu s tlom. Na temelju perioda odredi se akceleracija konstrukcije te se ovisno o raspodijeli masa konstrukcije javljaju potresne sile u konstrukciji. Dinamički utjecaji pobude sadržani su u spektru. Modalna analiza postupak je kojim se određuju različiti oblici vibriranja konstrukcije. Svaka masa se nastoji gibati određenom frekvencijom. Kako su mase međusobno povezane, jedna utječe na drugu pa se pronalaze (tako da se svaka masa jedinično pomakne) različiti oblici, odnosno modovi vibriranja. Za uporabu metode bočnih sila ne koristi se modalna analiza. Za višemodalnu

spektralnu analizu, modalna analiza je prvi korak kojim se određuju periodi, a zatim se pomoću spektralne analize određuje ukupno djelovanje (kombiniranjem SRSS ili CQC metodom). Metodom bočnih sila pretpostavlja se prvi oblik vibriranja konstrukcije (pretpostavljeni prvi oblik izgleda kao deformacijska linija konzole opterećene koncentriranom silom na kraju što je dobra pretpostavka ako je tlocrt konstrukcije pravilan geometrijski i prema rasporedu krutosti). Prvi oblik vibriranja je onaj koji ima najmanju frekvenciju (odnosno najdulji period, koji se još naziva i prvi period). Prvi period često ima vrlo velik utjecaj u odnosu na ostale periode pa se metodom bočnih sila svi ostali periodi zanemaruju. Zato nije potrebna modalna analiza. Ovaj postupak jednostavniji je i prikladniji za ručni proračun, ali ima ograničenja kad se smije koristiti. Kad je tlocrt nepravilnog oblika torzija može imati značajan utjecaj pa pretpostavka prvog oblika nije korektna. Kad je konstrukcija visoka ili vitka (dugi prvi period) tada ostali periodi značajno utječu na odziv pa se mora koristiti modalna analiza. U primjeru je korištena višemodalna spektralna analiza. Također, konstrukcija je nepravilna po visini jer se jedan zid prekida i naliježe na stupove na prvoj etaži. Takvo oblikovanje nepovoljno utječe na odziv konstrukcije. Kao što je već prikazano u prethodnom poglavlju, centar krutosti mijenja se između pojedinih etaža (zbog nepravilnosti po visini) što nije povoljno. Također, duktilnost koju prekinuti element ima je vrlo niska.

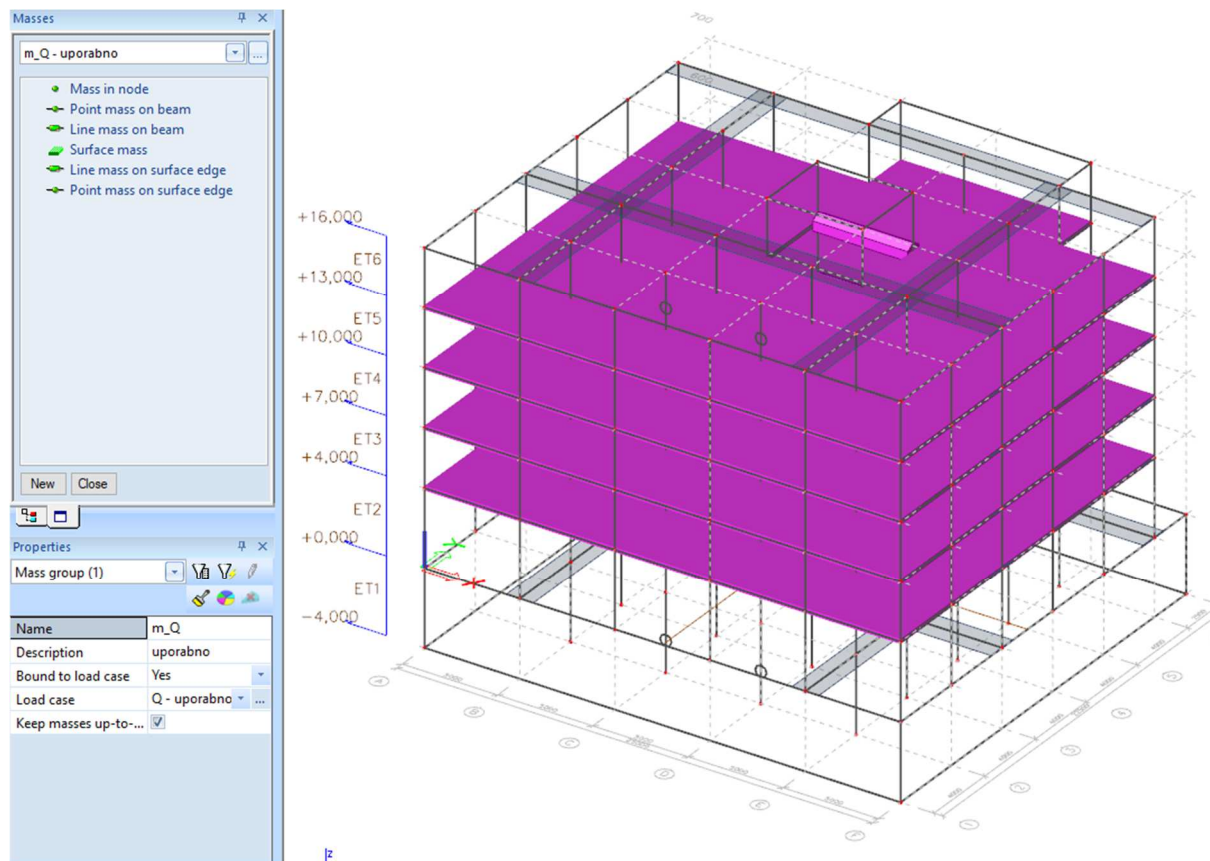
2.5.2 Zadavanje masa i modifikacija krutosti

Mase je moguće generirati ručno ili automatski. Najprije je potrebno u izborniku „project“ u kartici „functionality“ omogućiti opciju „dynamics“, a zatim i opciju „seismic“ kao što je prikazano na slici 7. Nakon toga je u glavnom izborniku stvoren izbornik „dynamics“. Pritiskom na opciju „mass groups“ otvara se izbornik za zadavanje masa preko postojećih opterećenja. Na slici 78 prikazano je zadavanje grupe masa. Opcijom „bound to load case“ se mase iz te grupe vežu za opterećenje, a opcijom „load case“ odabire se slučaj opterećenja s kojim su mase vezane. Opcijom „keep masses up-to-date with loads“ mase se mijenjaju, ako se promijeni opterećenje unutar slučaja opterećenja što može biti korisno. Pritiskom na „create masses from load case“ generiraju se mase i otvara se prozor s obavijesti koji je vidljiv na sredini slike 78. Opterećenja iz grupe vezane za snijeg i grupe vezane za uporabno šahovsko opterećenje ne služe za generiranje masa. Kombinacija masa koja se koristi za modalnu analizu vezana je za nazovistalnu kombinaciju opterećenja pa se zato snijeg zanemaruje (za snijeg je $\psi_2 = 0$). Za generiranje masa uporabno opterećenje zadaje se preko svih polja, a ne šahovskom raspodjelom.



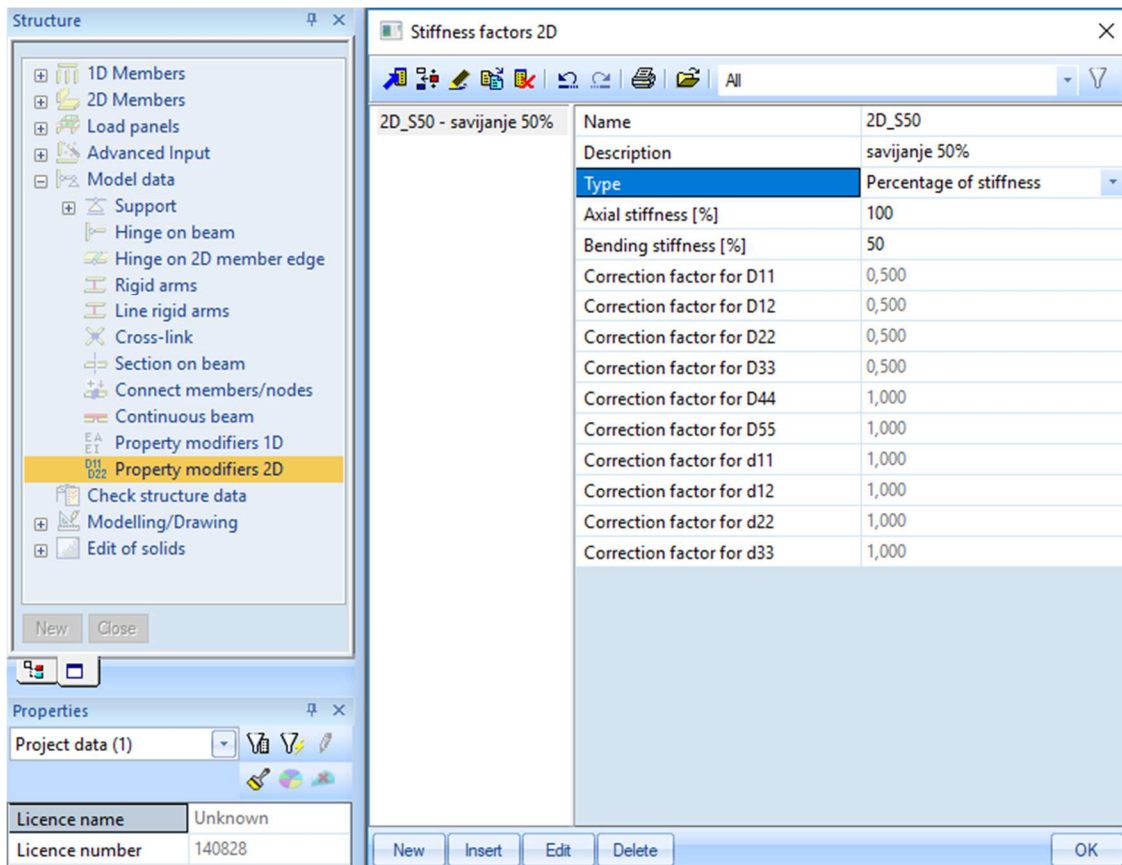
Slika 78. Zadavanje grupa masa

Nakon što su generirane mase, odabirom opcije „masses“ u izborniku „dynamics“ mogu se vidjeti generirane mase. Isto tako proizvoljno se mogu dodati mase koje nisu vezane za slučaj opterećenja. Na slici 79 prikazane su automatski generirane mase za uporabno opterećenje. Vrlo je bitno da se sve mase ispod i u razini tla ne koriste u modalnoj analizi. Osim mase, vrlo bitno svojstvo konstrukcije je krutost. Beton je materijal čija krutost se mijenja u slučaju raspucavanja, ali i s vremenom (puzanje). Kako potres može nastupiti u bilo kojoj životnoj fazi konstrukcije, nije moguće sa sigurnošću znati kolika će biti krutost kad nastupi potres. Međutim, potres koji uzrokuje otkazivanje konstrukcije izrazito je rijedak. Zbog toga je logično pretpostaviti da će prije pojave takvog potresa skupljanje, temperatura i drugi manji potresi uzrokovati raspucavanje svih elemenata konstrukcije [11]. Norma [2] predlaže smanjenje krutosti na 50% početne vrijednosti (neraspucani beton bez puzanja). Isključivanje masa podzemnih etaža i smanjenje krutosti svih elemenata zadaje se pomoću opcije „property modifiers“. Kako bi opcija bila dostupna u izborniku „project“, kartici „functionality“ označava se opcija „property modifiers“.

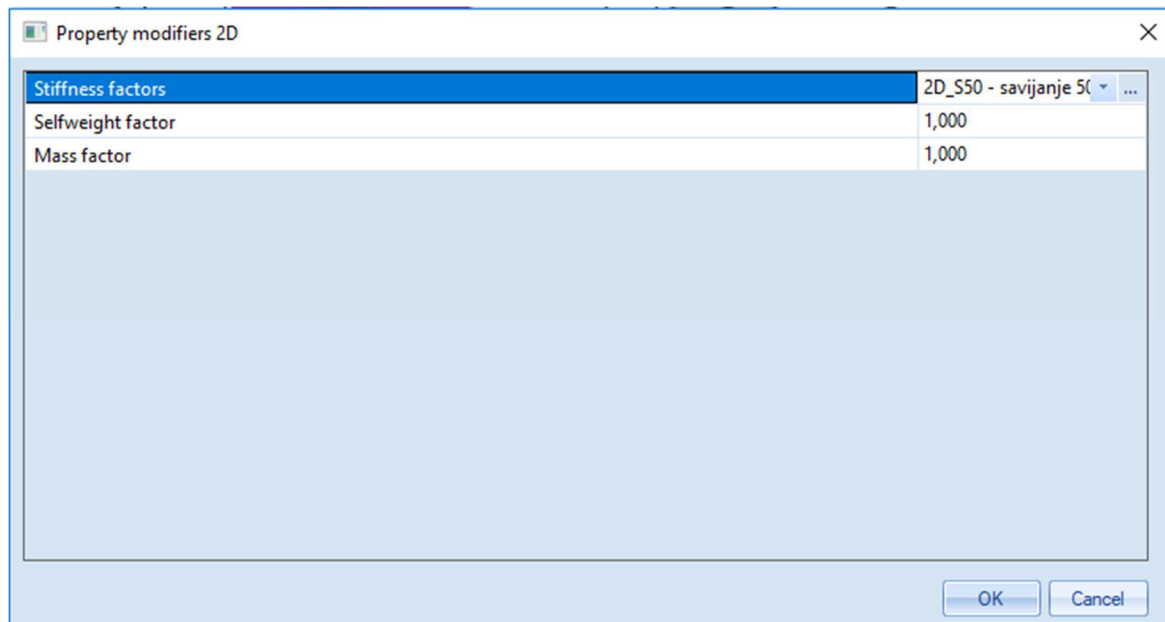


Slika 79. Zadavanje masa

Kako bi se mase pravilno generirale rastavljaju se opterećenja za podrum i prizemlje od ostalih opterećenja (i za stalno i za uporabno opterećenje) u posebni slučaj opterećenja (jer su DS i Q vezani za mase, a ispod razine 0 m masa se zanemaruje). U izborniku „structure“, podizborniku „model data“ sad se nalaze opcije „property modifiers 1D“ i „property modifiers 2D“ kojima se modificiraju svojstva štapnih i plošnih elemenata. Pritiskom na jednu od opcija otvara se izbornik sa slike 80. Opcijom „type“ odabire se način modifikacije krutosti (moguće je svaku posebno modificirati - samo savojnu, samo uzdužnu ili smanjiti krutosti u postotcima). Odabirom opcije „percentage of stiffness“ unosi se postotak konačne u odnosu na početnu krutost. U skladu s unesenim vrijednostima modificiraju se niži faktori koji su označeni sivom bojom (nije ih moguće izravno mijenjati). Modificirat će se savojna krutost na 50%. Torzijska krutost značajno se smanjuje s raspucavanjem elementa i trebala bi ju smanjiti na otprilike 5 – 15% početne vrijednosti prema [12], ali elementi ove konkretne konstrukcije imaju malu torzijsku krutost u odnosu na torzijsku krutost cijelog tlocrta. U skladu s tim, torzijska krutost neće se više smanjivati. Npr. u knjizi [13] se prilikom ručnog proračuna torzijska krutost elemenata zanemaruje. Nakon pritiska na „ok“ prozor se zatvara, ali se otvara novi, u kojem se modificiraju mase elemenata, koji je prikazan na slici 81.



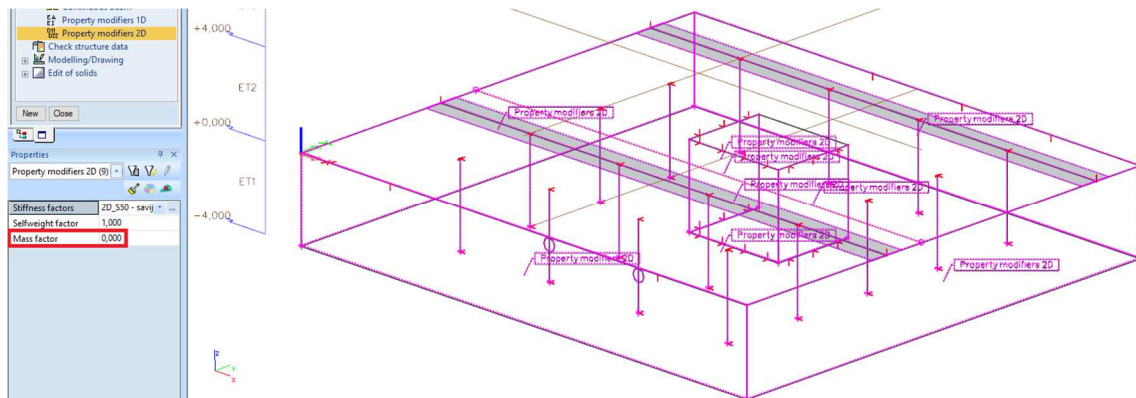
Slika 80. Modifikacija krutosti 2D elemenata



Slika 81. Modifikacija mase 2D elemenata

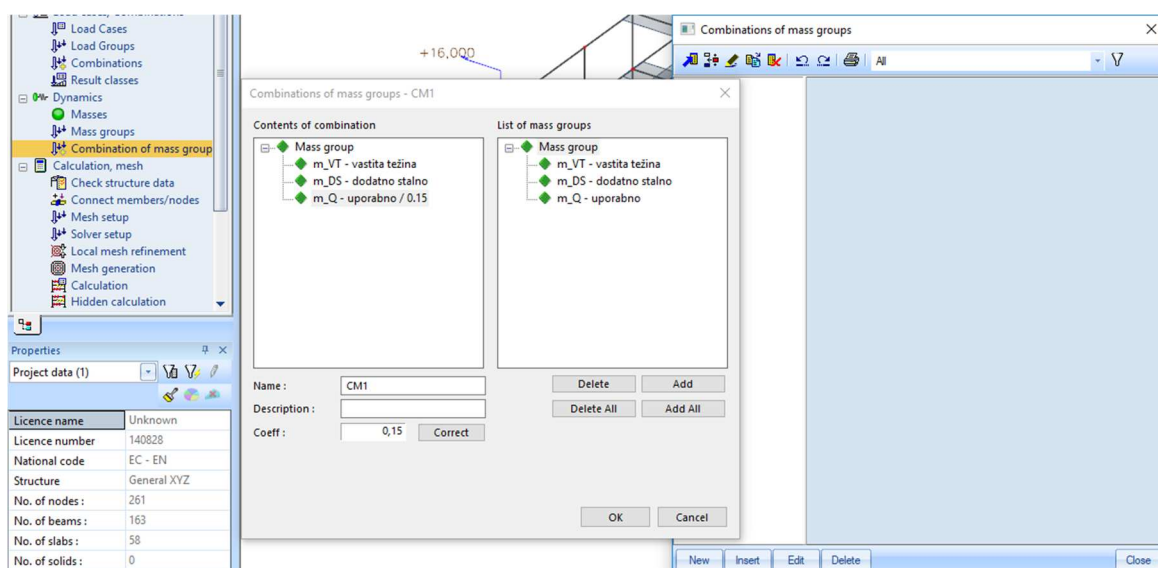
Opcijom „selfweight factor“ može se promijeniti vlastita težina elementa kao opterećenje (npr. da se u obzir uzme težina premaza, žbuke i sl.), a opcijom „mass factor“ mijenja se dio mase koji se razmatra pri modalnoj analizi (bitnije). Nakon pritiska na opciju „ok“ odabiru se elementi

koje je potrebno modificirati (u ovom slučaju svi elementi ispod razine zemlje). Na slici 82 prikazani su modificirani elementi podruma (i ploča prizemlja) tako da se njihova masa zanemari. Te mase imaju mali utjecaj na inercijske sile jer su pridržane sa svih strana i ne mogu se aktivirati prilikom potresa. Isti postupak provodi se za štapne elemente.



Slika 82. Modifikacija masa 2D elemenata podruma

Nakon što se definiraju grupe masa određuju se kombinacije masa za modalnu analizu opcijom „combination of mass groups“. Na slici 83 prikazan je izbornik za kombinaciju masa. S desne strane izbornika nalaze se sve grupe masa. Pritiskom na opciju „add all“ sve grupe se dodaju u kombinaciju na lijevu stranu. Za određivanje potresnog djelovanja potrebno je uporabna opterećenja uzeti s potresnim faktorom $\psi_E = \psi_2 \cdot \varphi$, gdje je $\varphi = 0,5$ za nepovezane etaže, $\varphi = 1,0$ za povezane etaže, a $\psi_2 = 0,3$ (na krovu ne djeluje uporabno opterećenje osim snijega za koji je $\psi_2 = 0$. Podrumске mase se zanemaruju)



Slika 83. Kombinacija masa

2.5.3 Određivanje krutosti tla

Prije provođenja modalne analize potrebno je definirati oslonce konstrukcije. Temeljna ploča cijelom se svojom površinom oslanja na tlo. Ponašanje tla je nelinearno. Krutost homogenog tla nije konstantna po cijeloj površini, ovisi o deformaciji, a razlikuje se statička i dinamička krutost. Nosivost temelja ovisi o vrsti tla, o sadržaju vode, opterećenju (ekscentrično ili ne), o slojevima tla, i.t.d. Bitno je napomenuti da svi ti čimbenici značajno otežavaju procjenu nosivosti i krutosti tla. Prilikom projektiranja svake konstrukcije nužno je konzultirati se s geotehničarima radi točnije procjene nosivosti i krutosti tla. Proces procjene je najčešće iterativan. Nosivost tla procijenit će se u skladu s normom EN 1997-1 [14]. Tlo može biti drenirano ili nedrenirano. Iako je čest slučaj da se u razini temelja postavljaju drenažne cijevi oko cijele konstrukcije, radi sigurnosti će se nosivost tla računati kao da su uvjeti nedrenirani (kako u slučaju zakazivanja drenažnog sustava ne bi došlo do sloma tla). Za nedrenirane uvjete nosivost iznosi:

$$q_{Rv,k} = \frac{V_{Rd}}{A'} = (\pi + 2) \cdot c_{u,d} \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + q \quad (2.2)$$

Gdje je:	V_{Rd}	otpornost temelja na vertikalnu silu
	$A' = B' \cdot L'$	efektivna površina temelja
	$c_{u,d}$	proračunska vrijednost nedrenirane posmične čvrstoće
	$b_c = 1 - \frac{2 \cdot \alpha}{\pi + 2}$	faktor nagiba temelja
	α	nagib temelja u odnosu na horizontalu
	$s_c = 1 + 0,2 \cdot \frac{B'}{L'}$	faktor oblika
	$i_c = 0,5 \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \frac{H}{A' \cdot c_{u,d}}} \right)$	faktor nagiba opterećenja
	H	horizontalno opterećenje
	$q = \gamma_{tla} \cdot D$	rasterećenje tla pri iskopu
	γ_{tla}	zapreminska težina tla
	D	dubina (od razine tla do dna temelja)

Temelj je horizontalan pa je $b_c = 1$. Efektivna površina temelja ovisi o ekscentricitetu opterećenja kao i faktor nagiba opterećenja. Radi jednostavnosti pretpostavit će se da je ekscentricitet u oba smjera jednak pa je $s_c = 1 + 0,2 \cdot \frac{B}{L} = 1 + 0,2 \cdot \frac{22,5}{25} = 1,18$. Vidljivo je da su

vrijednosti faktora nagiba ograničene $0,5 \leq i_c \leq 1,0$. Pretpostavit će se $i_c = 0,75$, a zatim nakon određivanja potresnih sila ponovo procijeniti. Dubina temelja još nije poznata, ali se može pretpostaviti da će temelj imati debljinu barem 40 cm pa je $D = 4,4$ m. Karakteristične vrijednosti posmične nosivosti tla i zapreminske težine moraju se odrediti ispitivanjem jer mogu značajno varirati. Okvirne vrijednosti svojstava tla koje će se koristiti u proračunu su dane u tablici 11. Vrijednosti u tablici su približne i vrlo ograničene (nije svaka glina jednaka, ni šljunak, ni pijesak, a postoji i niz drugih vrsta tla).

Tablica 11. Svojstva tla

vrsta tla	γ_{tla} [kN/m ³]	kut unutarnjeg trenja φ_k' [°]	kohezija c_k' [kN/m ²]	$c_{u,k}$ [kN/m ²]
glina, čvrsta	18	20	20	25 – 50
prirodni šljunak	18	40	-	-
pijesak, srednje zbijen	19	35	-	-

Faktori sigurnosti ovise o proračunskom pristupu. Norma [14] dopušta tri proračunska pristupa, a u Hrvatskoj je odabran treći (prema kojem faktori sigurnosti za φ_k' i c_k' iznose 1,25, a za $c_{u,k}$ 1,4). Vrijedi:

$$c_{u,d} = c_{u,k} / \gamma_{cu} = 35 / 1,4 = 25 \text{ kN/m}^2 \quad (2.3)$$

Karakteristična vrijednost odabrana je proizvoljno (u realnom projektu je dio geotehničkog elaborata) između vrijednosti predloženih u tablici 11. Nosivost tla procijenjena je na iznos: $q_{Rv,k} = (\pi + 2) \cdot 25 \cdot 1,0 \cdot 1,18 \cdot 0,75 + 18 \cdot 4,4 = 193 \text{ kN/m}^2$. Prema trećem proračunskom pristupu faktor sigurnosti za nosivost iznosi $\gamma_{Rd} = 1,0$ pa se usvaja vrijednost nosivosti $q_{Rv,d} = 193 \text{ kN/m}^2$. Elastična svojstva tla variraju i trebaju se odrediti ispitivanjem tla. Za procjenu (nikako za konačan proračun realne konstrukcije) mogu se pretpostaviti vrijednosti prikazane u tablici 12.

Tablica 12. Elastična svojstva prema vrsti tla (preuzeto iz [15])

vrsta tla	poissonov omjer	vrsta tla	modul elastičnosti [Mpa]	
glina, zasićena	0,4 - 0,5	glina	vrlo meka	2 - 15
glina, nezasićena	0,1 - 0,3		meka	5 - 25
pjeskovita glina	0,2 - 0,3		srednje	15 - 50
pijesak, šljunak	-0,1 – 1,0		kruta	50 - 100

uobičajeno	0,3 - 0,4
stijena	0,1 - 0,4
les	0,1 - 0,3

	pjeskovita	25 - 250
	les	15 - 60
pijesak	rastresit	10 - 25
	zbijen	50 - 81
šljunak i pijesak	rastresit	50 - 150
	zbijen	100 - 200
	škrljevac	150 - 5000

Uz pretpostavku srednje krute do krute gline poissonov omjer iznosi $\nu=0,4$, a modul elastičnosti $E = 50$ MPa. Modul posmika iznosi:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = \frac{50}{2 \cdot (1 + 0,4)} = 17,86 \text{ MPa} \quad (2.4)$$

Krutost opruge kojom se zamjenjuje temeljno tlo također se može samo procijeniti, a izrazi za procjenu dani su u tablici 13, gdje je:

L pola duljine temelja (duljina je veća dimenzija)

B pola širine temelja (širina je manja dimenzija)

A_b stvarna površina temelja

$I_x ; I_y ; I_z$ momenti tromosti oko x, y i z osi

Rotacijska krutost se u ovom slučaju zanemaruje, a horizontalna krutost u oba smjera uzima se jednaka.

Površina temelja u primjeru iznosi $A_b = 25 \cdot 22,5 = 562,5 \text{ m}^2$, pola duljine $L = 25 / 2 = 12,5 \text{ m}$, a pola širine iznosi $B = 22,5 / 2 = 11,25 \text{ m}$. Faktor $\chi = 562,5 / (4 \cdot 12,5^2) = 0,9$.

Tablica 13. Elastična svojstva prema vrsti tla (preuzeto iz [16])

stupanj slobode		krutost ekvivalentne opruge	
translacija	vertikalna (z)	$k_z = \frac{2 \cdot G \cdot L}{1 - \nu} \cdot (0,73 + 1,54 \cdot \chi^{0,75})$	$\chi = \frac{A_b}{4 \cdot L^2}$
	horizontalna (poprečno)	$k_y = \frac{2 \cdot G \cdot L}{2 - \nu} \cdot (2 + 2,5 \cdot \chi^{0,85})$	
	horizontalna (uzdužno)	$k_x = k_y - \frac{0,2 \cdot G \cdot L}{0,75 - \nu} \cdot \left(1 - \frac{B}{L}\right)$	
rotacija	oko uzdužne osi	$k_{\theta,x} = \frac{G}{1 - \nu} \cdot I_x^{0,75} \cdot \left(\frac{L}{B}\right)^{0,25} \cdot \left(2,4 + 0,5 \cdot \frac{B}{L}\right)$	
	oko poprečne osi	$k_{\theta,y} = \frac{3 \cdot G}{1 - \nu} \cdot I_y^{0,75} \cdot \left(\frac{L}{B}\right)^{0,15}$	

oko vertikalne osi

$$k_{\theta,z} = 3,5 \cdot G \cdot I_z^{0,75} \cdot \left(\frac{B}{L}\right)^{0,4} \cdot \left(\frac{I_z}{B^4}\right)^{0,2}$$

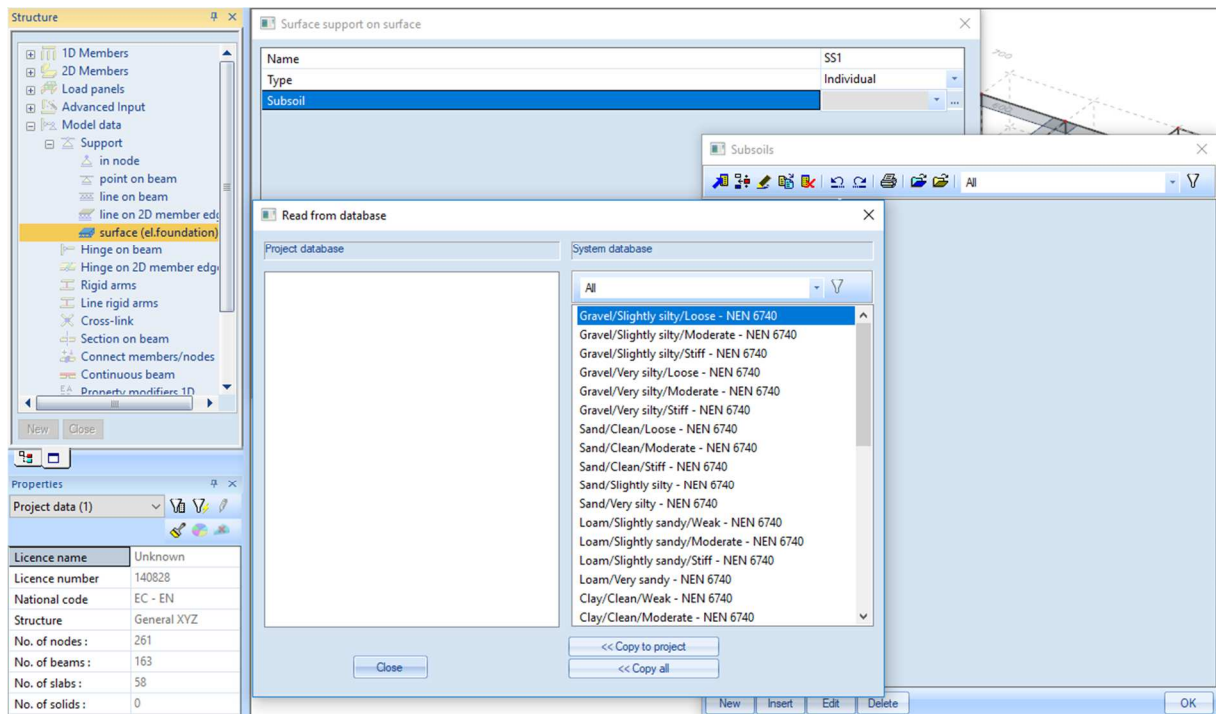
Vertikalna krutost cijelog temelja je $k_z = \frac{2 \cdot 17860 \cdot 12,5}{1 - 0,4} \cdot (0,73 + 1,54 \cdot 0,9^{0,75}) = 1602185 \text{ kN/m}$

, a da bi se opruga raspodijelila na cijelu površinu mora se podijeliti s površinom pa se u proračunu koristi vrijednost $k_z = \frac{1574680}{562,5} = 2850 \text{ kN/m}^3$. Horizontalna krutost je

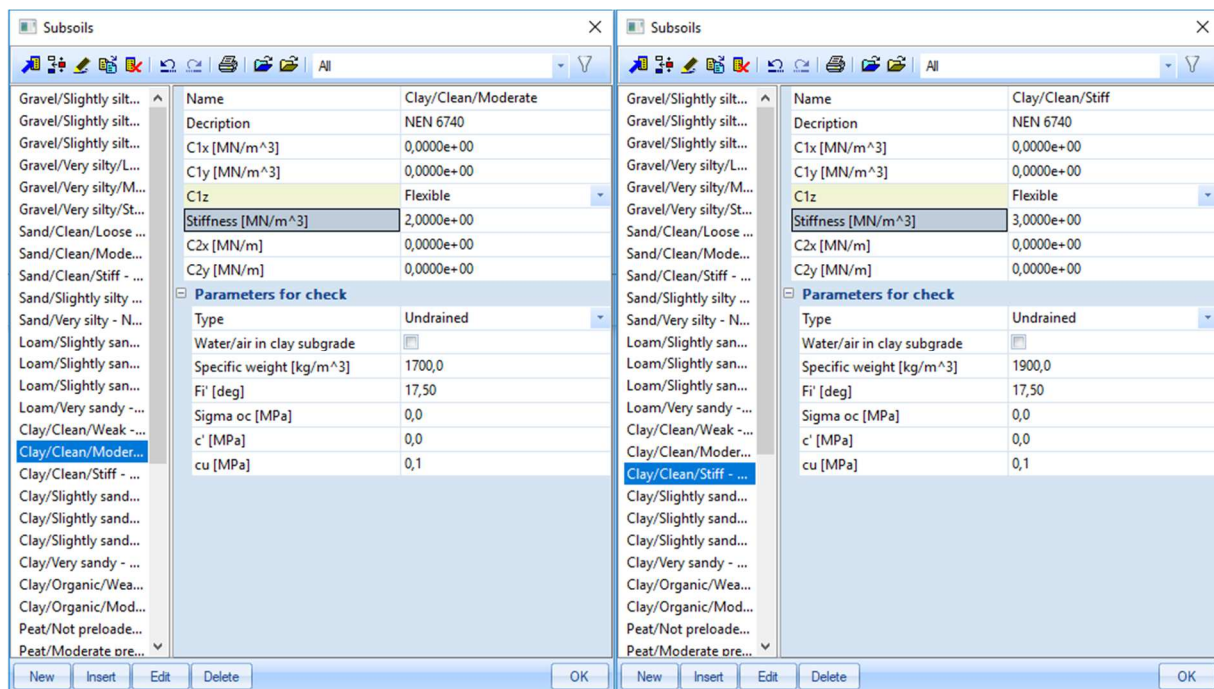
$k_{x,y} = \frac{2 \cdot 17860 \cdot 12,5}{2 - 0,4} \cdot (2 + 2,5 \cdot 0,9^{0,85}) = 1196018 \text{ kN/m}$, a kad se podijeli s površinom iznosi

$k_{x,y} = \frac{1196018}{562,5} = 2100 \text{ kN/m}^3$. Kako bi se postavili popustljivi oslonci, potrebno je u izborniku

„project“, u kartici „functionality“ omogućiti opciju „subsoil“ kao što je vidljivo na slici 7. Nakon toga je u izborniku „structure“, podizborniku „support“ potrebno odabrati opciju „surface (el. foundation)“ kao što je prikazano na slici 84. Nakon odabira opcije, otvori se niz izbornika vidljivih na slici 84. U prvom izborniku naziva „read from database“ mogu se odabrati postojeća tla iz baze podataka programa. Opcijom „copy all“ sva tla se iz baze podataka unose u program. Pritiskom na „close“ se zatvara izbornik i ostaje izbornik „subsoils“, gdje je usporedbe radi odabrana glina srednje krutosti kao što je prikazano na slici 85. Vidljivo je da je vertikalna krutost srednje krute gline procijenjena na vrijednost 2 MN/m^3 , dok je vertikalna krutost krute gline 3 MN/m^3 .

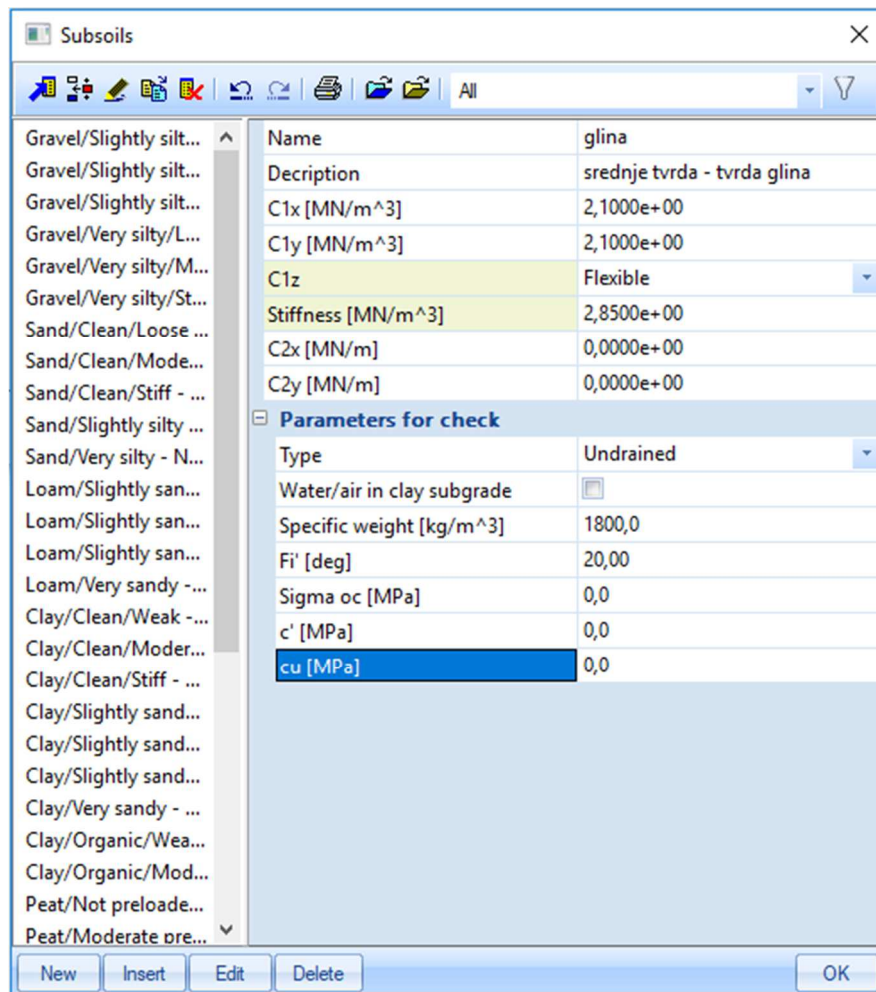


Slika 84. Zadavanje tla kao oslonca



Slika 85. Zadavanje krutosti tla

Procjena programa poklapa se s procjenom $k_z = 2,85 \text{ MN/m}^3$ koja je provedena prethodno u primjeru. Na slici 86 prikazan je ispunjen izbornik „subsoils“. Opcije „C1x“ i „C1y“ predstavljaju horizontalnu krutost oslonca, a „C1z“ vertikalnu. Opcijama „C2x“ i „C2y“ moguće je unijeti rotacijsku krutost tla. Nakon pritiska na opciju „ok“ potrebno je označiti element na koji se postavlja oslonac, odnosno temeljnu ploču.

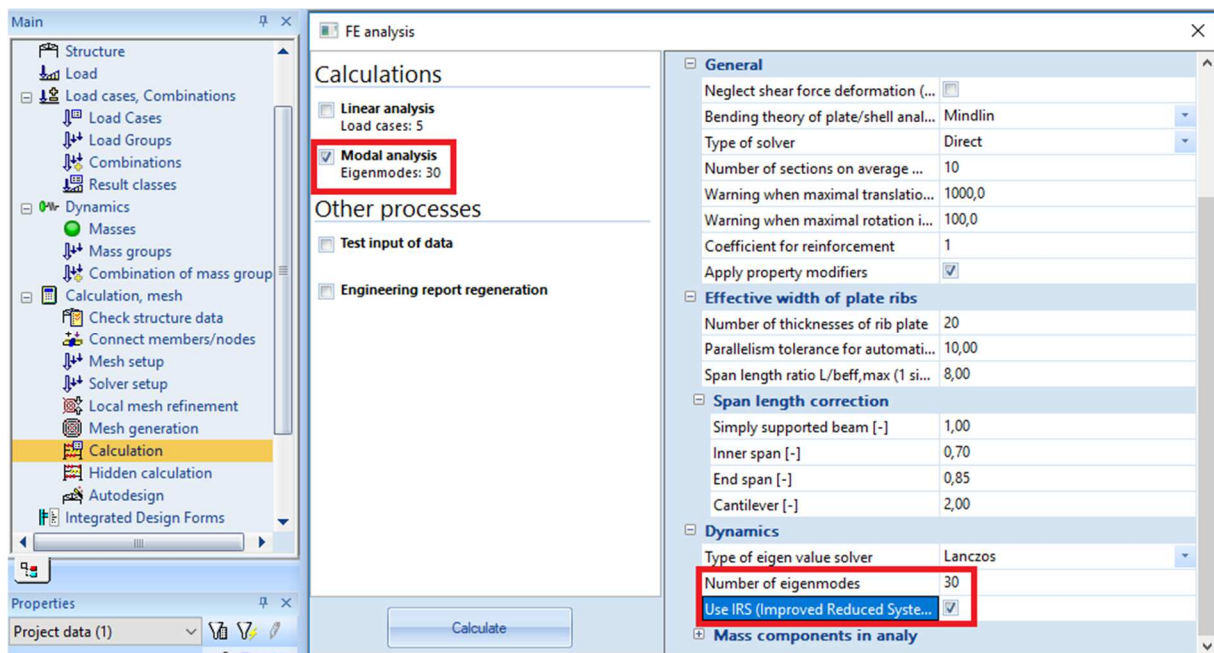


Slika 86. Zadane karakteristike tla

Osim na temeljnu ploču, popustljivi oslonac postavlja se i na podrumске zidove. Postavljanjem oslonaca na podrumски zid dolazi do problema pri dimenzioniranju podrumskog zida, odnosno horizontalno opterećenje se direktno preuzima osloncem. S obzirom da u Scii nije moguće prilikom modalne analize zadati oslonac koji preuzima samo vlak ili tlak, treba paziti da pri zadavanju opterećenja na zid treba maknuti elastične oslonce i dimenzionirati zid na horizontalno opterećenje kao i u vježbama iz Betonskih i zidanih konstrukcija 2. Ponekad se oslonci ne postavljaju na bočne zidove što ovisi o očekivanoj krutosti tla. U slučaju da se očekuju plastične deformacije tla, krutost bočnih opruga može se zanemariti. U slučaju da u geotehničkom elaboratu bočna krutost konstrukcije nije definirana mogu se razmotriti dva slučaja. Slučaj kad su opruge postavljene samo na temeljnu ploču kao slučaj najmekšeg oslanjanja i drugi slučaj, kad se konstrukcija razmatra kao upeta u razinu podruma kao najkručiji slučaj oslanjanja konstrukcije. Od ta dva slučaja odabire se nepovoljniji ili se procjenom odredi realniji slučaj.

2.5.4 Modalna analiza

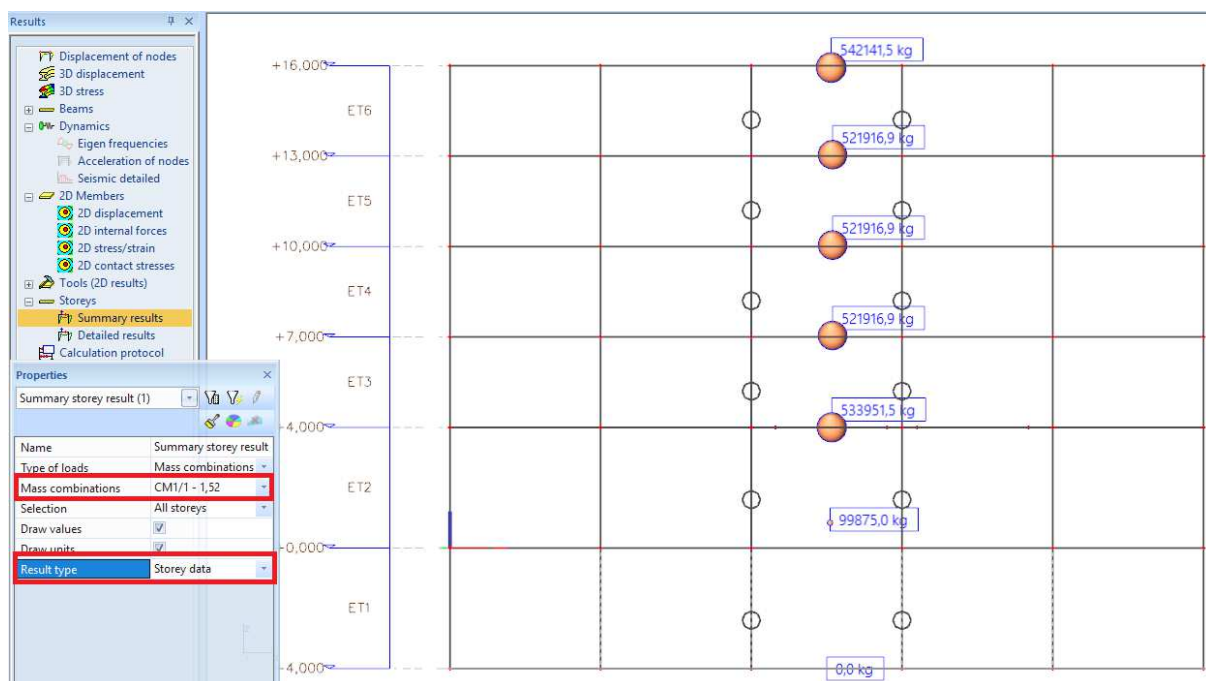
Nakon što se odredi geometrija, krutost, oslonci i kombinacija masa provodi se modalna analiza odabirom opcije „calculation“ u glavnom izborniku. Na slici 87 prikazane su postavke za modalnu analizu. Najprije se umjesto opcije „linear analysis“ odabire opcija „modal analysis“, a zatim se s desne strane otvori izbornik „advanced solver settings“. Pri dnu tog izbornika nalazi se broj vlastitih oblika „number of eigenmodes“, a ispod se može odabrati opcija „use IRS“ kojom se lokalni modovi vibriranja zanemaruju čime je potreban manji broj vlastitih oblika, a ne gubi se na preciznosti. Uvjet za korištenje IRS metode je da su katovi definirani, što je učinjeno i vidljivo na slici 18. Broj vlastitih oblika za početak se može odabrati kao šest puta veći od broja ploča iznad razine tla (30 u ovom slučaju). Taj broj je dobiven tako što se pretpostavlja da su mase grupirane kao točkaste na razini etaža. Kako svaka točka u prostoru ima najviše šest stupnjeva slobode (tri translacijska i tri rotacijska), određen je broj vlastitih oblika. U slučaju da se ne može aktivirati dovoljna količina mase, norma [2] daje vrijednosti minimalnog broja oblika koji se moraju razmotriti kao $k = 3 \cdot \sqrt{n}$, gdje je n broj etaža iznad razine 0. Također, posljednji razmotreni oblik ne smije imati period dulji od 0,2 sekunde.



Slika 87. Postavke za provedbu modalne analize

Nakon što je proračun proveden u glavnom izborniku odabere se izbornik „results“. Najprije je potrebno provjeriti jesu li zanemarene mase elemenata u podrumu. U podizborniku „storeys“ odabere se opcija „summary results“ kao što je prikazano na slici 88. Kako bi se prikazale mase, u izborniku „properties“ postavlja se opcija „type of loads“ na vrijednost „mass combinations“ i opcija „result type“ na vrijednost „storey data“ što znači da će se prikazati

mase. Sa slike 88 vidljivo je da su mase podruma zanemarene. Nakon toga, potrebno je provjeriti deformirane oblike konstrukcije. Najbitnija su prva dva oblika (koja bi trebala biti translacijska, jedan u x-smjeru, a drugi u y-smjeru. Prvi oblik može biti u x ili y-smjeru, drugi je onda u suprotnom). Prostorne pomake moguće je vidjeti u izborniku „results“ pomoću opcije „3D displacement“ kao što je prikazano na slici 89 (na slici je prikazan prvi oblik vibriranja). Vrijednosti pomaka nisu bitne, nego samo njihov oblik. U izborniku „properties“ vrijednost opcije „type of load“ postavlja se na „mass combinations“, a vrijednost opcije „mass combination“ (odmah ispod, crvenim označeno na slici 89) postavlja se na željeni oblik (n -ti oblik je označen s „CM1/ $n - f_n$ “ gdje je f_n prirodna frekvencija tog oblika, CM1 je naziv kombinacije masa). Prvi oblik odgovara najkraćoj frekvenciji, odnosno najduljem periodu. Sa slike 89 vidljivo je da je prvi oblik translacijski (u ovom slučaju u y-smjeru) što je u redu. Na slici 90 prikazan je drugi oblik, a na slici 91 treći oblik vibriranja konstrukcije. Drugi oblik je translacijski u x-smjeru, a treći je torzijski. U slučaju da je prvi ili drugi oblik bio torzijski, faktor ponašanja bio bi manji jer bi se sustav klasificirao kao torzijski savitljiv (mekan). U svakom modu se dio mase aktivira torzijski pa je potrebno znati kako odrediti je li mod rotacijski ili translacijski. U slučaju da za neki mod, pol rotacije leži unutar ploče, taj mod je rotacijski. Pol rotacije je točka koja ne doživljava translacijski pomak: Na slici 89 i 90 vidljivo je da sve točke na ploči imaju određeni pomak pa su ti modovi translacijski. Konstrukcija nije torzijski mekana jer je prvi mod u oba ortogonalna smjera translacijski. Na slici 91 (treći mod) vidljivo je da se pol rotacije nalazi blizu sredine ploče (ljubičasta točka u blizini otvora) pa je treći mod rotacijski (torzijski).



Slika 88. Mase koje su razmatrane u modalnoj analizi

Results

- Displacement of nodes
- 3D displacement**
- 3D stress
- Beams
- Dynamics
 - Eigen frequencies
 - Acceleration of nodes
 - Seismic detailed
- 2D Members
 - 2D displacement
 - 2D internal forces
 - 2D stress/strain
 - 2D contact stresses
- Tools (2D results)
- Storeys
 - Summary results
 - Detailed results
- Calculation protocol

Properties

3D displacement (1)

Name: 3D displacement

Result case

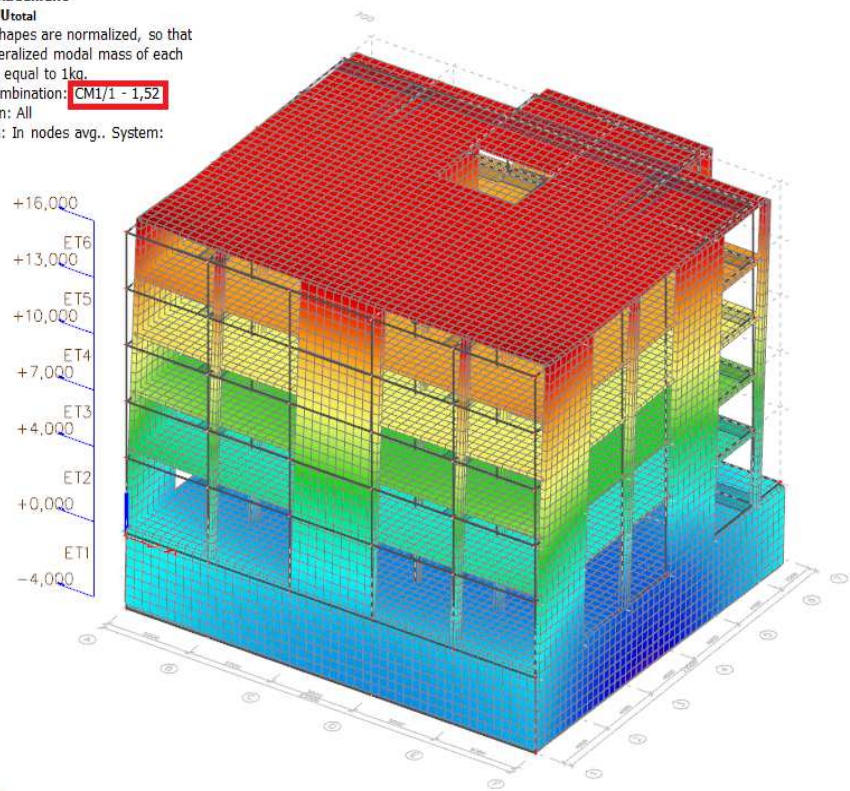
Type of load	Mass combinatio
Mass combination	CM1/1 - 1,52

Selection

Type of selection	All
Filter	No
Location	In nodes avg.
Value	U total
System	Global
Extreme 1D	Global

3D displacement

Values: U_{total}
 Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.
 Mass combination: **CM1/1 - 1,52**
 Selection: All
 Location: In nodes avg.. System: Global



Slika 89. Prvi oblik vibriranja

3D displacement

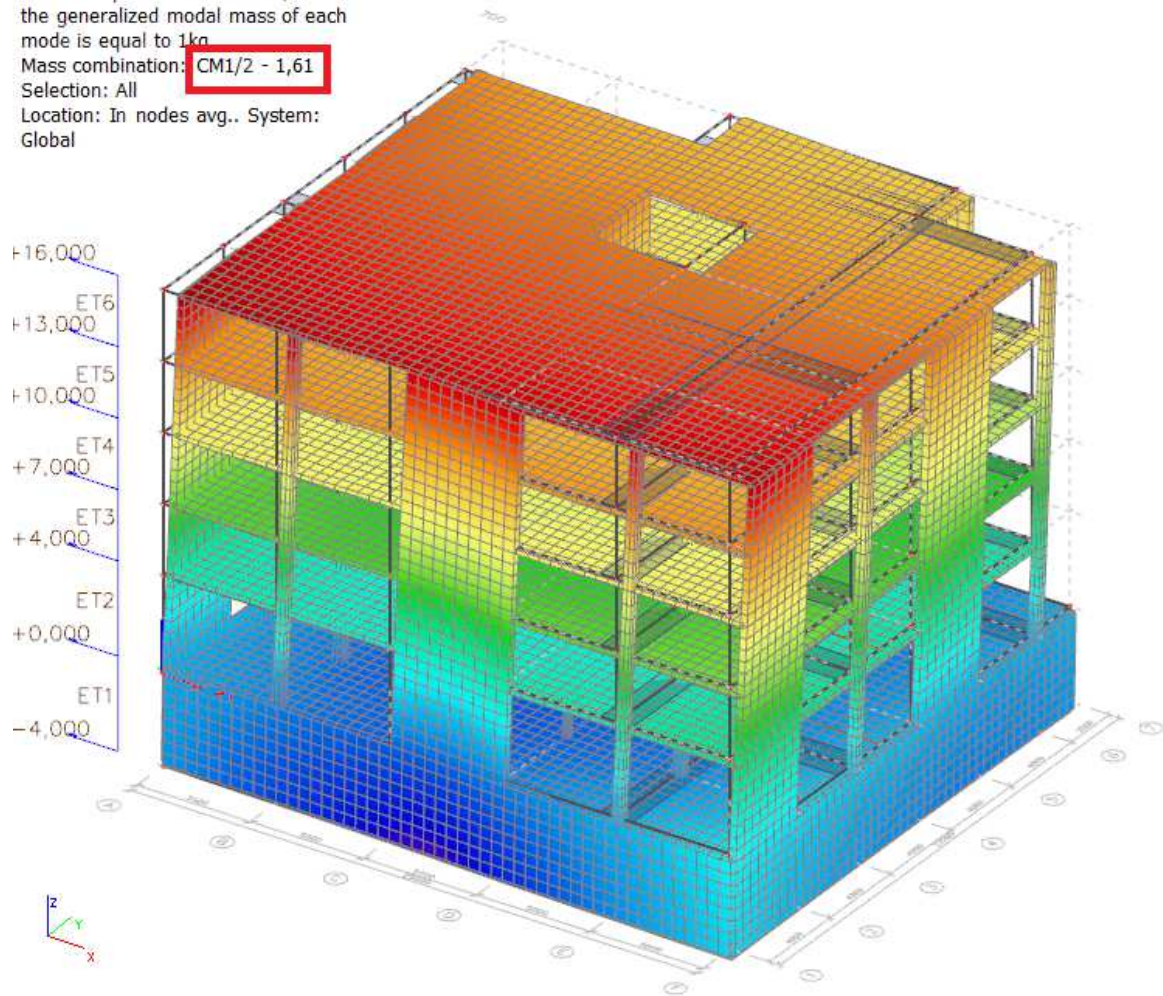
Values: U_{total}

Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1 kg

Mass combination: CM1/2 - 1,61

Selection: All

Location: In nodes avg.. System: Global



Slika 90. Drugi oblik vibriranja

3D displacement

Values: U_{total}

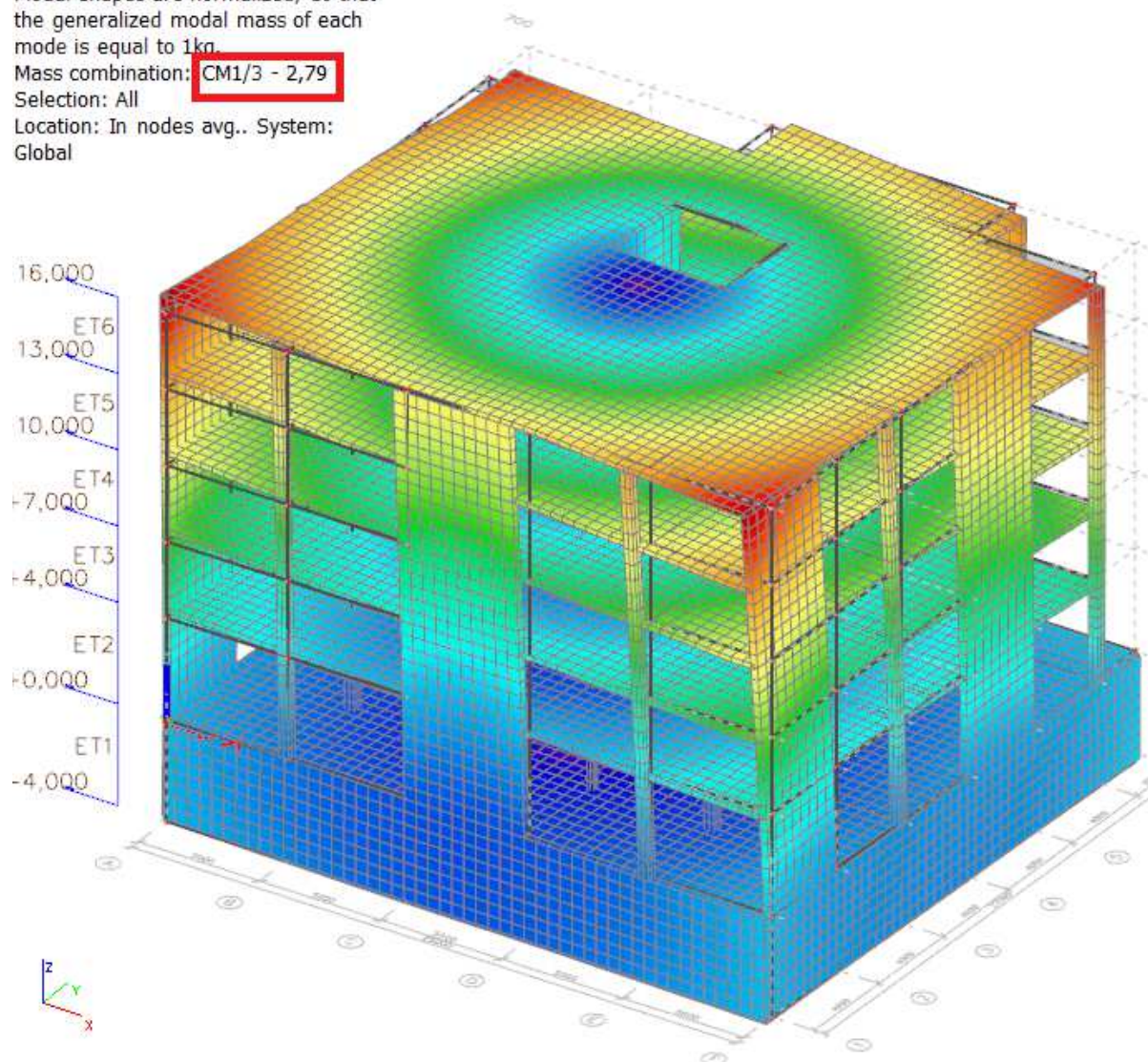
Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.

Mass combination: CM1/3 - 2,79

Selection: All

Location: In nodes avg.. System:

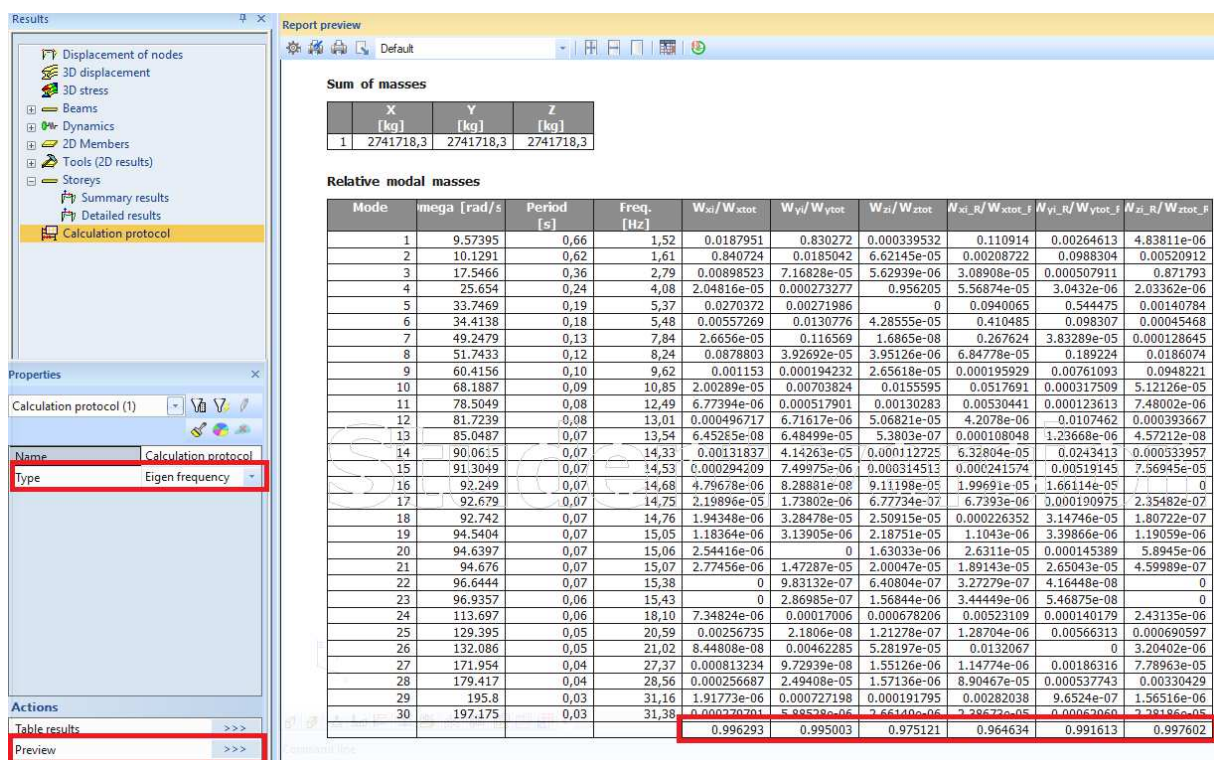
Global



Slika 91. Treći oblik vibriranja

Osim provjere razmatranih masa i oblika vibriranja potrebno je provjeriti koja količina mase se aktivirala. U izborniku „results“ se pritiskom na opciju „calculation protocol“ te zatim na „preview“ otvara prozor prikazan na slici 92. Vrijednost opcije „type“ treba postaviti na „eigen frequency“. Prema normi se zahtijeva da je količina aktivirane mase veća od 90% u slučaju korištenja modalne analize (što je ovdje potrebno zbog elementa koji nije kontinuiran od vrha do dna konstrukcije). Na dnu tablice prikazane na slici 92 vidljiva je suma aktiviranih masa od svih modova. U prvom stupcu nalazi se broj moda, u drugom frekvencija (ali ne prirodna, nego kružna ω_n), u trećem period, a u četvrtom prirodna frekvencija f_n . U stupcima od petog do desetog nalaze se postotci aktiviranja mase u pojedinom smjeru te na kraju suma aktiviranih masa za sve modove u pojedinom smjeru (peti stupac je za pomak u x-smjeru, šesti za pomak u y-smjeru, sedmi za pomak u z-smjeru, osmi za rotaciju oko x osi, deveti za rotaciju oko y osi

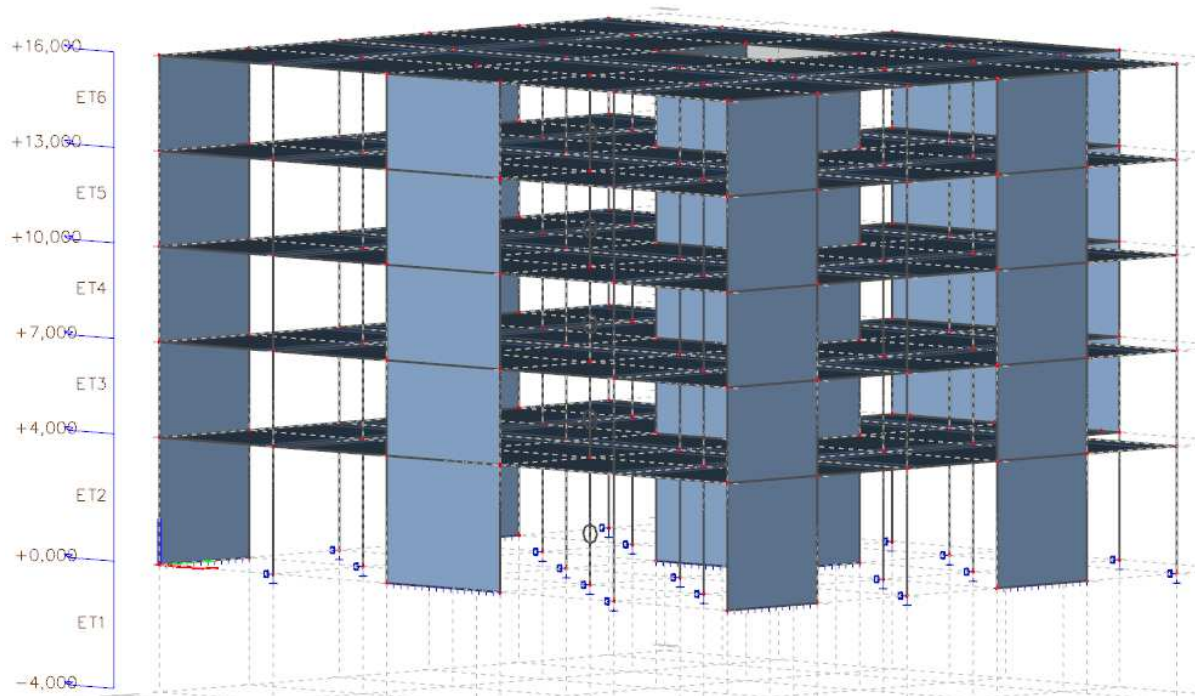
i deseti za rotaciju oko z osi). Tako je sa slike 92 vidljivo da se u prvom modu aktivira 83% mase translacijom u y-smjeru i vrlo mali dio mase u svim ostalim smjerovima iz čega je jasno da je to translacijski mod u y-smjeru. Drugi mod je translacijski u x-smjeru. Također je vidljivo da je treći mod pretežno torzijski jer se aktivira čak 87% mase rotacijom oko z osi. Za ovu konstrukciju više od 90% mase aktivira se već u prvih 8 modova što može skratiti vrijeme proračuna. U primjeru se proračun nastavlja sa svim modovima. Često se konstrukcija modelira za djelovanje potresa tako da je upeta na razini tla u konstrukciju ispod (podrum ili temelj) radi jednostavnijeg zadavanja oslonaca. Ponekad to može predstavljati problem pri aktivaciji 90% mase jer se dio mase u blizini upetog oslonca teže aktivira što ovdje nije slučaj (jer je posljednja masa 4 metra iznad oslonca koji nije upet nego djelomično popustljiv).



Slika 92. Aktivirane mase

Na slici 93 prikazan je model konstrukcije bez podrumne etaže, ali s upetim osloncima zidova i stupova prizemlja. U tablici prikazano na slici 94 (modalna analiza konstrukcije bez podruma) vidljivo je da se također aktivira preko 90% mase, ali ne u prvih 8 modova. U ovom slučaju nije bilo problema pri aktivaciji mase jer većina mase nije koncentrirana blizu tla. U prvom modu aktivira se 72% mase translacijom u y-smjeru i manji dio mase u svim ostalim smjerovima (translacijski mod u y-smjeru). Drugi mod je translacijski u x-smjeru, a treći mod torzijski. Prvi period konstrukcije po modelu sa slike 93 iznosi 0,34 sekunde i kraći je od prvog perioda sa slike 89, koji iznosi 0,66 sekundi. Razlog tome je veća krutost konstrukcije sa slike 93. Realno

ponašanje konstrukcije ovisi o krutosti tla, ali to ne znači da je model s podrumom precizniji. Preciznost tog modela ovisi o procjeni krutosti temeljnog tla, što je zadatak geotehničara. (Ponekad je poznata nosivost tla i predviđeno slijeganje. Krutost tla je tada omjer nosivosti i predviđenog slijeganja).



Slika 93. Model bez podruma

Razlika u modelima međutim nije problematična jer će potresna sila za oba modela biti približno jednaka (konstantni dio spektra za tlo tipa C je između 0,2 i 0,6 sekundi). Prvi period po modelu s podrumom je približno jednak 0,6 sekundi. Sila na obje konstrukcije je približno jednaka, ali će horizontalni pomak konstrukcije s podrumom biti veći jer je konstrukcija mekša (periodi su dulji) pa će taj model biti kritičniji. To ne znači da je taj model točniji, ali bez geotehničkog elaborata nemoguće je znati koja je krutost realnija. Stoga će se u daljnjem proračunu koristiti rezultati modela s podrumom.

Results Report preview

Sum of masses

	X [kg]	Y [kg]	Z [kg]
1	2709243,3	2709243,3	2709243,3

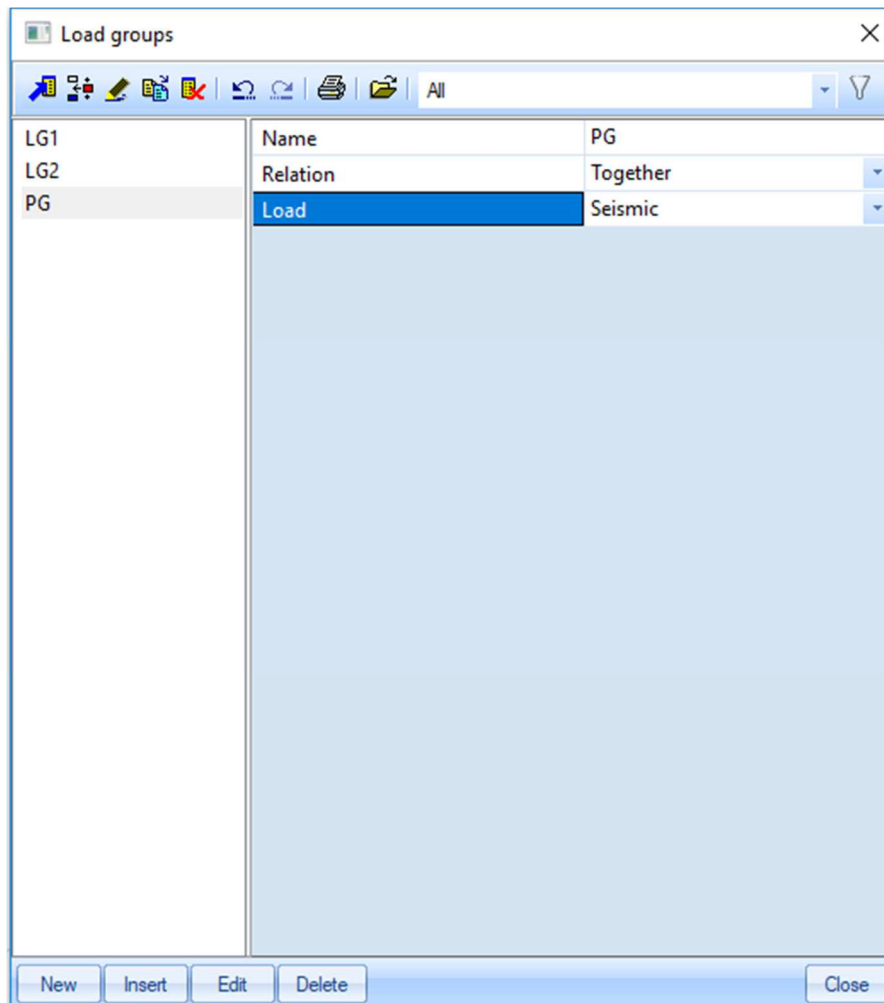
Relative modal masses

Mode	mega [rad/s]	Period [s]	Freq. [Hz]	W_{xi} / W_{xtot}	W_{yi} / W_{ytot}	W_{zi} / W_{ztot}	$N_{xi,R} / W_{xtot,R}$	$W_{yi,R} / W_{ytot,R}$	$W_{zi,R} / W_{ztot,R}$
1	18.5345	0,34	2,95	0.000152149	0.719895	0.000180365	0.0921745	1.27144e-05	0.000301228
2	21.3979	0,29	3,41	0.533248	0.000379424	3.97804e-07	5.87433e-05	0.0475062	0.205787
3	27.5163	0,23	4,38	0.273175	4.6642e-05	6.86984e-07	1.69179e-05	0.00825952	0.545904
4	64.7838	0,10	10,31	0	3.64119e-05	0.354466	0.161679	6.89953e-05	2.1545e-08
5	70.7731	0,09	11,26	0.00030797	0.000570662	0.0175215	0.012682	0.364484	0.000172541
6	71.6528	0,09	11,40	2.68447e-05	0.00567238	0.168356	0.148761	0.037003	1.56818e-05
7	79.6071	0,08	12,67	0.14912	3.04445e-05	2.91548e-05	5.74145e-07	0.160691	0.00220946
8	85.2944	0,07	13,58	5.64471e-05	0.171796	0.0344094	0.0475286	0.000389363	0.000217043
9	85.8591	0,07	13,66	3.82248e-07	0.0157615	0.0564802	0.126114	0.012616	2.64649e-06
10	86.9334	0,07	13,84	1.04964e-05	0.000839277	0.012881	0.0205947	0.0695566	0
11	88.3272	0,07	14,06	0	0.00109454	0.0455252	0.0067358	1.852e-05	9.41176e-07
12	91.9962	0,07	14,64	2.08762e-05	0.000386402	0.000787134	0.00317614	0.00124293	1.20154e-05
13	92.8481	0,07	14,78	1.62222e-05	2.5374e-05	2.48142e-06	3.7554e-07	0.000167381	6.93257e-06
14	92.9786	0,07	14,80	6.3077e-05	2.29982e-05	0.000129233	0.00054843	0.0043829	2.41253e-05
15	93.3143	0,07	14,85	9.26875e-06	0.00422636	0.00516515	0.0298592	0.000487417	2.47321e-05
16	94.7107	0,07	15,07	3.60149e-05	2.08564e-07	2.35271e-08	5.86698e-07	2.19361e-05	1.94085e-05
17	95.4332	0,07	15,19	0.000155717	2.82961e-05	5.7584e-05	0.00145896	0.0197719	7.95742e-05
18	95.9741	0,07	15,27	2.25413e-06	0.00135704	0.0219856	0.000238625	0.000331553	1.62872e-06
19	96.732	0,06	15,40	3.56573e-08	0.000261054	0.00220581	1.14283e-07	1.35057e-05	1.022e-06
20	97.0914	0,06	15,45	0	7.45943e-05	0.00498459	0.000595697	2.83225e-07	6.01115e-07
21	103.749	0,06	16,51	0.000699486	0.00028356	1.43775e-06	0.00015201	0.0014697	0.168916
22	148.449	0,04	23,63	0.0184064	8.76549e-05	0	8.95533e-05	0.0193815	0.0150838
23	163.157	0,04	25,97	3.8476e-05	0.0429807	3.38783e-07	0.0442923	3.92368e-05	0.000122316
24	179.118	0,04	28,51	0.00462285	1.57639e-05	4.67142e-08	1.50848e-05	0.00063592	0.000531009
25	200.042	0,03	31,84	0.000960769	9.92471e-08	0	3.20823e-08	0.00137253	1.42828e-05
26	209.099	0,03	33,28	4.63095e-06	0.0107007	2.6271e-05	0.0114775	4.12893e-06	1.4127e-05
27	216.775	0,03	34,50	0.00106767	6.56902e-05	3.34067e-07	5.65451e-05	0.000374497	0.0276354
28	235.928	0,03	37,55	2.25636e-06	0.00196687	2.6152e-07	0.00258637	2.2553e-06	1.65143e-05
29	276.602	0,02	44,02	0.000252096	6.25835e-06	5.5203e-08	1.38264e-05	9.97253e-05	0.00675049
30	307.24	0,02	48,90	0.000236794	4.12349e-06	6.36178e-08	5.2262e-06	0.000248769	0.00106124
				0.982692	0.978616	0.725196	0.710912	0.756055	0.974925

Slika 94. Aktivirane mase u modelu bez podruma

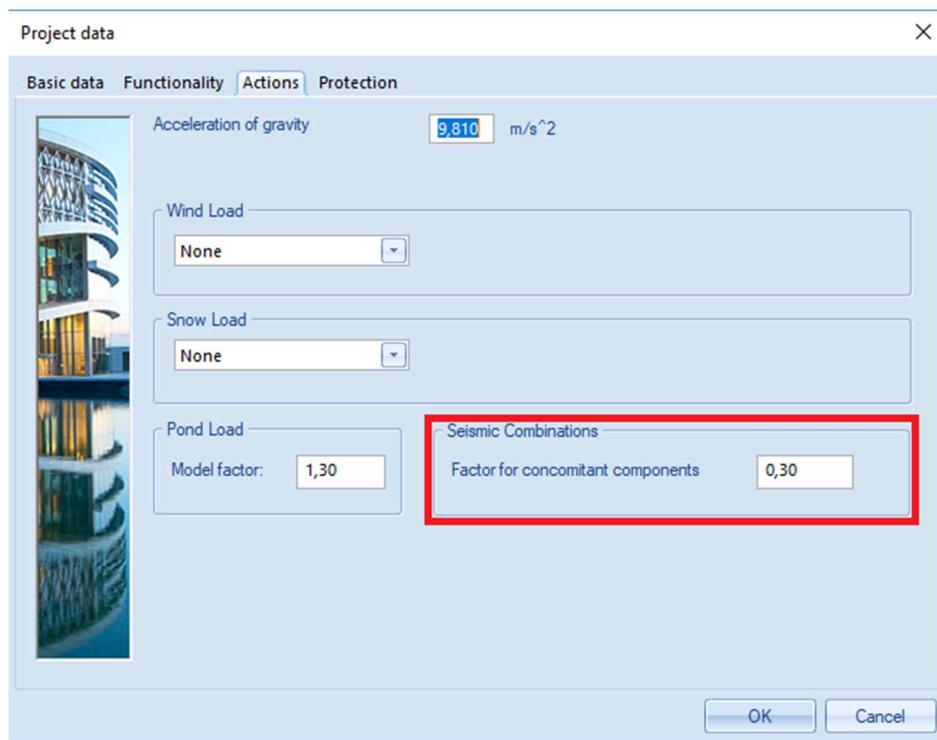
2.5.5 Potresno djelovanje

Prije nego što se provede proračun konstrukcije mora se definirati potresno djelovanje (prvi dio je modalna analiza kojom se određuju periodi, a na temelju njih je potrebno odrediti sile, što će se provesti spektralnom analizom). Također, na samom kraju je potrebno definirati kombinacije opterećenja bitne za proračun konstrukcije. Najprije se definira nova grupa opterećenja (kao što je na slici 54 već jednom učinjeno) koja je vezana za sva potresna opterećenja. Grupe opterećenja su bitne pri automatskom generiranju kombinacija jer se pomoću njih definira koja opterećenja se i kako kombiniraju unutar grupe kao što je ranije objašnjeno. Na slici 95 prikazane su postavke potresne grupe opterećenja što je vidljivo jer opcija „load“ ima vrijednost „seismic“. Njihov odnos opcijom „relation“ određen je kao „together“ jer će potres u x i y-smjeru (a i z ako se razmatra u konstrukciji) uvijek djelovati zajedno. Jedan smjer s punim iznosom opterećenja, a ostali s 30% potresnog opterećenja. Program automatski raspoznaje da treba razmotriti + i – predznake svakog smjera djelovanja sile (što bi ručno zahtijevalo veliku količinu potresnih kombinacija, 32 potresne kombinacije ako se zanemari vertikalna komponenta. To je osam kombinacija momenata za sva četiri različita položaja centra masa koja se javljaju zbog slučajnog ekscentriciteta).



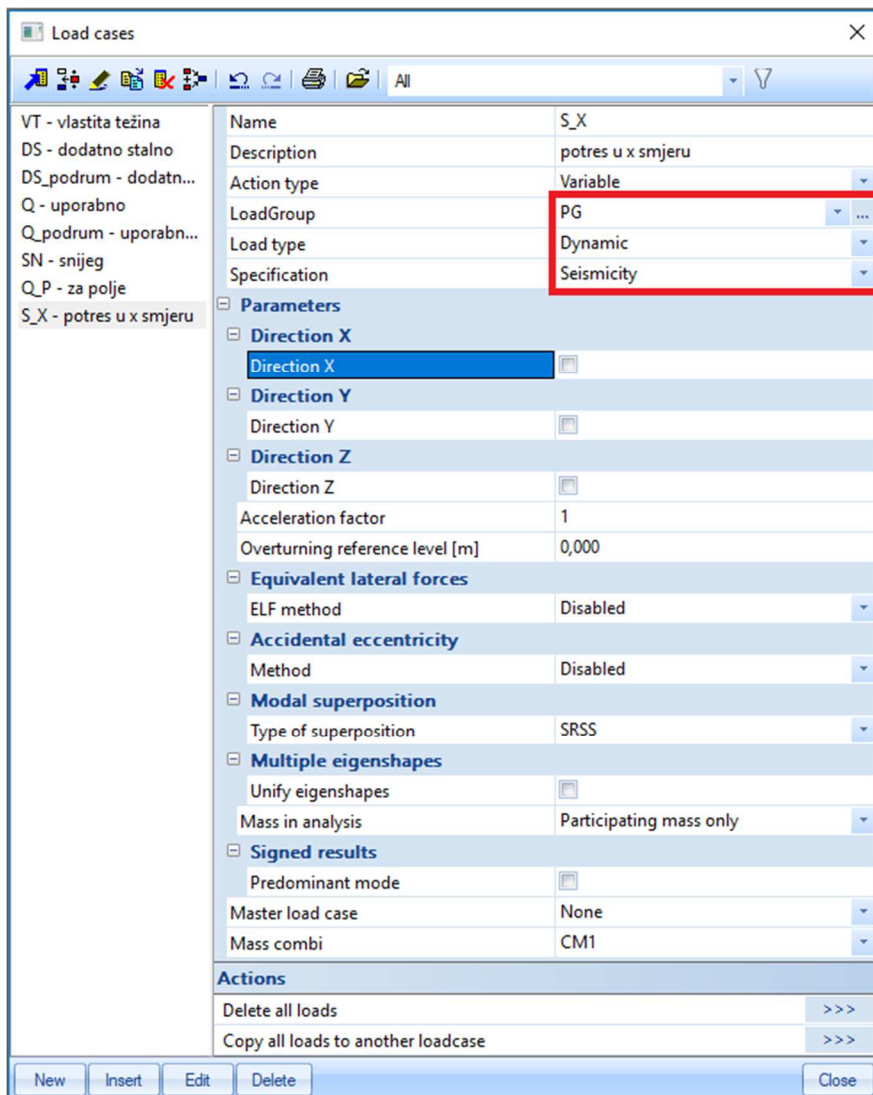
Slika 95. Potresna grupa opterećenja

U izborniku „project“, kartici „actions“ nalazi se opcija kojom se definira koeficijent pratećih potresnih djelovanja kao što je prikazano na slici 96. Vrijednost na početku iznosi 0,3 te ju nije potrebno mijenjati.

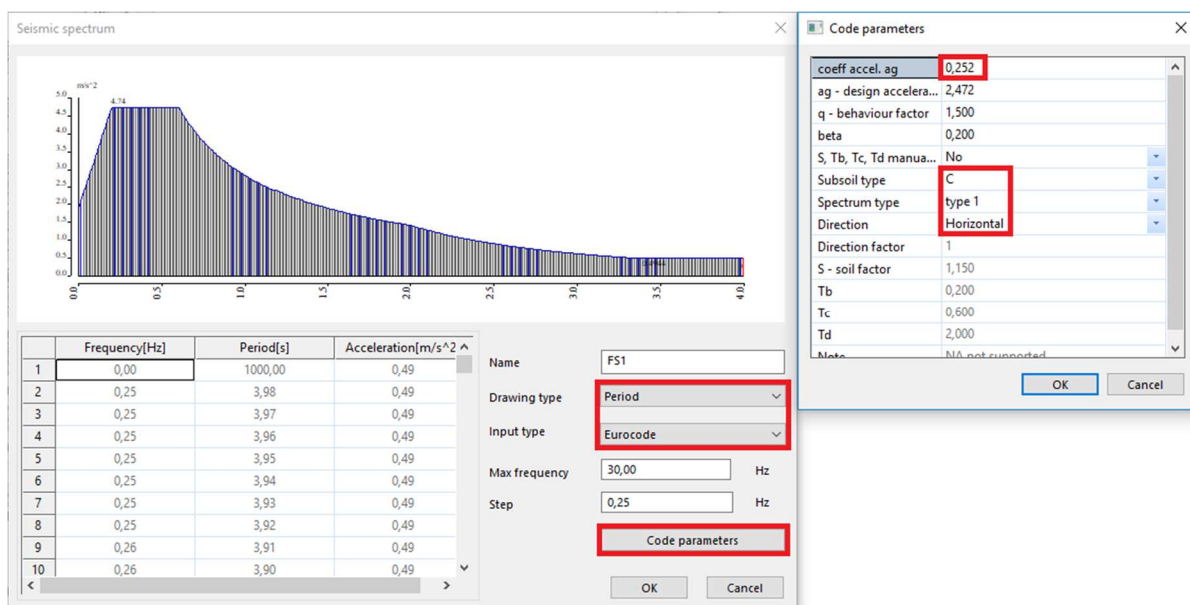


Slika 96. Koeficijent pratećih potresnih djelovanja

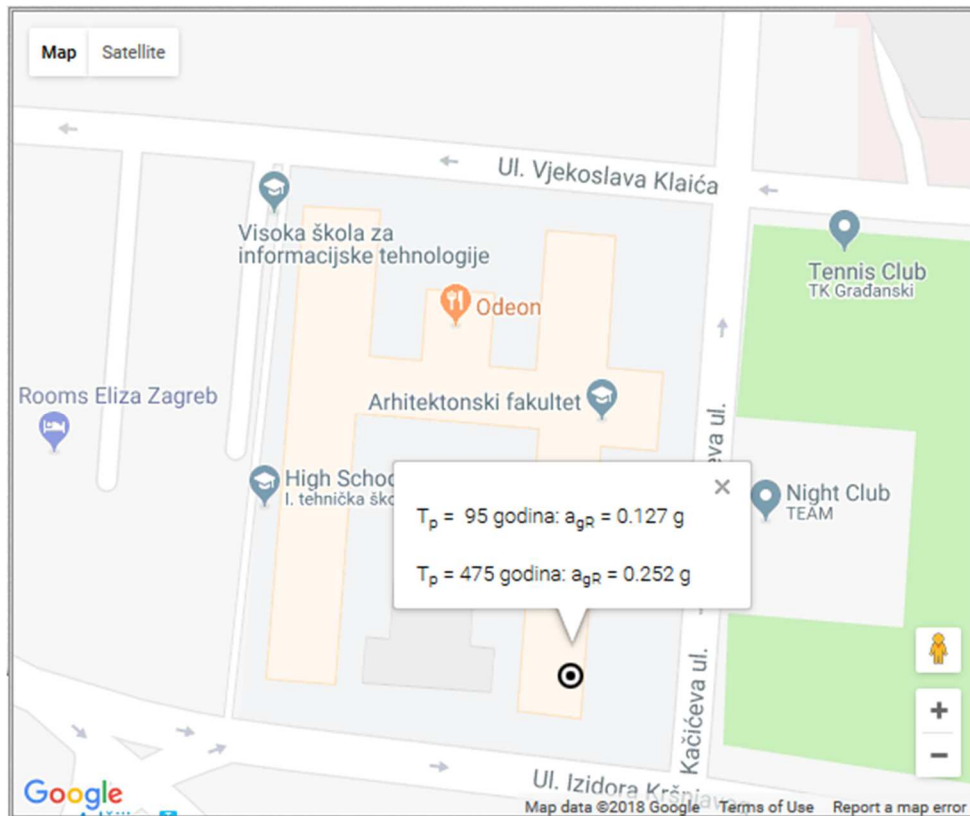
Potrebno je definirati potresne slučajeve opterećenja opcijom „load cases“ kao što je prije objašnjeno. Na slici 97 prikazane su prve postavke potresnog slučaja opterećenja. Bitno je odabrati grupu opterećenja koja je potresna, opcija „load type“ treba biti „dynamic“, a „specification“ treba biti „seismicity“. Nakon toga, za potres u x -smjeru potrebno je označiti kućicu pored opcije „direction x“. Prilikom pritiska na kućicu otvara se prozor s bazom podataka različitih potresnih spektara. Spektar se, međutim, određuje ručno pa se pritiskom na opciju „close“ otvori novi izbornik prikazan na lijevoj strani slike 98. Najprije je potrebno promijeniti način crtanja spektra s frekvencijskog na spektar prikazan ovisno o periodu što se određuje opcijom „drawing type“. Opcija „input type“ postavlja se na „eurocode“. Pritiskom na opciju „code parameters“ otvara se novi izbornik prikazan na desnoj strani slike 98. Opcijom „coeff accel. ag“ unosi se akceleracija tla (potresna pobuda) kao dio akceleracije slobodnog pada. Na slici 99 vidljivo je da potresna pobuda za povratni period od 475 godina iznosi $a_{gR} = 0,252 \cdot g$ pa se u „coeff accel. ag“ unosi vrijednost 0,252. Drugi redak „ag design acceleration“ se automatski popuni jer je on od prvog retka veći za akceleraciju slobodnog pada, odnosno $a_{gR} = 0,252 \cdot 9,81 = 2,472 \text{ m/s}^2$.



Slika 97. Zadavanje potresnog slučaja opterećenja



Slika 98. Definiranje elastičnog spektra

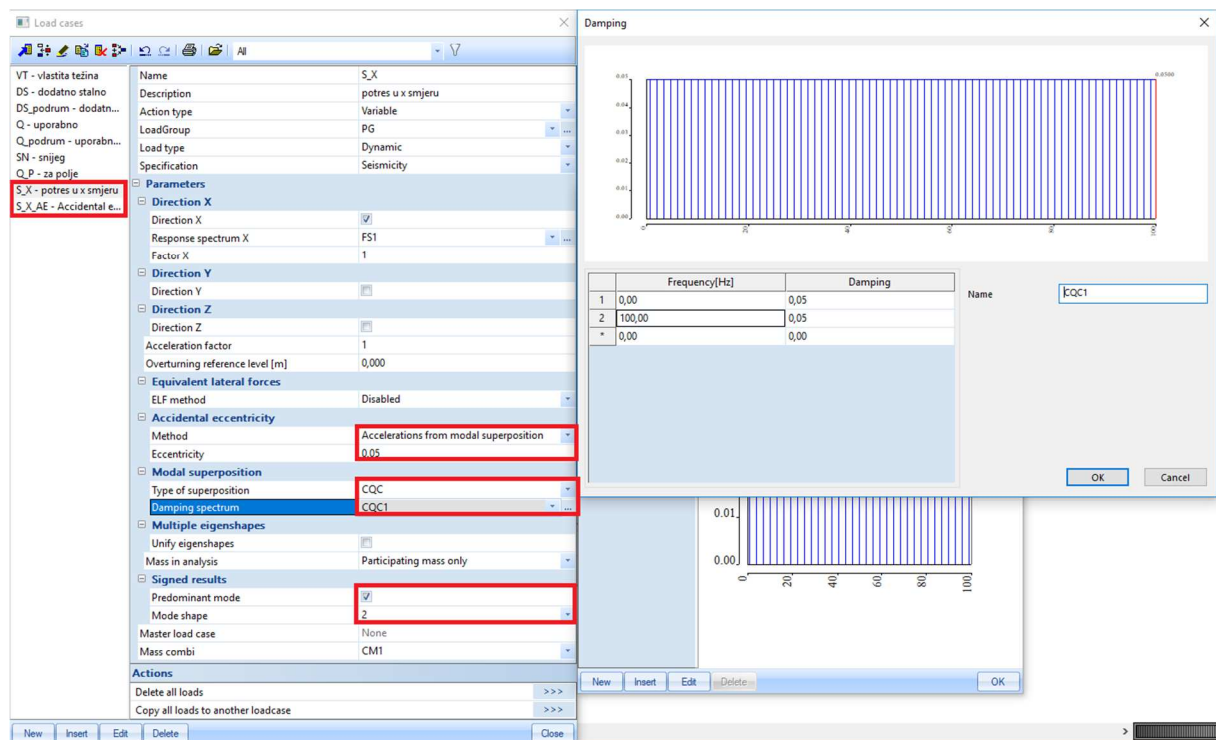


Slika 99. Potresna pobuda za lokaciju konstrukcije

Faktor ponašanja konstrukcije u ovom trenutku nije bitan (jer još uvijek konstrukcija nije klasificirana). Parametre vezane za spektar (S , T_b , T_c ...) moguće je unijeti ručno ili automatski. Za automatsko zadavanje potrebno je označiti „no“ u petom redu izbornika. Opcijom „subsoil type“ odabire se vrsta tla koja je u ovom slučaju C zbog toga što je tlo kruta glina (koja je prema normi C tip tla). Tip tla A su stijene, tip B vrlo kruta tla, tip C kruta i srednje kruta tla i tip D meka tla. **Uglavnom je moguće za kontinentalnu Hrvatsku pretpostaviti tip tla C, a za primorsku tip tla A (samo pretpostavka, stvarnu klasifikaciju treba uzeti iz geotehničkog elaborata).** Opcijom „spectrum type“ odabire se tip spektra 1 ili 2. U Hrvatskoj se dopušta samo uporaba spektra 1 koji odgovara zonama gdje je očekivana magnituda potresa veća od 5,5 stupnjeva. Opcijom „direction“ određuje se radi li se o horizontalnom ili vertikalnom spektru. Vertikalno ubrzanje tla može se procijeniti kao $a_{vg} = 0,9 \cdot a_{hg} = 0,9 \cdot 0,252 \cdot g = 0,23 \cdot g$. Kako je $a_{vg} = 0,23 \cdot g < 0,25 \cdot g$ i kako nema elemenata osjetljivih na vertikalnu potresnu pobudu (npr. horizontalne konzole) vertikalna komponenta potresnog djelovanja smije se zanemariti.

Na slici 100 prikazan je ispunjen izbornik sa slike 97. Vidljivo je da je opcijom „response spectrum x“ odabran spektar FS1 definiran na slici 98 i da se potresna sila u x-smjeru množi koeficijentom 1 opcijom „factor“ (y-smjer se množi s 0,3 kao što je vidljivo na slici 96). Nije potrebno aktivirati y-smjer (bilo bi da je neki mod imao velik doprinos translacije u x i y-smjeru

istovremeno), a z-smjer se svakako zanemaruje. Opcijom „ELF method“ moguće je odrediti parametre za proračun ekvivalentnom bočnom silom što u ovom slučaju nije moguće.



Slika 100. Potresni slučaj opterećenja

U podizborniku „accidental eccentricity“ odabire se način uvođenja slučajnog ekscentriciteta. Prema normi je potrebno uvesti ekscentricitet sile, tj. potresna sila ne djeluje u centru masa nego 5% tlocrtne dimenzije dalje od centra mase (u bilo kojem mogućem smjeru pa postoje četiri mogućnosti). Opcijom „method“ određuje se način na temelju kojeg se određuje ekscentricitet, a vrijednost „accelerations from modal superposition“ znači da se moment torzije (koji nastaje zbog ekscentriciteta sile) dobije na način se sila dobivena superpozicijom modova pomnoži s ekscentricitetom (5%). Osim te opcije moguće su još dvije, linearna i prema određenom obliku (modu). Linearna je klasična metoda koja se koristi pri ručnom proračunu (to je zapravo u skladu s prvim modom koji je uglavnom dominantan). Sve tri opcije daju zadovoljavajuće rezultate. Opcijom „eccentricity“ određuje se iznos ekscentriciteta u odnosu na tlocrtnu dimenziju. Opcija „type od superposition“ može poprimiti vrijednost „SRSS“ ili „CQC“, a služi za određivanje načina kombiniranja različitih modova (kako naći moment kad za svaki mod postoji određeni moment u zidu, ne koristi se zbrajanje). Prva metoda je znatno jednostavnija i zato prikladnija za ručni proračun, ali nije uvijek primjenjiva (što se može nadomjestiti opcijom „unify eigenmodes“). Opcija „CQC“ uvijek je primjenjiva, ali je potrebno unijeti graf prigušenja u ovisnosti o periodu. Iako prigušenje nije jednako kroz cijeli spektar, varijacija je mala pri malim prigušenjima kao što je 5% (prigušenje za beton kao što je

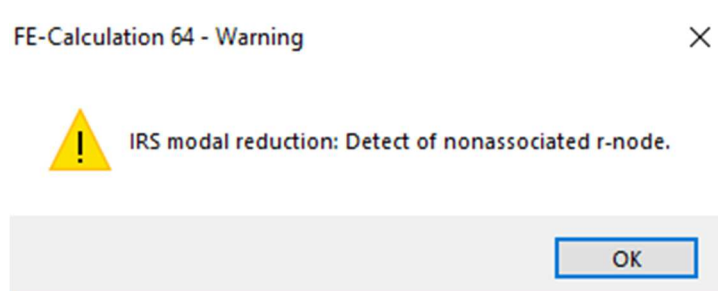
spomenuto na početku poglavlja) pa se može pretpostaviti (u skladu s normom) konstantno prigušenje kroz cijelo područje frekvencija kao što je vidljivo na desnoj strani slike 100. S lijeve strane slike 100 vidljivo je da se automatski generira slučaj opterećenja s nazivom „S_X_AE - accidental eccentricity“. Pri dnu se nalazi opcija „predominant mode“ u izborniku „signed results“ prema kojoj je moguće prikazati predznake momenata. Naime, pri modalnoj analizi predznaci unutarnjih sila nestaju. Razlog tome je što nemaju svi modovi isti predznak na istom mjestu (npr. zamislite modove jednake modovima izvijanja štapa, prvi i drugi mod se na jednoj polovici visine zbrajaju, a na drugoj polovici oduzimaju). Također se na kraju rezultati svih modova moraju zbrojiti (ili SRSS ili CQC metodom). Tako se na primjer SRSS metodom modovi zbrajaju prema izrazu

$$E_d = \sqrt{\sum E_n^2} \quad (2.5)$$

Gdje je E_d konačni učinak djelovanja (npr. moment)
 E_n učinak djelovanja pojedinog moda

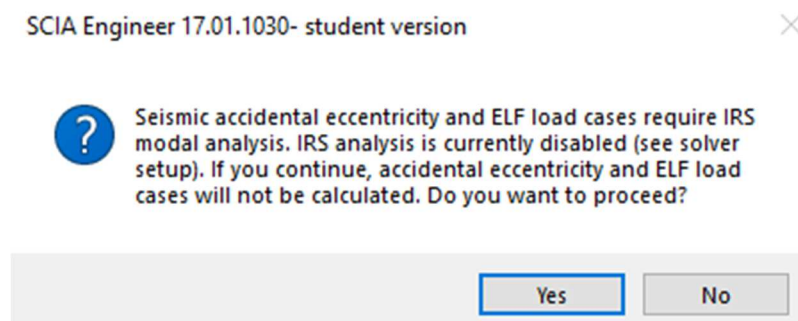
Vidljivo je da se kvadriranjem gubi predznak učinka djelovanja, a ponekad je predznak bitan. Postoji opcija automatskog određivanja dominantnog moda, ali prema uputstvima za korištenje programa SCIA bolje je unijeti dominantni mod. Odabran je drugi mod jer je prema slikama 90 i 92 to dominantan mod za x-smjer. Isti postupak se ponavlja za y-smjer, ali je za y-smjer dominantan prvi mod i umjesto „direction x“ označava se „direction y“.

Nakon što su određeni potresni slučajevi opterećenja provodi se linearni proračun konstrukcije. U izborniku „calculation/mesh“ pritiskom na opciju „calculation“ otvara se izbornik sa slike 87. Umjesto opcije „modal analysis“ odabire se opcija „linear analysis“. Moguće je da se u programu javi problem jer posljednja verzija (trenutno) ne podržava elastične oslonce. U tom slučaju potrebno je u izborniku „structure“ sa slike 6 promijeniti vrijednost „v17“ na „v16 and older“. Moguće je da se i tada javi problem prikazan na slici 101. U tom slučaju, problem je moguće ukloniti, ako se ne koristi IRS metoda objašnjena ranije.



Slika 101. Moguća pogreška u programu

U slučaju da se ne koristi IRS metoda, slučajni ekscentricitet je potrebno zadati ručno. Nakon što se pokuša provesti proračun pojavi se upozorenje prikazano na slici 102 gdje je to navedeno.



Slika 102. Upozorenje zbog isključenja IRS metode

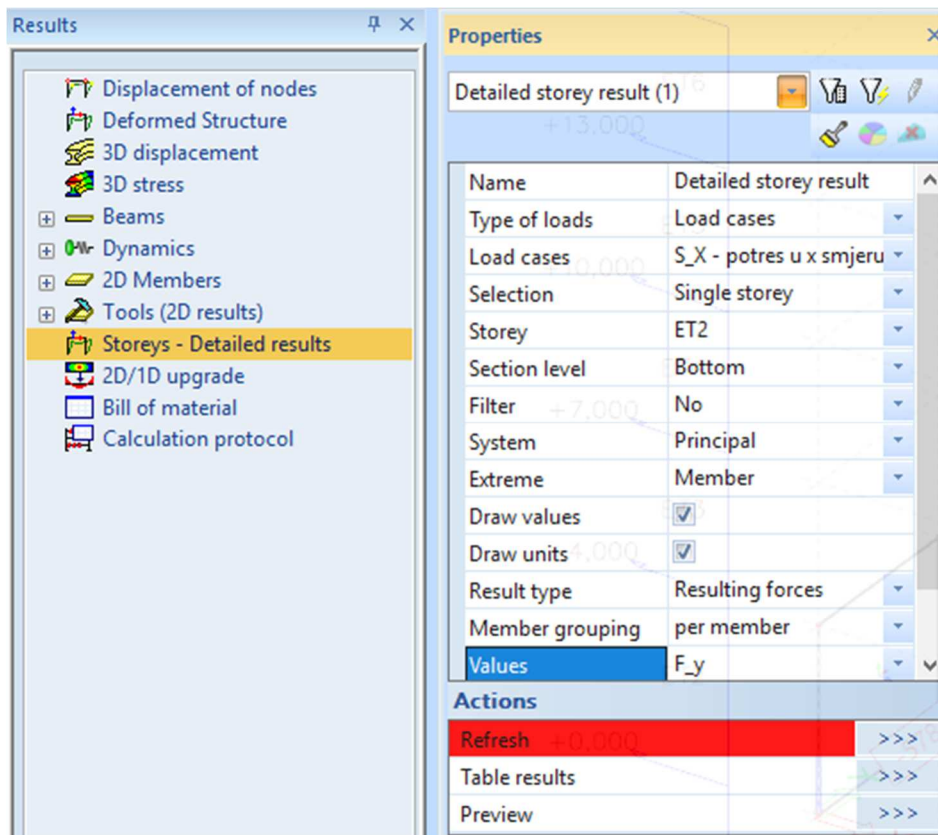
Postupak kojim je moguće ručno unijeti slučajni ekscentricitet prikazan je u poglavlju 2.6. Nakon što je proveden proračun potrebno je odrediti faktor ponašanja. Prema normi [2] faktor ponašanja je globalan, odnosno određuje se za cijelu konstrukciju. Ne ponašaju se, međutim svi elementi jednako pri potresu.

2.5.6 Određivanje faktora ponašanja

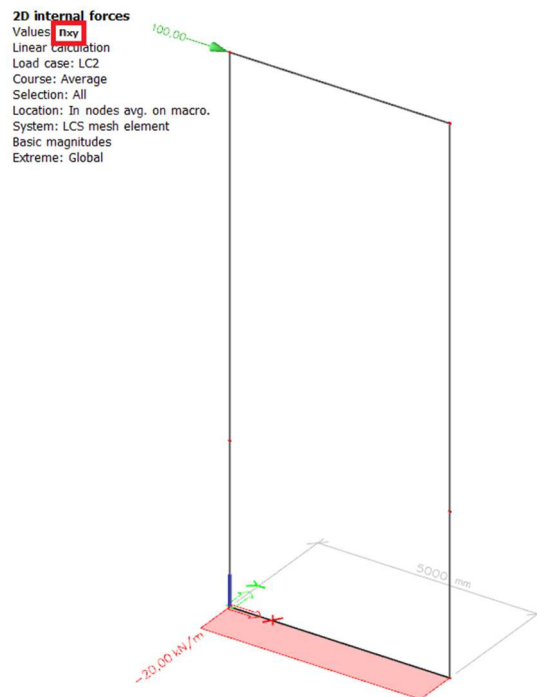
Kako bi se mogao odrediti faktor ponašanja, potrebno je klasificirati sustav. Da bi se sustav mogao klasificirati kao zidni, zidovi moraju preuzimati više od 65 % ukupne potresne sile. U nastavku je prikazano određivanje tog postotka iz rezultata prikazanog modela konstrukcije.

U izborniku „results“ pritiskom na opciju „storeys – detailed results“ otvara se izbornik sa slike 103. Postavkom opcija kao na slici 103 i pritiskom na opciju refresh prikazuju se resultantne sile u elementima na dnu prizemlja zbog potresa u x smjeru. Opcijom „load cases“ odabire se slučaj opterećenja. Opcijom „selection“ prikazuju se rezultati za jednu ili više etaža (ili sve). Opcijom „storey“ odabire se etaža. Opcijom „section level“ odabire se prikaz rezultata na vrhu (top), sredini (middle) ili na dnu (bottom). Opcijom „extreme“ prikazuje se vrijednost za silu na svakom zidu. Opcijom „result type“ odabire se vanjska ili unutarnja sila. U ovom slučaju odabrane su vanjske sile. Kad bi se željela prikazati unutarnja sila, odabrala bi se vrijednost „n_xy“ jer ona predstavlja posmik kao što je vidljivo na slici 104. Sile dobivene preko „internal forces“ ne razlikuju se značajno od ovih dobivenih preko „resulting forces“. U slučaju da se koriste unutarnje sile bitno je označiti opciju „display total value“ jer se time prikazuje unutarnja sila (za razliku od jedinične sile u svakom konačnom elementu). Opcijom „member grouping“

prikazuje se sila raspodijeljena na elemente ili ukupna rezultanta za cijelu konstrukciju. Opcijom „values“ prikazuje se unutarnja sila u x, y ili z-smjeru.

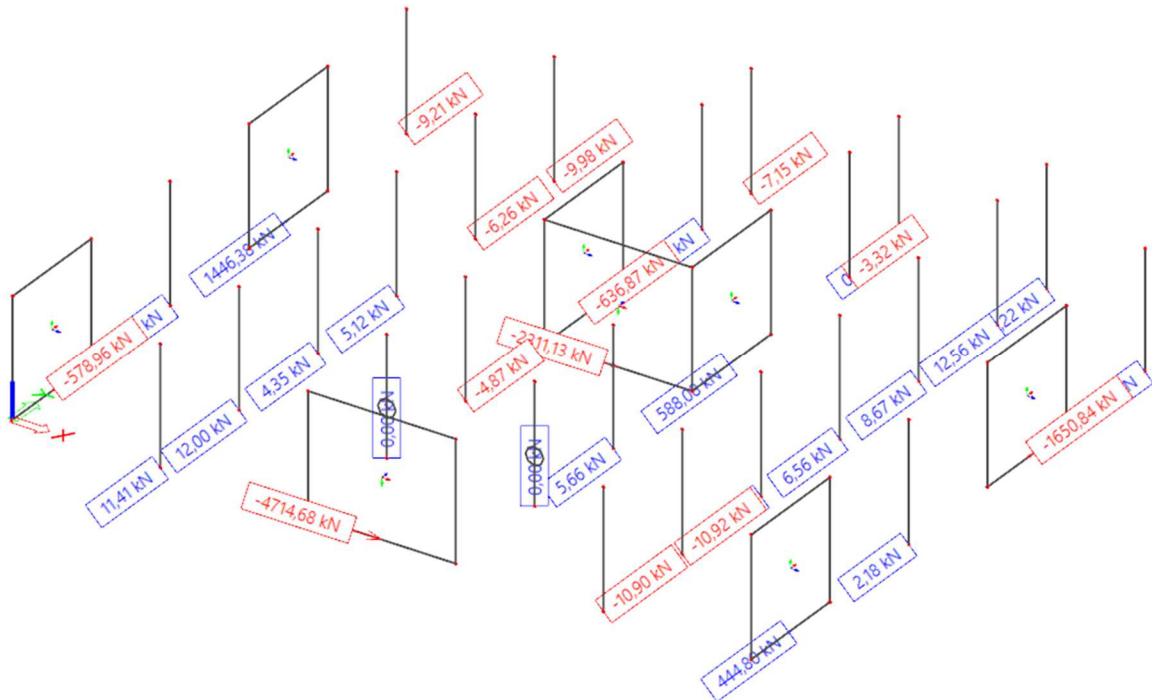


Slika 103. Poprečne sile zbog potresa



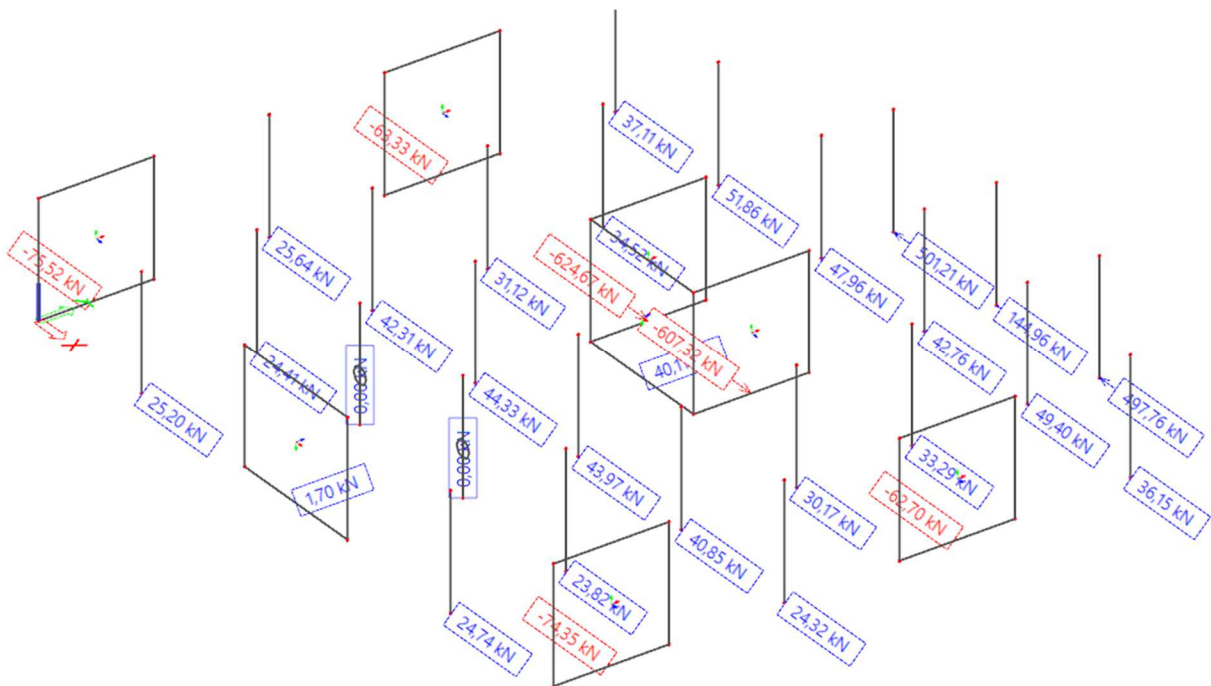
Slika 104. Posmične sile n_{xy}

Na slici 105 prikazane su sile u pojedinim elementima konstrukcije za postavke sa slike 103. Prikazane su sile u globalnom x-smjeru konstrukcije.



Slika 105. Raspodjela sila po elementima konstrukcije

Sa slike 105 vidljivo je da dva zida koja se pružaju u globalnom x-smjeru preuzimaju sile od 4714,68 kN, odnosno 2311,13 kN. Ostali zidovi su u y-smjeru, a poprečne sile na tim zidovima moguće je dobiti ako se opcija „values“ sa slike 103 postavi na vrijednost „F_z“. Na slici 106 prikazane su te sile.



Slika 106. Sile F_z

Vidljivo je da preostali zidovi preuzimaju (s lijeva na desno, od gore prema dolje na slici) 75,52 kN; 63,33 kN; 624,67 kN; 607,62 kN; 74,35 kN i 62,70 kN. Ukupno svi zidovi preuzimaju silu od $F_{w,x} = 4714,68 + 2311,13 + 75,52 + 63,33 + 624,67 + 607,62 + 74,35 + 62,7 = 8534$ kN.

Promijeni li se opcija „member grouping“ kako je prikazano na slici 107 prikazuje se ukupna potresna sila, odnosno „base shear“. Ukupna potresna sila iznosi $F_x = 10359,8$ kN. Zidovi

preuzimaju $\frac{F_{w,x}}{F_x} = \frac{8534}{10359,8} = 0,82 = 82\%$ ukupne potresne sile pa se sustav može

klasificirati kao zidni (jer je $82 > 65$) (napomena: dva zida koja se pružaju u x smjeru preuzela su više od 65%, što je logično jer je i pobuda u x-smjeru). Isti postupak potrebno je ponoviti i

za y smjer, za koji je $\frac{F_{w,y}}{F_y} = 87\%$. Moguće je da se konstrukcija u jednom smjeru klasificira

na jedan način, a u drugom na drugi (što ovdje nije slučaj). Tada je faktor ponašanja drugačiji za x i y-smjer konstrukcije. Osnovna vrijednost faktora ponašanja zidnog sustava srednje duktilnosti (DCM) iznosi $q_0 = 3,0$, ali za konstrukcije nepravilne po visini (kao što je ova konstrukcija) smanjuje se za 20 %, odnosno iznosi $q_0 = 0,8 \cdot 3,0 = 2,4$. Proračunska vrijednost faktora ponašanja jednaka je umnošku osnovne vrijednosti q_0 i faktora kojim se razmatra prevladavajući oblik sloma k_w . Tim faktorom u obzir se uzima činjenica da niski i dugački (zdepasti) zidovi mogu otkazati posmično. Posmični oblik sloma nepovoljan je u odnosu na savojni jer je količina energije potrebna za doseganje posmičnog sloma znatno manja. Drugim riječima, duktilnost sustava je manja, a faktor ponašanja je mjera duktilnosti. Na posmični oblik sloma osjetljiviji su zidovi za koje se zahtjeva veća duktilnost (npr. DCH zidovi) jer kroz veće plastično područje moraju osigurati da do otkazivanja ne dođe posmikom. Prilikom savijanja se otvaraju pukotine u betonu (u zidovima horizontalne). Prilikom promjene smjera savijanja (jer potres mijenja smjer) dio presjeka koji je raspucao je u tlaku. Međutim, ako su ostvarene plastične deformacije, pukotine iz prethodnog opterećenja neće se odmah zatvoriti. Zbog toga se posmična nosivost betona ne aktivira odmah. Tako je histereza „pritisnuta“ i pokriva manju površinu nego savojna (površina ispod histereze predstavlja energiju, a pojava pritiskanja histereze na engleskom se naziva „pinching“). Izraz za smanjenje faktora ponašanja je:

$$k_w = \frac{1 + \alpha_0}{3} \leq 1,0 \quad (2.6)$$

Gdje je: $\alpha_0 = \frac{\sum h_{wi}}{\sum l_{wi}}$

$\sum h_{wi}$ zbroj visina svih zidova u konstrukciji

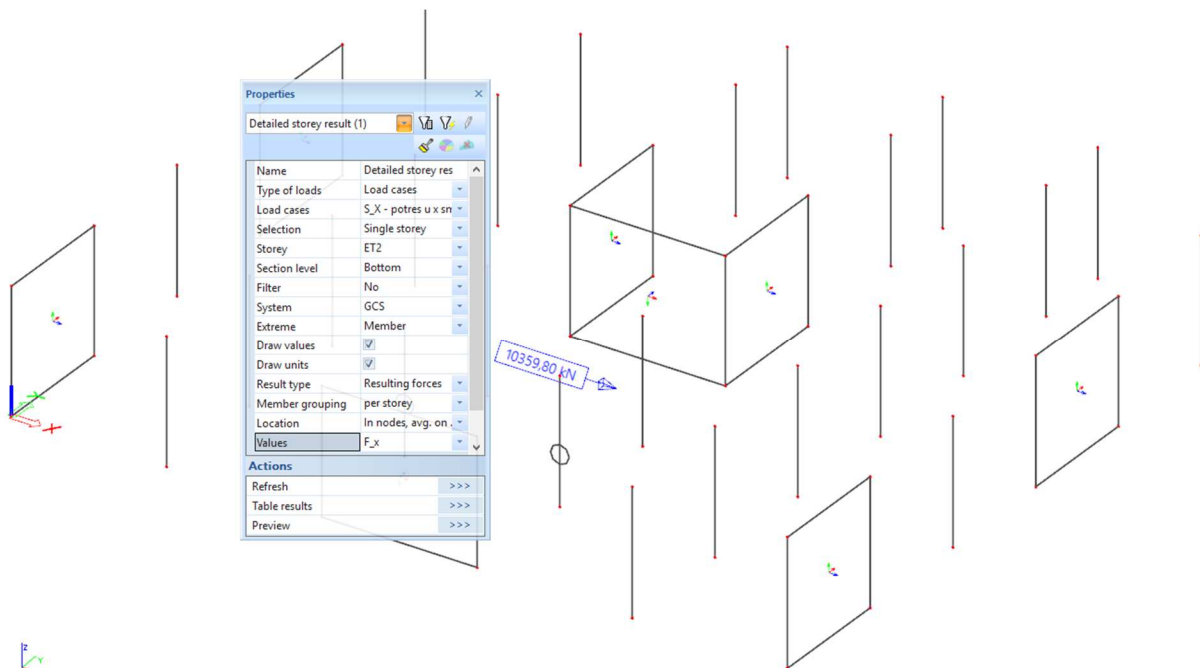
$\sum l_{wi}$ zbroj duljina svih zidova u konstrukciji

Vidljivo je da za $\frac{\sum h_{wi}}{\sum l_{wi}} < 2,0$ dolazi do smanjenja faktora ponašanja. Dakle, zid kojem je duljina veća od polovice visine smatra se zdepastim. Kako je:

$$\alpha_0 = \frac{\sum h_{wi}}{\sum l_{wi}} = \frac{8 \cdot 16,0 + 12}{6 \cdot 4,0 + 2 \cdot 5,0 + 10,0} = 3,18 \quad (2.7)$$

faktor $k_w = 1,0$ Proračunski faktor ponašanja iznosi $q = k_w \cdot q_0 = 1,0 \cdot 2,4 = 2,4$. U slučaju da nisu svi zidovi konstrukcije približno jednake visine, izraz (2.7) ne smije se koristiti. Tada je moguće faktor α_0 odrediti prema najnepovoljnijem zidu (onaj za koji je α_0 najmanji) što je na strani sigurnosti jer je tada faktor ponašanja manji.

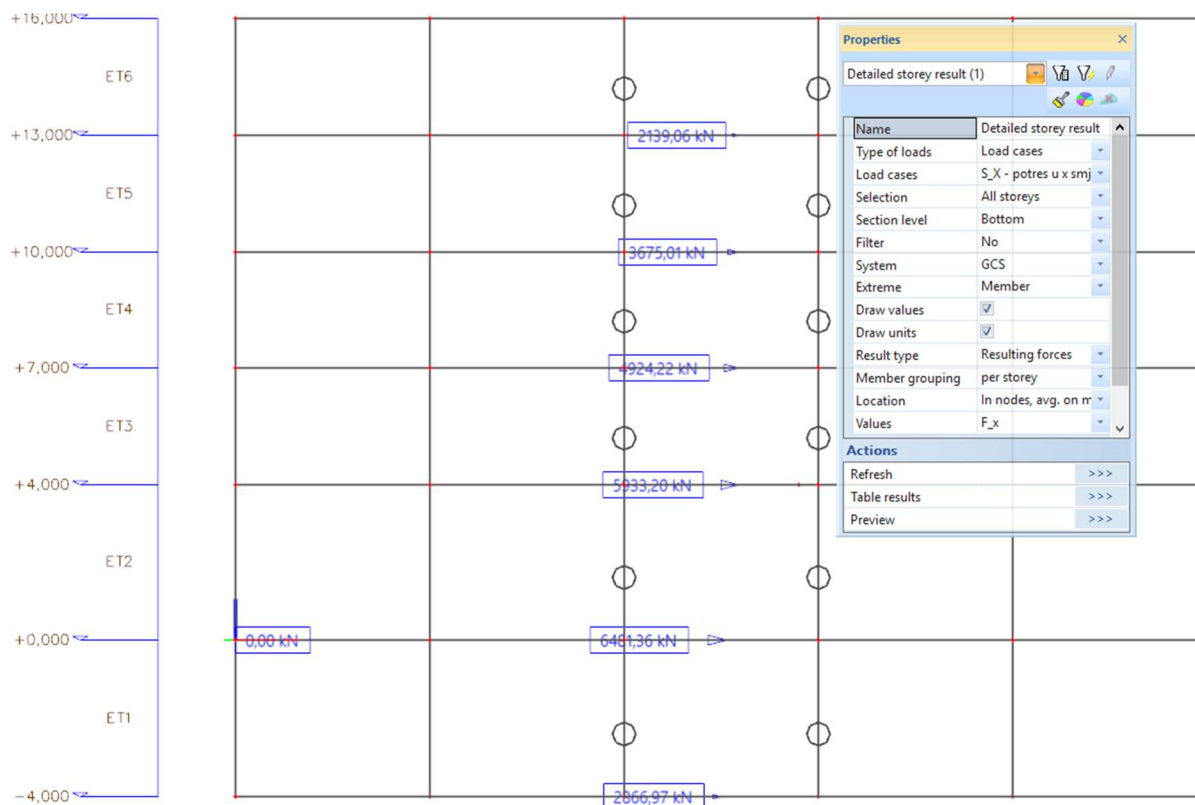
S obzirom na to da je u prvom koraku pretpostavljena vrijednost faktora ponašanja 1,5, potrebno se vratiti u izbornik za zadavanje potresne sile na slici 98 i promijeniti vrijednost faktora ponašanja s 1,5 na 2,4 za potresnu silu u x i u y-smjeru. Nakon toga je potrebno ponovo provesti proračun.



Slika 107. Ukupna potresna sila na razini etaže

2.6 Slučajni ekscentricitet

U slučaju da nije moguće provesti IRS metodu, potrebno je ručno proračunati slučajni ekscentricitet. Slučajni ekscentricitet iznosi 5% dimenzije poprečnog presjeka kao što je ranije objašnjeno. Razmatra se istovremeno djelovanje ekscentriciteta u oba smjera, dakle „load group“ je „together“. Potrebno je potresne sile pomnožiti ekscentricitetom kako bi se odredio moment torzije. Taj moment torzije zatim je potrebno nanijeti u posebni slučaj opterećenja na svakoj etaži. Posmične sile po etažama uslijed potresa u x-smjeru po pojedinoj etaži prikazane su na slici 108. Potrebno je odrediti horizontalne sile koje su uzrokovale te posmične sile. Horizontalne sile djeluju na razini etaža (to nije potpuno točno, ali je većina mase koncentrirana na razini etaže). To znači da je posmična sila konstantna unutar etaže. Na najvišoj etaži (vrh ET6) djeluje sila koja iznosi 2139,06 kN, a na sljedećoj (vrh ET5) djeluje sila koja iznosi $3675,01 - 2139,06 = 1535,95$ kN. Preostale sile određuju se na jednak način, a konačne vrijednosti prikazane su u tablici 14. Ekscentricitet $e = 25 \cdot 0,05 = 1,25$ m. Moment M_T predstavlja torzijsko opterećenje, a ne unutarnji torzijski moment (unutarnji torzijski moment je u tablici T), a izračunat je kao $M_T = H \cdot e$. Radi unošenja opterećenja u program koncentrirani moment zamjenjuje se linijskim opterećenjem po rubu ploče. Zamjensko opterećenje linearno je promjenjivo, a rubna (najveća) vrijednost prikazana je u tablici kao p. Vrijednost je dobivena tako da je rezultatna sila jednaka nula, a rezultatni moment iznosi M_T (sila iznosi $P = p \cdot 0,5 \cdot L \cdot 0,5 = 0,25 \cdot p \cdot L$, a moment iznosi $M_T = P \cdot 0,667 \cdot L = 0,167 \cdot p \cdot L^2$).

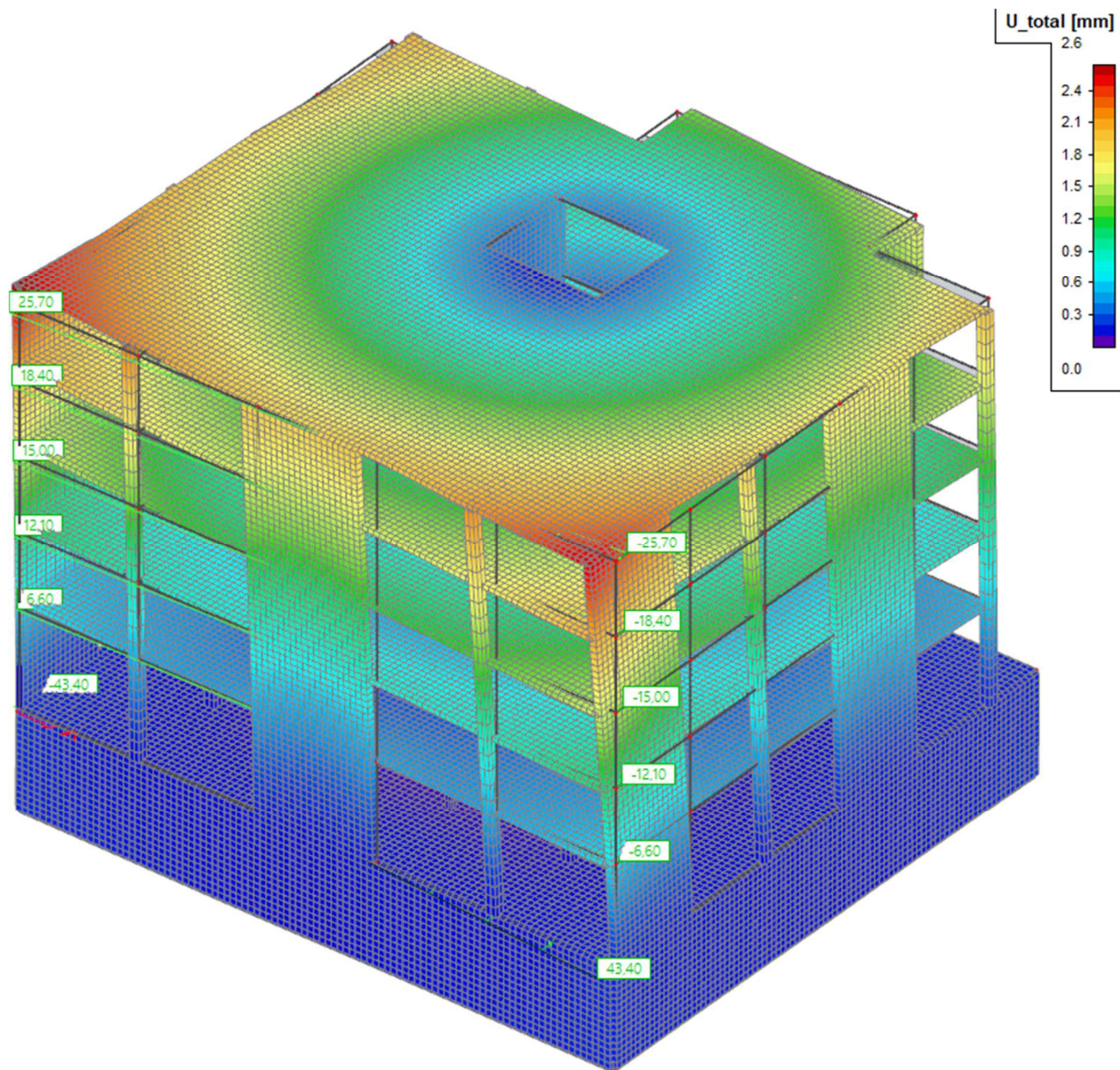


Slika 108. Posmične sile po etažama

Tablica 14. Poprečne sile i sile potresa

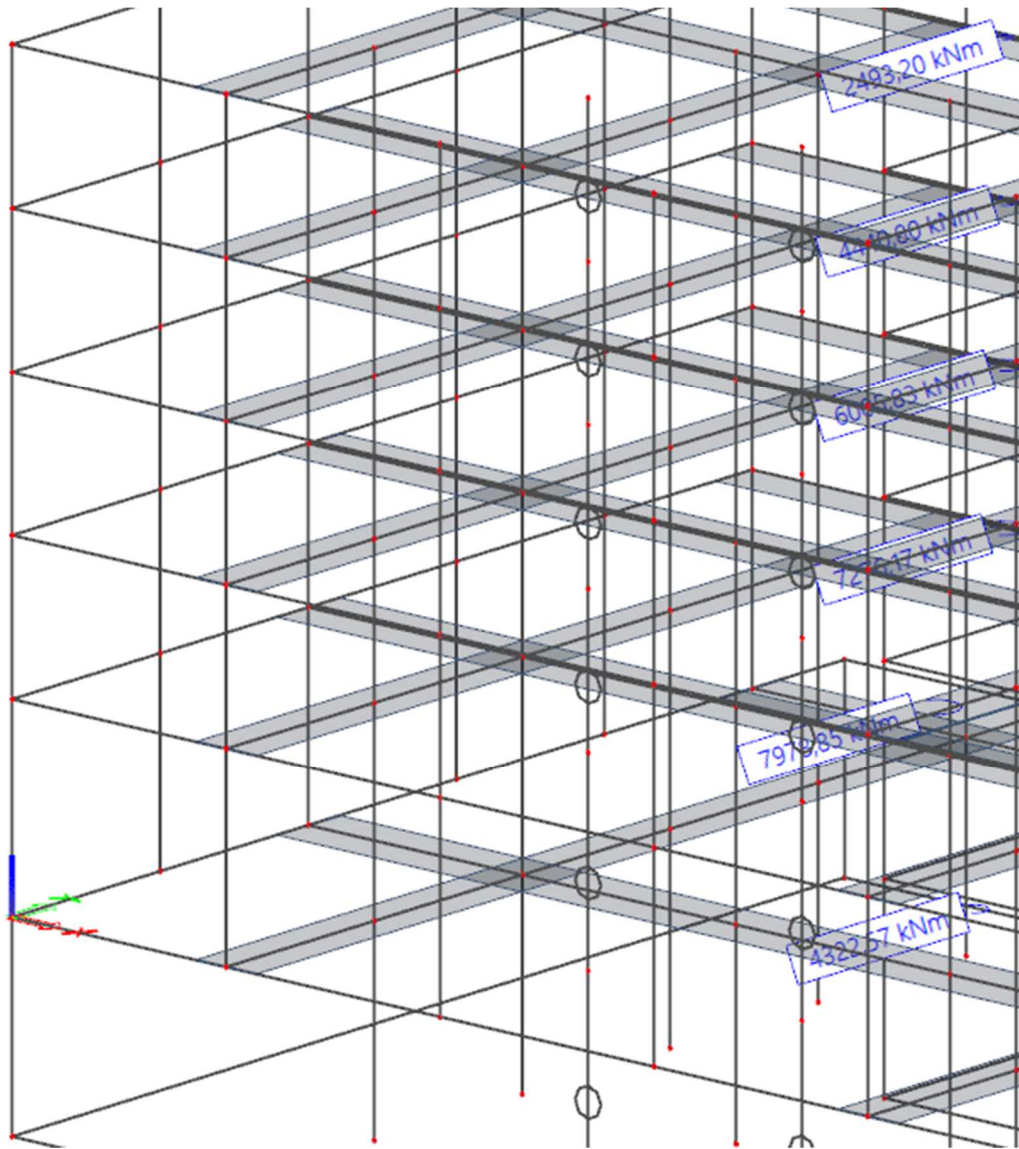
etaža	visina [m]	V [kN]	H [kN]	e [m]	M _T [kNm]	p [kN/m]	T [kNm]
6	16	2139,06	2139,06	1,25	2673,83	25,7	2673,83
5	13	3675,01	1535,95	1,25	1919,94	18,4	4593,76
4	10	4924,22	1249,21	1,25	1561,51	15,0	6155,28
3	7	5933,2	1008,98	1,25	1261,23	12,1	7416,5
2	4	6481,36	548,16	1,25	685,2	6,6	8101,7
1	0	2866,97	-3614,39	1,25	-4518	-43,4	3583,71
temelj	-4	2866,97	0	1,25	0	0,0	3583,71

Na slici 109 je prikazano je nanoseno opterećenje i deformacija konstrukcije pod opterećenjem. Sa slike 109 je vidljivo da ne dolazi do translacije zgrade, već samo do rotacije (u prizemlju je opterećenje nanoseno suprotno od opterećenja na ostalim etažama). Na slici 110 prikazani su torzijski momenti na pojedinoj etaži. Vidljiva je razlika u odnosu na posljednji stupac tablice 14, ali je ta razlika mala (ako se zanemari podrum za koji ne vrijedi odnos iz tablice, najveća razlika je na vrhu 7%) jer elementi 3d modela nisu upeti u razini prizemlja, a zgrada nije simetrična tlocrtno niti pravilna po visini. Vrijednosti iz tablice su ručno izračunate uz pretpostavku upetosti na razini prizemlja



Slika 109. Deformacija uslijed slučajne torzije

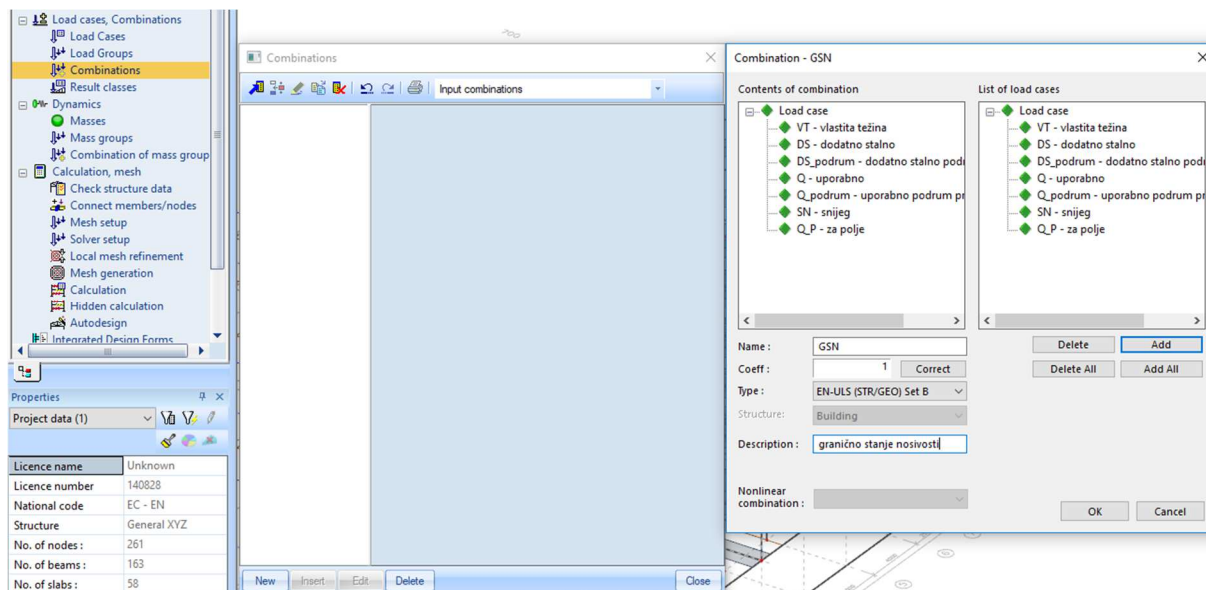
Na jednak način može se unijeti opterećenje uslijed ekscentriciteta u drugom smjeru konstrukcije. Ekscentriciteti se međusobno kombiniraju, a moguća su četiri položaja mase. Učinci (momenti) zbog ekscentriciteta u x i y smjeru tako se mogu zbrajati ili oduzimati. U proračunu će se razmatrati samo slučaj koji daje najveće momente. U slučaju automatskog kombiniranja postavljaju se u grupu opterećenja tipa „together“.



Slika 110. Momenti torzije od zamjenskog opterećenja

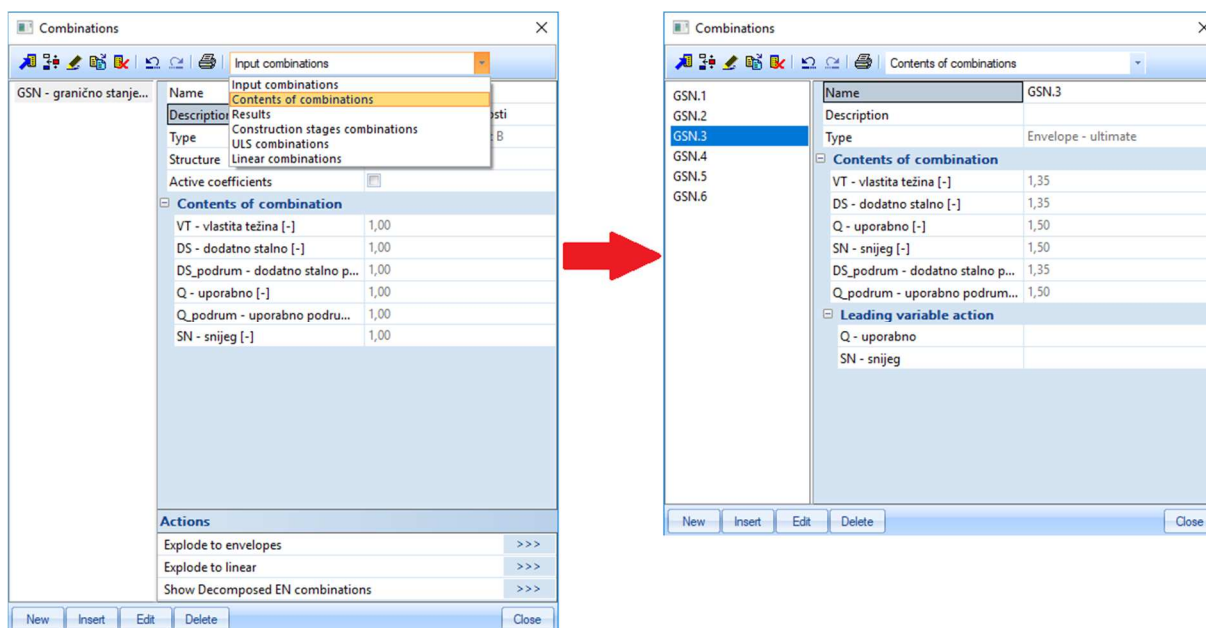
2.7 Kombinacije opterećenja

Sljedeći korak je određivanje kombinacije opterećenja opcijom „combinations“ u izborniku „load cases, combinations“. Potrebno je ukloniti automatski generirane kombinacije koje se sastoje samo od potresa i slučajnog ekscentriciteta. Pritiskom na opciju „new“ otvara se izbornik kao što je prikazano na slici 111 gdje je prikazano zadavanje opterećenja za standardnu GSN kombinaciju.

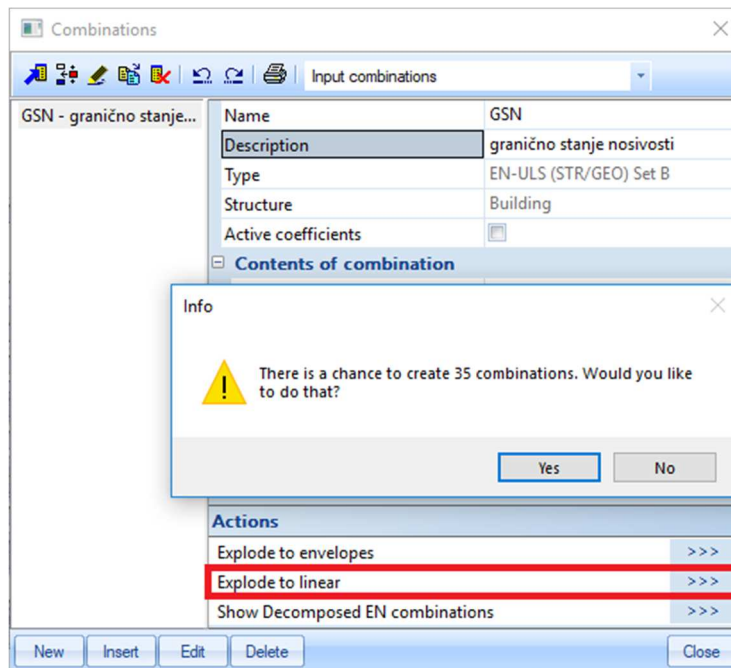


Slika 111. Zadavanje kombinacije za GSN

Postupak je ekvivalentan ranije opisanom postupku zadavanja kombinacija masa. Opcijom „type“ odabire se vrsta kombinacije, a „EN-ULS (STR/GEO) Set B“ je standardna GSN kombinacija prema normi, a pritiskom na opciju „add all“ dodaju se sva opterećenja (koja su bitna za tu kombinaciju) u kombinaciju. Nakon toga treba ukloniti kombinaciju za proračun polja ploče jer bi se tako dvostruko razmatralo uporabno opterećenje. Vidljivo je da s desne strane nema opterećenja od potresa jer se ona ne razmatraju u odabranom tipu kombinacije. Pritiskom na opciju „ok“ zatvara se izbornik i vraća u prethodni. Kako bi se provjerile sve podkombinacije može se prikazati sadržaj kombinacije opcijom „contents of combinations“ kao što je vidljivo na slici 112.

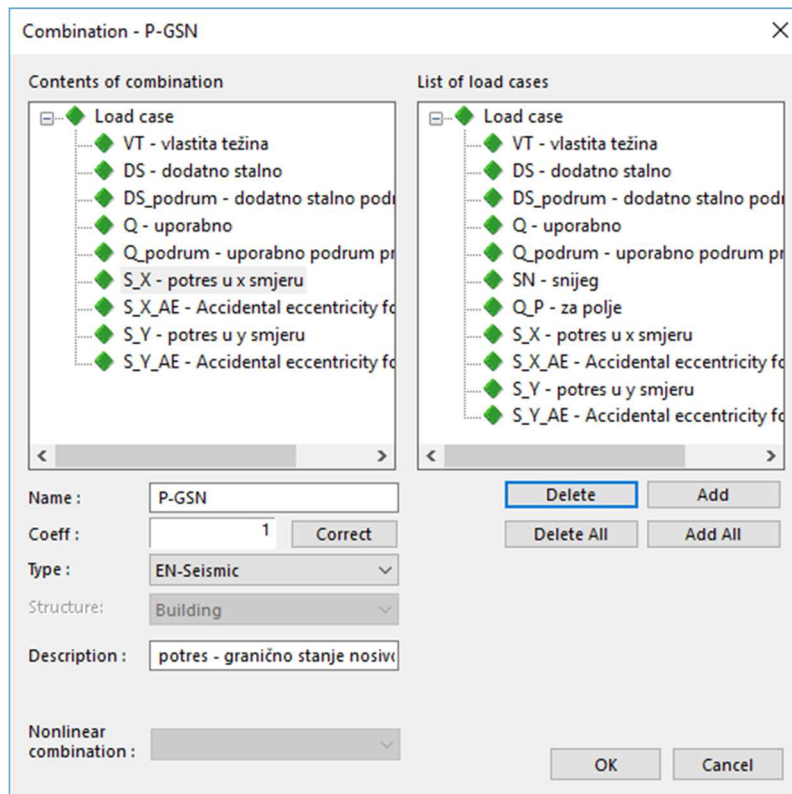


Slika 112. Podkombinacije



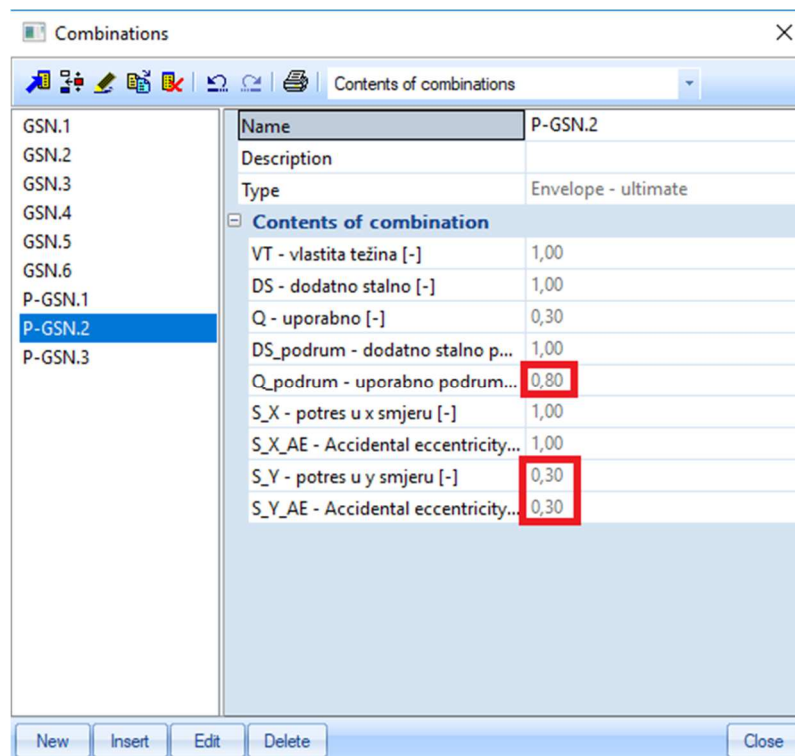
Slika 113. Rastavljanje kombinacije na linearne

Vidljivo je da iako su na slici 111 svi slučajevi opterećenja razmotreni s koeficijentom 1,0 u konačnici zbog tipa kombinacije se kombiniraju ispravno. Opcijom „contents of combinations“ ne vide se sve moguće kombinacije. Sve kombinacije prikazuju se tek ako se pritisne opcije „explode to linear“ kao što je vidljivo na slici 113. Prilikom pritiska te opcije javlja se upozorenje da nakon toga više nije moguće vratiti te kombinacije u anvelopu koja služi za proračun prema GSN (npr. u programu iz BiZK 1 na gredi se konstruira anvelopa koja predstavlja GSN kombinaciju, a svaki od slučajeva koji je bio razmatran za formiranje anvelope je linearna kombinacija). Takvim postupkom je moguće pregledati sadržaj svih kombinacija nakon čega se pritiskom opcije „undo“ može poništiti „eksplozija“ i vratiti u GSN kombinaciju. Nakon formiranja kombinacije za GSN formiraju se ostale kombinacije (zanemaruje se bočno djelovanje tla i vode radi smanjenja broja kombinacija i slučajeva opterećenja, podrumski zidovi se ne dimenzioniraju u primjeru jer je postupak identičan kao u primjeru iz BiZK2. Podrumski elementi ne trebaju se dimenzionirati ni detaljirati u skladu s [2], nego samo u skladu s [1]). Na slici 114 prikazana je potresna kombinacija za GSN. Bitno je napomenuti da se snijeg ne unosi u potresnu kombinaciju, kao i kombinacija za proračun polja. Također, kako su sva opterećenja osim potresa vezana za nazovistalnu vrijednost, uporabno opterećenje u podrumu ima drugi koeficijent kombinacije pa taj slučaj opterećenja (Q_{podrum}) treba imati zasebnu grupu u kojoj je kategorija odabrana za spremišta (na slici 54 „load type“ treba biti E).



Slika 114. Potresna kombinacija za GSN

Na slici 115 prikazana je jedna podkombinacija potresne kombinacije. Vidljivo je da se potres u jednom smjeru razmatra punom, a u drugom smjeru s 30% vrijednosti.



Slika 115. Potresna podkombinacija za GSN

3 Literatura

- [1] HRN EN 1992-1-1:2013, Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija - Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade
- [2] HRN EN 1998-1:2013, Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade
- [3] HRN EN 1991-1-3:2012/NA, Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije – Dio 1-3: Opća djelovanja – Djelovanja snijega – Nacionalni dodatak
- [4] HRN EN 1998-1:2011/NA, Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade – Nacionalni dodatak
- [5] HRN EN 1991-1-1:2011, Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije – Dio 1-1: Opća djelovanja – Obujamske težine, vlastite težine i uporabna opterećenja zgrada
- [6] Sorić, Z., Kišiček, T.: Betonske konstrukcije 1, Udžbenik Sveučilišta u Zagrebu, 405 str. Zagreb, 2014.
- [7] HRN EN 1991-1-1:2012/NA, Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije – Dio 1-1: Opća djelovanja – Obujamske težine, vlastite težine i uporabna opterećenja zgrada – Nacionalni dodatak
- [8] Rombach, G.A.: Finite-element Design of Concrete Structures, second edition, ICE Publishing, 360 str. London 2011
- [9] Sorić, Z., Kišiček, T.: Betonske Konstrukcije 2, Udžbenik Sveučilišta u Zagrebu, 361 str. Zagreb, 2018.
- [10] Minnert, J.: Stahlbeton-Projekt, Beuth Verlag GmbH, 288 str. Berlin 2015.
- [11] Fardis, M.N.: From Force- to Displacement-Based Seismic Design of Concrete Structures and Beyond, *Recent Advances in Earthquake Engineering in Europe*, (2018.), str. 101–122.
- [12] Karlsson, I., Elfgren, L.: Torsional stiffness of reinforced concrete members subjected to pure torsion, *Magazine of Concrete Research*, 24 (1972.) 80, str. 149–156.
- [13] Penelis, G.G., Penelis, G.G.: Concrete Buildings in Seismic Regions, Taylor & Francis, 826 str. Boca Raton 2014.
- [14] HRN EN 1997-1:2011, Eurokod 7: Geotehničko projektiranje – 1. dio: Opća pravila
- [15] Bowles, J.E.: Foundation analysis and design, New York: McGraw-Hill, 1968.
- [16] Gazetas, G.: Formulas and charts for impedances of surface and embedded foundations, *Journal of Geotechnical Engineering*, 117 (1991.) 9, str. 1363–1381.