Univerzitetna založba
Univerze v Mariboru

SAP2000

priročnik za začetno uporabo pri linearni statični analizi ravninskih linijskih konstrukcij

Denis Imamović

Univerza v Mariboru

Fakulteta za gradbeništvo,
prometno inženirstvo in arhitekturo

SAP2000

priročnik za začetno uporabo pri
linearni statični analizi ravninskih linijskih konstrukcij

Avtor
Denis Imamović

Avgust 2023

Naslov / *Title*: **SAP2000**

Podnaslov / *Subtitle*: **Priročnik za začetno uporabo pri linearni statični analizi ravninskih linijskih konstrukcij**
Basic User's Guide for Linear Static Analysis of Planar Line Structures

Avtor / *Author*: Denis Imamović
(Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo)

Recenzija / *Review*: Matjaž Skrinar
(Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo)

Iztok Peruš
(Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo)

Anže Babić
(Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo)

Tehnična urednika / *Technical editors*: Denis Imamović
(Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo)

Jan Perša
(Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)

Grafične priloge / *Graphics material*: Imamović, 2023

Oblikovanje ovitka / *Cover designer*: Jan Perša
(Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)

Grafika na ovitku / *Cover graphic*: Abstract, avtor: Activedia, pixabay.com, CC0, 2023

Založnik / *Published by*: **Univerza v Mariboru**
Univerzitetna založba
Slomškov trg 15, 2000 Maribor, Slovenija
https://press.um.si, zalozba@um.si

Izdajatelj / *Issued by*: **Univerza v Mariboru**
Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija
https://fgpa.um.si, fgpa@um.si

Izdaja / *Edition*: Prva izdaja

Izdano / *Published at*: Maribor, julij 2023

Vrsta publikacije / *Publication type*: E-knjiga

Dostopno na / *Available at*: https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/793

CIP - Kataložni zapis o publikaciji
Univerzitetna knjižnica Maribor

004.42:531.2(035)(0.034.2)

IMAMOVIĆ, Denis
SAP2000 [Elektronski vir] : priročnik za začetno uporabo pri linearni statični analizi ravninskih linijskih konstrukcij / Denis Imamović. - 1. izd. - E-publikacija. - Maribor : Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba, 2023

Način dostopa (URL): https://doi.org/10.18690/um.fgpa.1.2023
ISBN 978-961-286-759-1
doi: 10.18690/um.fgpa.1.2023
COBISS.SI-ID 158372867

© Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba
/ *University of Maribor, University Press*

Besedilo / *Text* © Imamović, 2023

To delo je objavljeno pod licenco Creative Commons Priznanje avtorstva 4.0 Mednarodna. / *This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License.*

Uporabnikom je dovoljeno tako nekomercialno kot tudi komercialno reproduciranje, distribuiranje, dajanje v najem, javna priobčitev in predelava avtorskega dela, pod pogojem, da navedejo avtorja izvirnega dela.

Vsa gradiva tretjih oseb v tej knjigi so objavljena pod licenco Creative Commons, razen če to ni navedeno drugače. Če želite ponovno uporabiti gradivo tretjih oseb, ki ni zajeto v licenci Creative Commons, boste morali pridobiti dovoljenje neposredno od imetnika avtorskih pravic.

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

ISBN 978-961-286-759-1 (pdf)

DOI https://doi.org/10.18690/um.fgpa.1.2023

Cena / *Price*: Brezplačni izvod

Odgovorna oseba založnika / *For publisher*: prof. dr. Zdravko Kačič, rektor Univerze v Mariboru

Citiranje / *Attribution*: Imamović, D. (2023). *SAP2000: Priročnik za začetno uporabo pri linearni statični analizi ravninskih linijskih konstrukcij.* Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba. doi: 10.18690/um.fgpa.1.2023

Kazalo

Predgovor **1**

I Kratka predstavitev programa **3**

I.1 Oblike pomoči uporabnikom 3

I.2 Uporaba tega priročnika pri analizi s programom SAP2000 5

II Zgledi uporabe **7**

Primer 1 – ravninska linijska konstrukcija **9**

1.1 Podatki o analizirani konstrukciji in računski model 9

1.2 Podajanje podatkov v programu SAP2000 9

1.3 Analiza podanih podatkov 38

1.4 Poprocesiranje 42

1.5 Spreminjanje števila področij za izpis vrednosti po končnih elementih 55

1.6 Izpis reducirane togostne matrike konstrukcije 57

1.7 Spreminjanje podatkov na konstrukciji 59

Primer 2 – ravninska okvirna konstrukcija **62**

2.1 Podatki o analizirani konstrukciji 62

2.2 Podajanje podatkov v programu SAP2000 63

2.3 Analiza podanih podatkov 83

2.4 Poprocesiranje 85

2.5 Izpis reducirane togostne matrike konstrukcije 91

2.6 Analiza spremenjene konstrukcije 92

2.7 Zajem slike v programu SAP2000 95

Primer 3 – ravninsko paličje **98**

3.1 Podatki o analizirani konstrukciji 98

3.2 Podajanje podatkov v programu SAP2000 99

3.3 Analiza podanih podatkov 117

3.4 Poprocesiranje 120

3.5 Izpis reducirane togostne matrike konstrukcije 134

Predgovor

Delo z naslovom »*SAP2000: priročnik za začetno uporabo pri linearni statični analizi ravninskih linijskih konstrukcij*« je namenjeno vsem študentom Fakultete za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo Univerze v Mariboru kot študijsko gradivo za pripravo na izpit pri različnih predmetih, ki obravnavajo analizo gradbenih konstrukcij.

Izkušnje sicer kažejo, da je v začetni fazi, ko študenti še ne obvladajo osnovnih veščin mehanike, primernejša uporaba enostavnejših orodij (npr. program AlfaCad, ki omogoča samo linearno statično analizo ravninskih konstrukcij), saj je v naprednejših in zahtevnejših komercialnih programih zelo veliko dodatnih možnosti in parametrov, ki lahko samo zmedejo neizkušenega uporabnika. Vseeno so se študentje (v višjih letnikih študija pri projektiranju zahtevnejših konstrukcij) slej kot prej primorani seznaniti z zahtevnejšimi programi, ki omogočajo tudi zahtevnejše nelinearne analize prostorskih konstrukcij, med katere uvrščamo tudi program SAP2000, ki v svetovnem merilu uživa veliko spoštovanje in s svojimi posodobljenimi različicami postavlja nova merila podobnim programom. Za takšne analize je potreben dosti bolj izkušen uporabnik, ki je sposoben ne samo korektno podati podatke, temveč tudi na osnovi inženirske presoje in izkušenj presoditi o smiselnosti dobljenih rezultatov.

Osnovno vodilo pri pripravi tega priročnika je bila predstavitev možnosti uporabe programa SAP2000 z vključenimi enostavnimi primeri ravninskih linijskih konstrukcij v okviru linearne statične analize. S pričujočim delom je zdaj tudi za manj izkušene uporabnike z osnovnim znanjem mehanike prva uporaba tega programa bistveno enostavnejša, predvsem za kontrolo samostojno izračunanih nalog. Hkrati pa je tako tudi omogočen enostavnejši prehod k analizi zahtevnejših problemov.

Želim si, da bi delo našlo pot do vseh študentov, ki jih zanima delo v tem programu.

Pričujoče delo so izredno skrbno pregledali izr. prof. dr. Matjaž Skrinar, izr. prof. dr. Iztok Peruš in dr. Anže Babič iz Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, za kar sem izredno hvaležen in se jim iskreno zahvaljujem.

I Kratka predstavitev programa

SAP2000 je izredno zmogljiv komercialni program, ki ga je razvilo podjetje Computers & Structures, inc. Namenjen je za projektiranje najrazličnejših tipov konstrukcij, torej različnih vrst zgradb, stadionov, stolpov, industrijskih obratov, objektov na morju, cevovodov, jezov, strojnih komponent in še mnogih drugih konstrukcijskih objektov. Vizualizacija matematičnega modela problema omogoča uporabniku enostavno in hitro delo v programu ter s tem preračune najzahtevnejših konstrukcij na relativno enostaven inženirski način. Kot v ostalih podobnih programih za mehansko analizo tudi v tem programu s pomočjo širokega izbora različnih tipov integriranih končnih elementov ustvarjamo računske modele, ki predstavljajo fizikalno realnost konstrukcije. Generiran model konstrukcije lahko nato uporabimo za širok nabor najrazličnejših analiz, kot so:

- statična analiza za linearno in nelinearno obnašanje;
- dinamična časovna analiza odziva za linearno in nelinearno obnašanje;
- modalna analiza;
- analiza s spektri odziva;
- uklonska analiza;
- P-delta analiza;
- potisna »pushover« analiza.

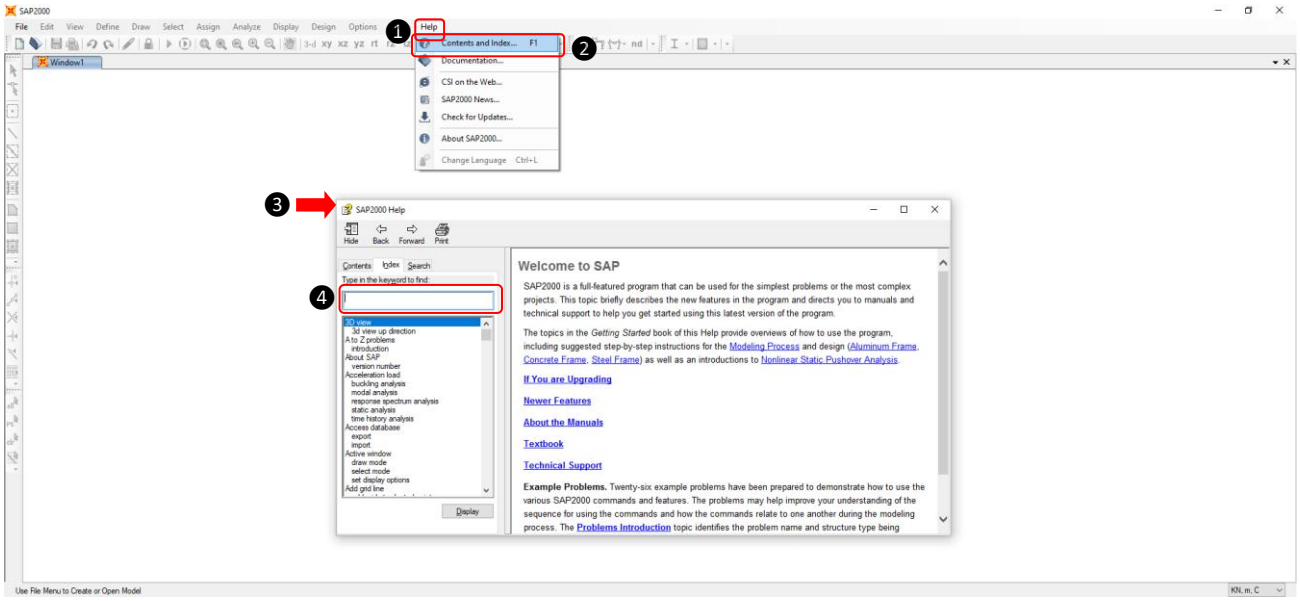
Po opravljenih analizah program omogoča projektiranje po mnogih standardih, tudi po Evrokodu. Možna sta (tudi) optimizacija in izpis uporabniku prilagojenih izhodnih poročil, kar izredno poenostavi ves proces projektiranja. Prav zaradi vsega naštetega je program SAP2000 še posebej uporaben za projektante v praksi, ki dobro obvladajo osnove mehanike in osnovne principe računanja konstrukcij.

Program SAP2000 se nenehno postopoma razvija in v tem delu je bila predstavljena različica 18. Kljub temu pa je priročnik vseeno primeren tako za nekoliko starejše kot tudi za novejše različice programa, saj za linearno statično analizo pri uporabi programa ni bistvenih sprememb.

I.1 Oblike pomoči uporabnikom

Razumevanje teoretičnih konceptov in principov gradbene mehanike je za modeliranje konstrukcij bistvenega pomena pri uporabi vsakega programa, vključno s programom SAP2000. Program sicer že ponuja zelo široko paleto pomoči, vključno s teoretičnimi koncepti, in jih zato v tem delu ni bilo treba posebej podrobneje predstavljati. Vsa pomoč je v glavnem meniju programa, pod zadnjo možnostjo *Help* (Slika I.1 – ❶). Ob kliku na *Help* se odpre viseči meni z različnimi oblikami pomoči, ki so na kratko predstavljene v nadaljevanju.

S ponovnim klikom na *Contents and Index ...* (Slika I.1 – ❷) se v prvi vrstici odpre dodatno okno *SAP2000 Help* (Slika I.1 – ❸), v katerem lahko iščemo pomoč tako po vsebini kot po izbranih ključnih besedah, ki jih vpisujemo v prazen okvir (Slika I.1 – ❹).



Slika I.1: Oblike pomoči v programu

S klikom na *Documentation* (Slika I.2 – ❶) se odpre okno *SAP2000 Documentation* (Slika I.2 – ❷), kjer se nahaja pomoč v obliki dokumentov, ki so razvrščeni po vsebinah. Dokumenti v obliki priročnikov so zbrani v mapi *Manuals*. S klikom na znak + poleg *Manuals* (Slika I.2 – ❸) se prikažejo vsi dokumenti, ki so zbrani v tej mapi.

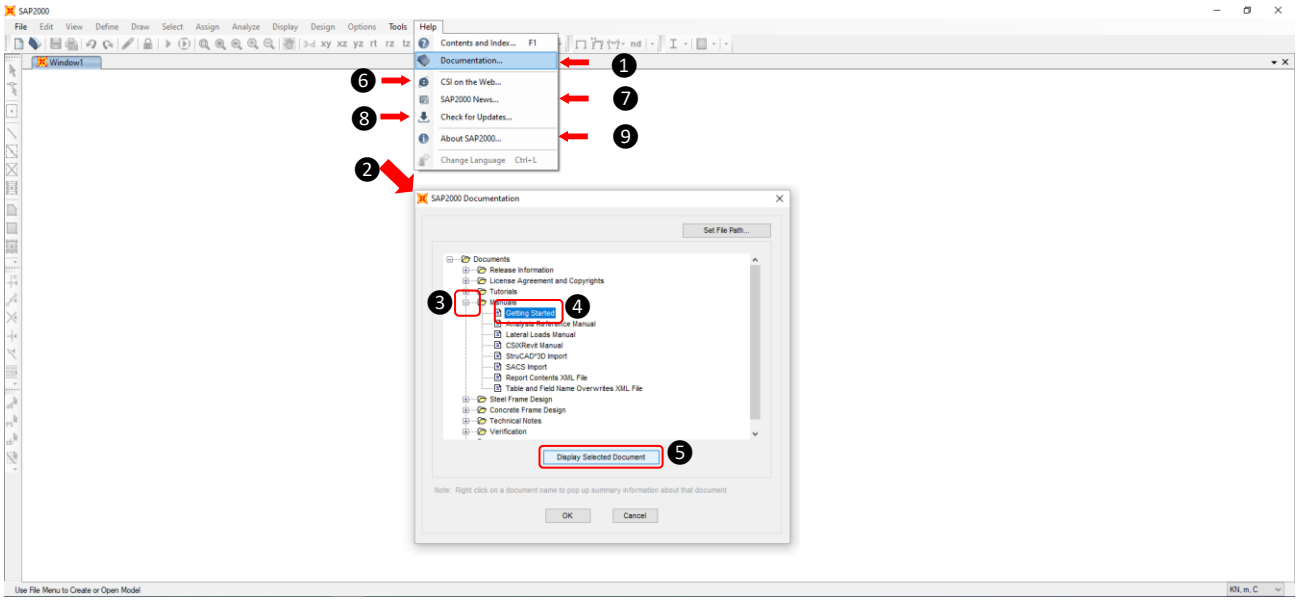
Za hitrejše rokovanje ob prvem srečanju s programom je priporočljivo poznati osnovne ukaze programa, ki so zelo podrobno predstavljeni v priročniku *Getting Started* (Slika I.2 – ❹). Po želji ga lahko (kot tudi vse ostale dokumente v obliki PDF) odpremo z dvakratnim klikom na levi gumb miške, pri čemer izberemo možnost *Getting Started*. Druga možnost je, da kliknemo na ikono *Display Selected Document* (Slika I.2 – ❺).

S klikom na *CSI on the Web* ... (Slika I.2 – ❻) lahko neposredno dostopamo do spletne strani podjetja Computers & Structures, inc., ki je razvilo program.

S klikom na *SAP2000 News* ... (Slika I.2 – ❼) lahko nadalje neposredno dostopamo do spletne strani, kjer so predstavljene vse novosti za najnovejše različice programa SAP2000.

S klikom na *Check for Updates* ... (Slika I.2 – ❽) je možno preveriti razpoložljivost novejših različic programa.

S klikom na *Abaut SAP2000* ... (Slika I.2 – ❾) dobimo osnovne informacije (npr. o obstoječi različici) programa.



Slika I.2: Oblike pomoči v programu

I.2 Uporaba priročnika pri analizi s programom SAP2000

Pri pripravi tega priročnika je bilo osnovno vodilo, da uporabnik skozi enostavne primere sledi korakom reševanja in postopoma spozna delovanje in uporabo programa. Priročnik samo dopolnjuje in nikakor ne nadomešča že obstoječih oblik pomoči, ki so vsekakor koristne in priporočljive za še podrobnejše razumevanje delovanja programa. Dodatna prednost tega priročnika je, da je napisan v slovenskem jeziku.

Priročnik obravnava tri obsežno dokumentirane zglede različnih tipov enostavnih ravninskih konstrukcij (nosilec, okvir in paličje). Ti zgledi so namenjeni predvsem podrobnejšemu spoznavanju uporabe ukazov programa pri linearni statični analizi, zato v nekaterih delih ne prikazujejo optimalnega poteka reševanja.

Primeri so povzeti iz priročnika *AlfaCAD: Priročnik za osnovno rabo* avtorja Matjaža Skrinarja. Izvedba korakov reševanja na enakih primerih uporabniku omogoča odlično primerjavo izvedbe analize med relativno enostavnim programom AlfaCAD, ki omogoča le linearno statično analizo ravninskih konstrukcij, in bistveno zmogljivejšim ter posledično zahtevnejšim programom SAP2000.

II Zgledi uporabe

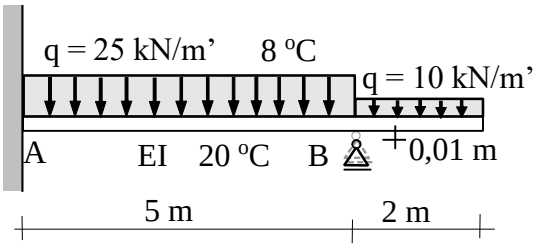
Primer 1 — ravninska linijska konstrukcija……9
Primer 2– ravninska okvirna konstrukcija…….....……..…..62
Primer 3 – ravninsko paličje…….....98

Primer 1 – ravninska linijska konstrukcija

1.1 Podatki o analizirani konstrukciji in računski model

Za dani nosilec (Slika 1.1) določi reakcije, notranje statične količine in pomike vzdolž konstrukcije. Dimenziji pravokotnega prereza sta b/h = 0,2 m/0,4 m, modul elastičnosti pa znaša E = 30,5 GPa.

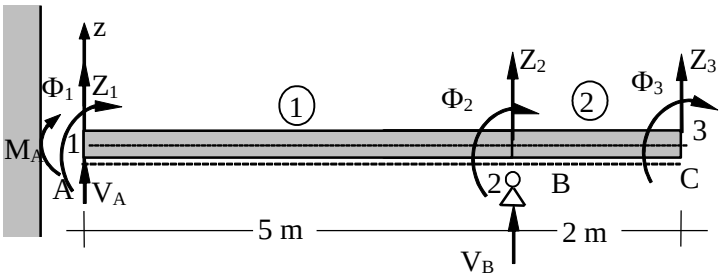
Konstrukcija je obremenjena z enakomernima zveznima obtežbama (prikazanima na sliki 1.1), posedkom desne podpore za 1 cm navzdol in temperaturno obtežbo po celi dolžini konstrukcije, kjer znaša prirastek temperature spodaj 20 °C, prirastek temperature zgoraj pa 8 °C ($\alpha = 1 \cdot 10^{-5}/^{o}K$).



Slika 1.1: Predstavitev primera 1

Analizo izvedi tudi za dodatno obtežno kombinacijo, ko se posedek desne podpore navzdol poveča na 2 cm, desna podpora pa je horizontalno nepomična.

Uporabili bomo minimalni računski model z dvema standardnima končnima elementoma s togima priključkoma (VV) v ravnini *X–Z* (Slika 1.2).



Slika 1.2: Označitev vozlišč, elementov, prostostnih stopenj in reakcij konstrukcije

1.2 Podajanje podatkov v programu SAP2000

Najprej zaženemo program SAP2000 s klikom na ikono . Ob vsakem zagonu programa se pojavi prazno okno in za modeliranje novega projekta v meniju izberemo možnost *File* in nato možnost *New model* ali pa (najhitreje) kar kombinacijo tipk (*Ctrl + N*). Alternativno imamo na razpolago tudi orodno vrstico za hitri dostop, kjer lahko s klikom na levo tipko miške, kjer nato izberemo ikono praznega lista (Slika 1.3 – ❶), prav tako zaženemo nov projekt.

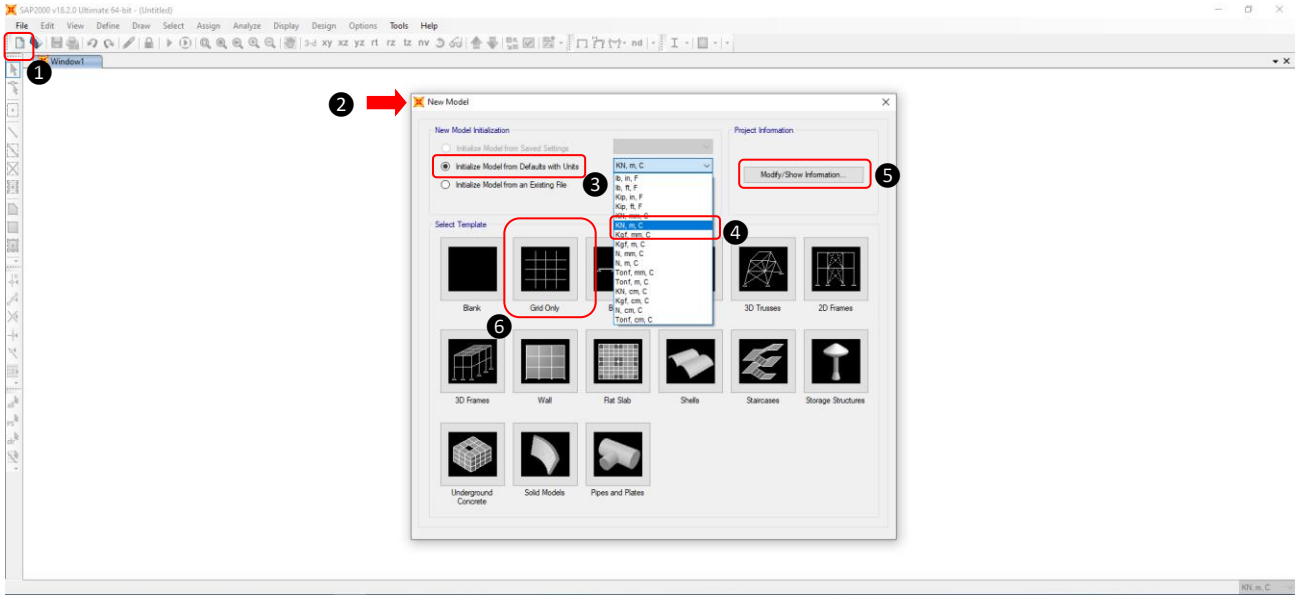
Pojavi se novo okno *New Model* (Slika 1.3 – ❷).

V razdelku *New Model Initialization* izberemo *Initialize Model from Defaults with Units* (Slika 1.3 – ❸), kar pomeni, da bomo začetne enote (v programu analiziranega) projekta izbrali iz privzetega seznama enot, ki so na voljo v visečem meniju, v katerem je več možnih kombinacij enot in velikostnih redov enot (sila, dolžina in temperatura) različnih standardov. Odločimo se na primer

za enote kN, m in C (Slika 1.3 – ❹), saj ustrezajo mednarodnemu standardu enot (SI), ki ga uporabljamo tudi v Sloveniji, in velikostnemu redu projekta. Če nam izbrane enote kasneje ne bi ustrezale, jih lahko kadarkoli še vedno zamenjamo.

V razdelku *Project Information* z ikono *Modify/Show Information* uporabnik lahko navede morebitne splošne informacije o projektu (Slika 1.3 – ❺).

V razdelku *Select Template* so na izbiro predlogi za analizo že pripravljenih različnih tipov konstrukcij. Za naš primer smo s klikom na ikono izbrali prazen dokument z mrežnimi črtami, ker omogoča hitrejši izris končnih elementov (Slika 1.3 – ❻).



Slika 1.3: Nastavitev enot in izbira podloge

Odpre se okno *Quick Grid Lines* (Slika 1.4 – ❶).

Za nastavitev mrežnih črt se odločimo za kartezični koordinati sistem (Slika 1.4 – ❷), ki je že predefinirano aktiven. Poleg kartezičnega koordinatnega sistema je sicer na izbiro še cilindrični koordinatni sistem, ki za ta primer vsekakor ni primeren.

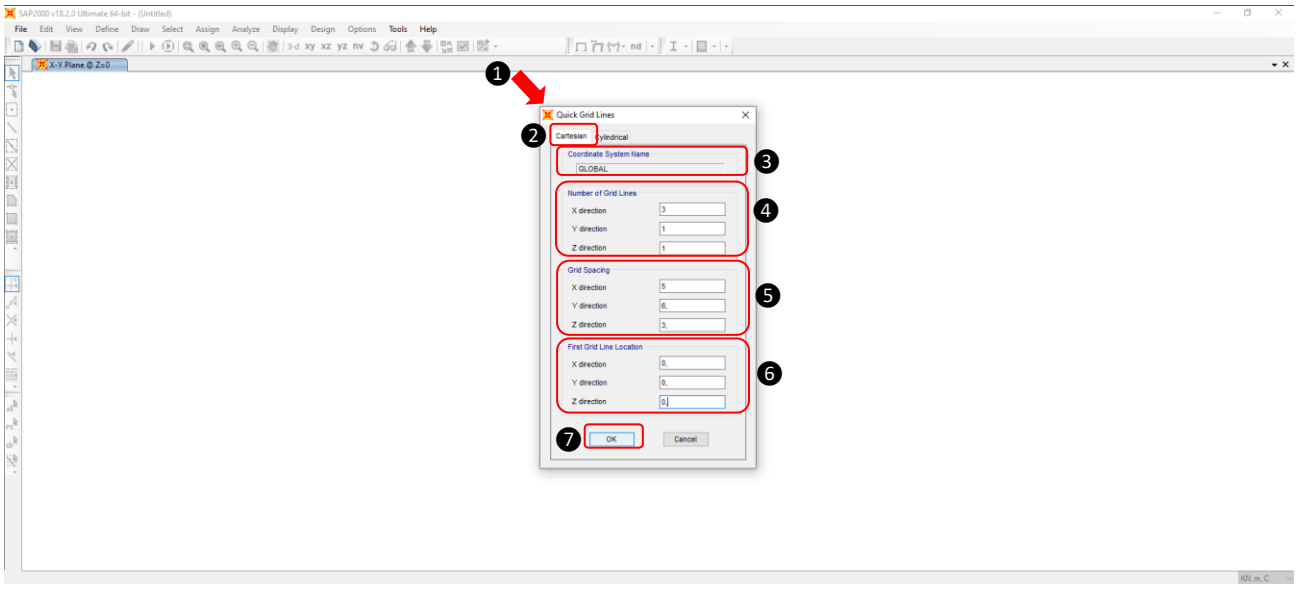
V razdelku *Coordinate System Name* je v sivem okencu predefinirano ime *GLOBAL* za izbrani globalni koordinatni sistem in ga ni mogoče preimenovati (Slika 1.4 – ❸).

V razdelku *Number of Grid Lines* podajamo število mrežnih črt v smereh *X* (*X direction*), *Y* (*Y direction*) in *Z* (*Z direction*). Za linijski nosilec izberemo, da bo os nosilca s tremi vozlišči (v točkah A, B in C) potekala v smeri koordinate *X*, kar je enako številu mrežnih črt v tej smeri. Za ostali dve koordinatni smeri izberemo po eno mrežno črto (Slika 1.4 – ❹).

V tretjem razdelku *Grid Spacing* lahko določimo enakomerno razdaljo med mrežnimi črtami za posamezne koordinatne smeri. Za razmik med mrežnimi črtami v smeri *X* je smiselno, da izberemo kar dolžino med vozliščem A in B, ki je 5 m. Enak razmik 5 m dobimo med vozliščem B in C (oziroma koncem konzole), ki ga bo treba kasneje popraviti na 2 m. Koordinatni smeri *Y* in *Z* lahko preskočimo, saj v teh dveh smereh nastopa samo ena mrežna črta in s spremembo razmika ne spremenimo ničesar (Slika 1.4 – ❺).

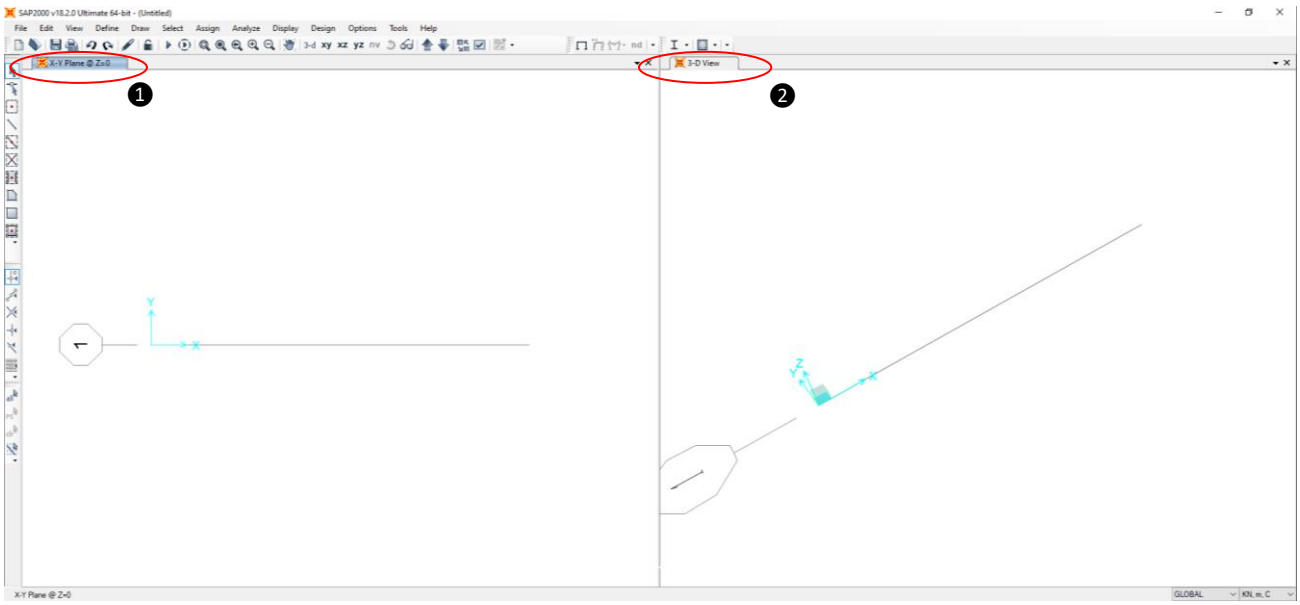
V zadnjem razdelku *First Grid Line Location* določimo oddaljenost mrežnih črt od koordinatnega izhodišča globalnega koordinatnega sistema. Za naš primer bomo pustili, da mrežne črte potekajo

iz koordinatnega izhodišča za vse tri smeri, torej *X*, *Y* in *Z* (Slika 1.4 – ❻). Na koncu še vse skupaj potrdimo s klikom na *OK* (Slika 1.4 – ❼).



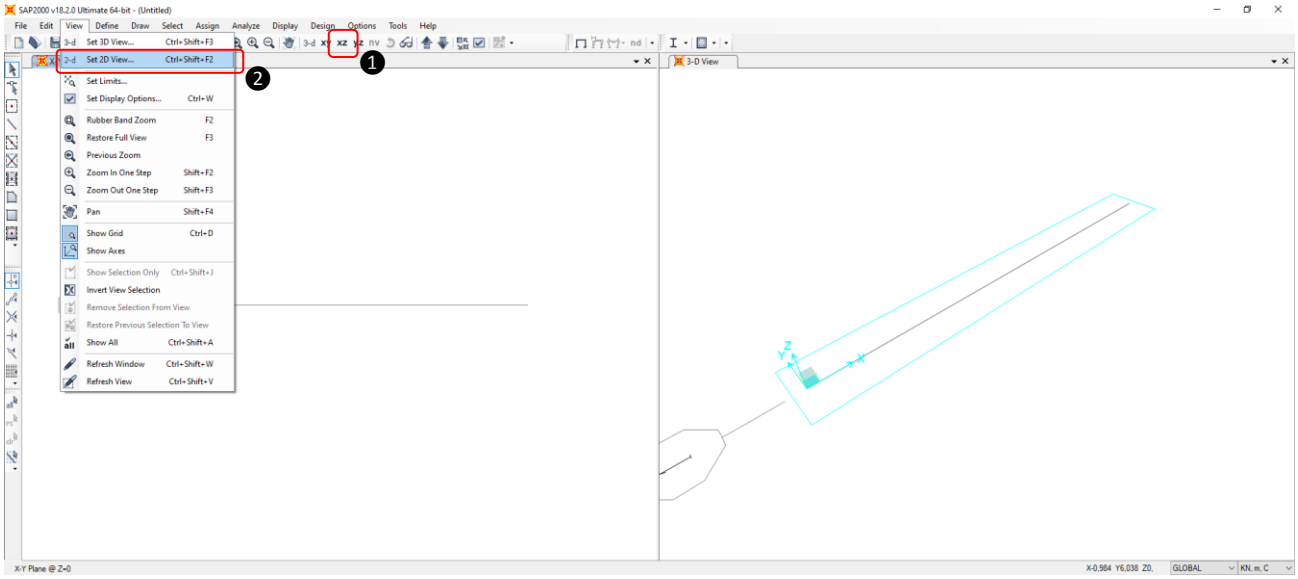
Slika 1.4: Nastavitev mrežnih črt

Nato se pojavita dve predefinirani prikazni okni z dvema različnima pogledoma, ki zasedata vsak polovico zaslona. V levem prikaznem oknu je pogled v tlorisni ravnini *X–Y* in je obarvano modro (Slika 1.5 – ❶). Modra barva naznanja, da je okno aktivno, kar pomeni, da se vsi nadaljnji izvršeni ukazi prikažejo v tem oknu. V desnem prikaznem oknu je 3D-pogled (Slika 1.5 – ❷). Če ga želimo aktivirati, enostavno z levim gumbom miške kliknemo kjerkoli na območju desnega okna.



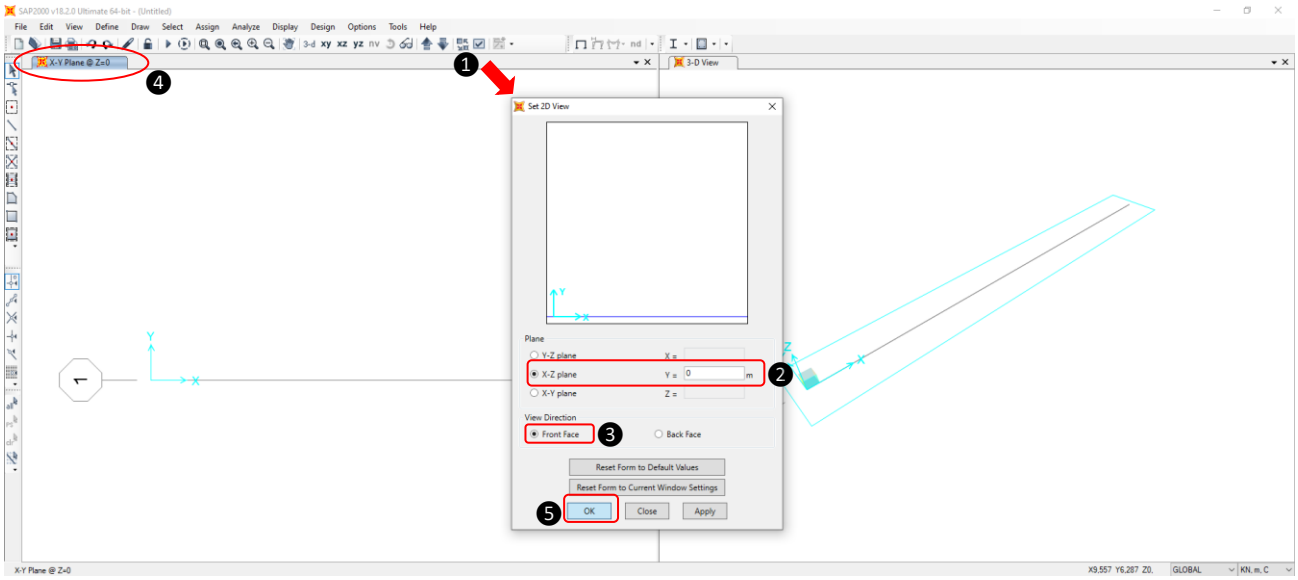
Slika 1.5: Pogled v ravnini *X–Z* in 3D-pogled

Za nosilec smo izbrali, da bo ležal v ravnini *X–Z*, zato je smiselno, da v levem oknu spremenimo pogled, ki je trenutno prikazan v ravnini *X–Y*. Za spremembo pogleda imamo na razpolago orodno vrstico, kjer lahko izberemo pogled s klikom na ikono XZ (Slika 1.6 – ❶). Druga možnost pa je, da v visečem meniju *View* izberemo možnost *Set 2D View ... (Ctr + Shift + F2)* (Slika 1.6 – ❷).



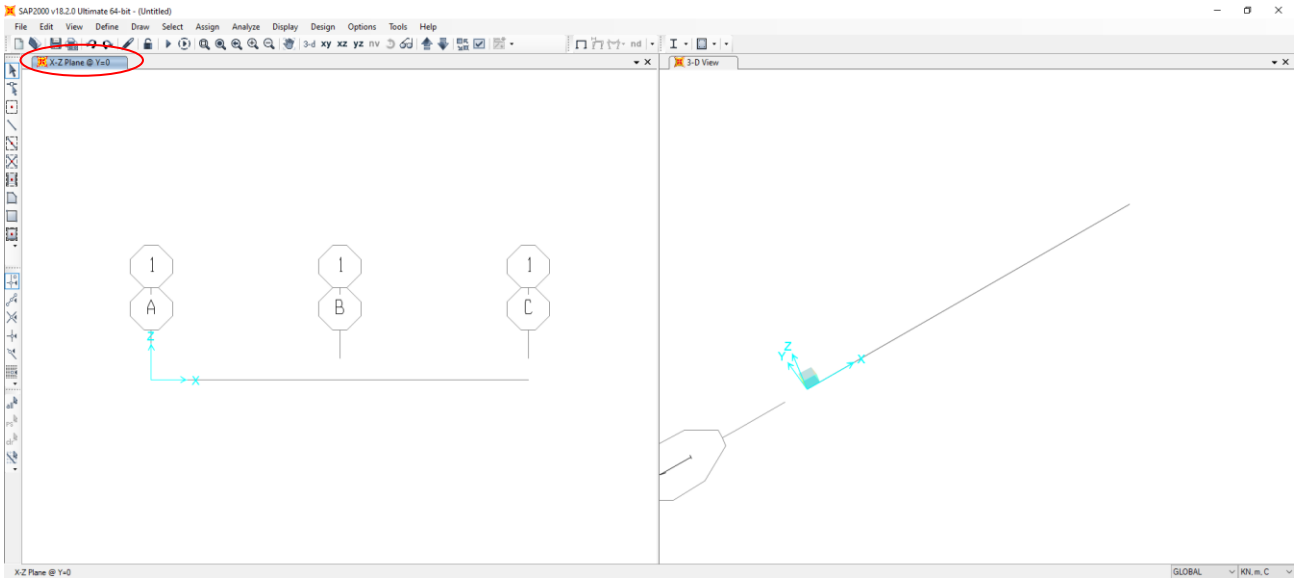
Slika 1.6: Izbira 2D-pogleda v visečem meniju

Odpre se okno *Set 2D View* (Slika 1.7 – ❶), kjer imamo v razdelku *Plane* na razpolago poglede v ravninah *Y–Z*, *X–Z* in *X–Y* ter njihove pravokotne oddaljenosti glede na koordinatno izhodišče. Izberemo pogled ravnine *X–Z* in oddaljenost *Y* = 0 m (Slika 1.7 – ❷).



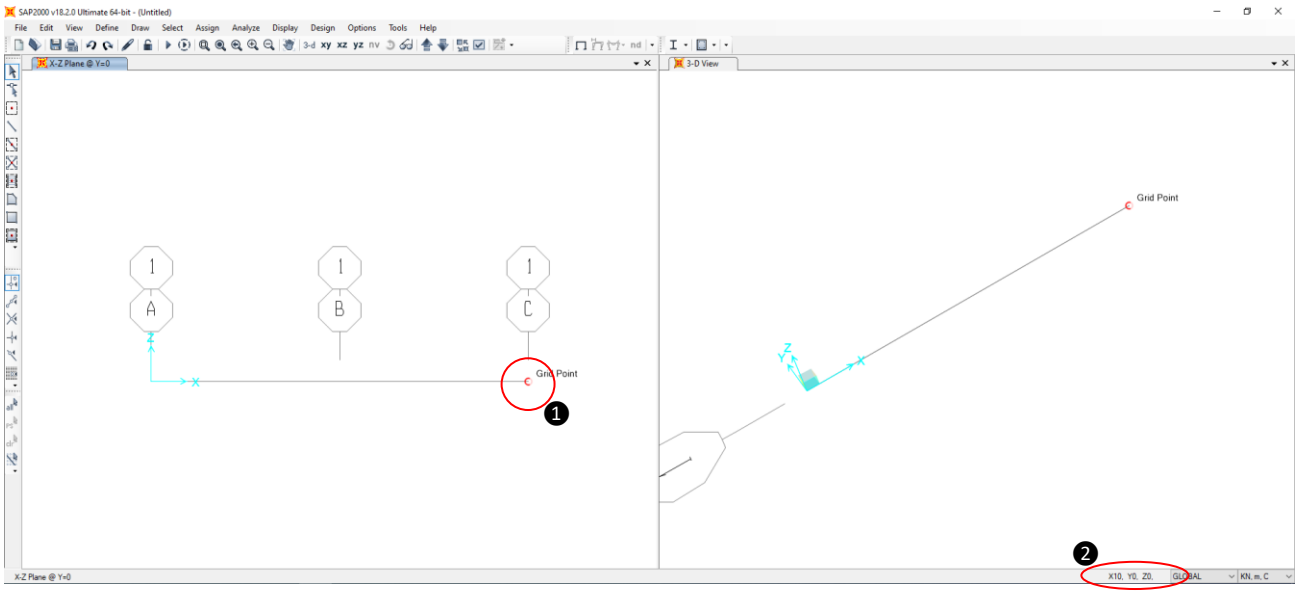
Slika 1.7: Nastavitve 2D-pogleda

V razdelku *View Direction* med dvema možnostma izberemo *Front Face*, ki predstavlja pogled s sprednje strani (Slika 1.7 – ❸). Druga možnost, to je *Back Face*, predstavlja pogled z zadnje strani. Prepričamo se, da je aktivno levo okno (Slika 1.7 – ❹), in potrdimo s klikom na *OK* (Slika 1.7 – ❺). V tistem oknu, ki je aktivno (torej v tem primeru levo), se pogled ravnine *X–Y* spremeni v pogled ravnine *X–Z* (Slika 1.8).



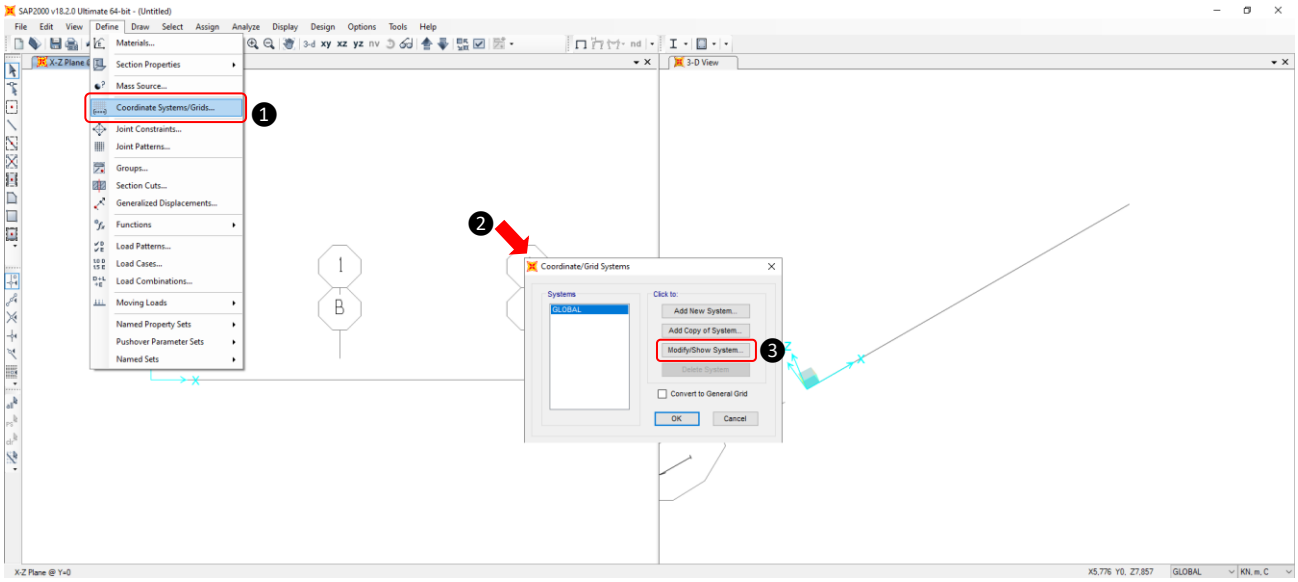
Slika 1.8: Pogled v ravnini *X*–*Z*

Če kazalec miške (kurzor) premaknemo na skrajni desni rob mrežne črte, v točko C (Slika 1.9 – ❶), lahko na desnem spodnjem robu okna opazimo, da je koordinata *X* te točke na lokaciji 10 m (Slika 1.9 – ❷), kar je posledica prej izbrane vrednosti za razdaljo med mrežnimi črtami v smeri *X*.



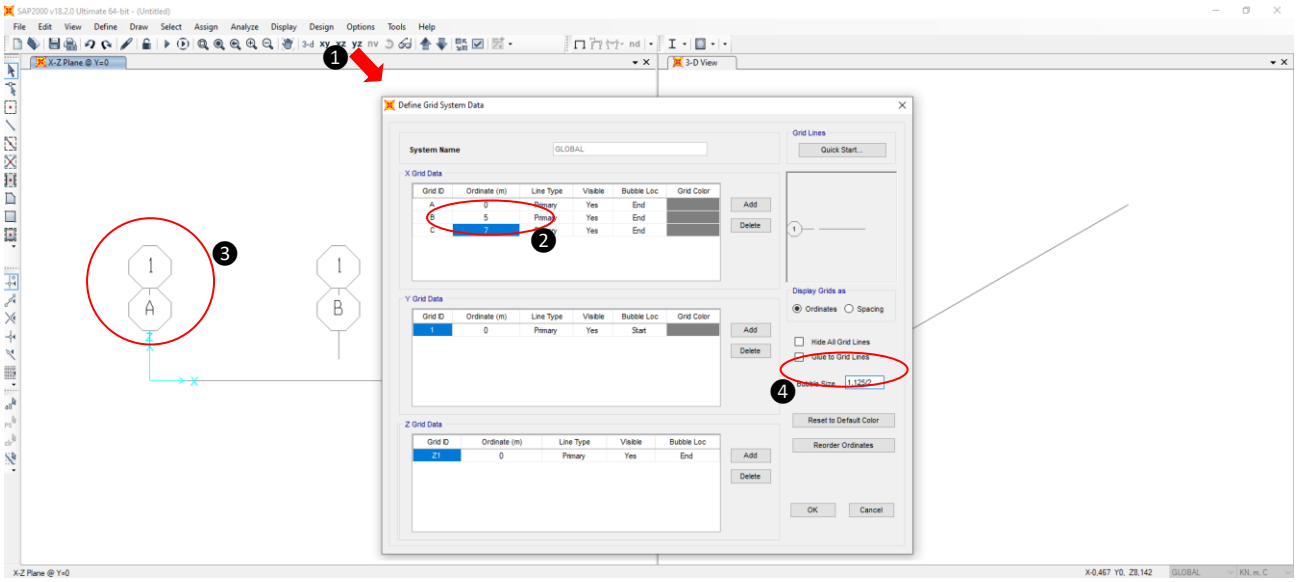
Slika 1.9: Koordinate točke C

Razmik med mrežnima črtama (med točkama B in C) popravimo iz 10 m na 7 m tako, da v glavnem meniju kliknemo na *Define* in nato v visečem meniju izberemo *Coordinate Systems/Grids* … (Slika 1.10 – ❶). Odpre se okno *Coordinate/Grid Systems* (Slika 1.10 – ❷), kjer imamo v razdelku *Systems* definiran edini koordinatni sistem pod imenom *GLOBAL*, katerega predefinirane nastavitve spremenimo tako, da v razdelku *Click to:* izberemo *Modify/Show System* … (Slika 1.10 – ❸).



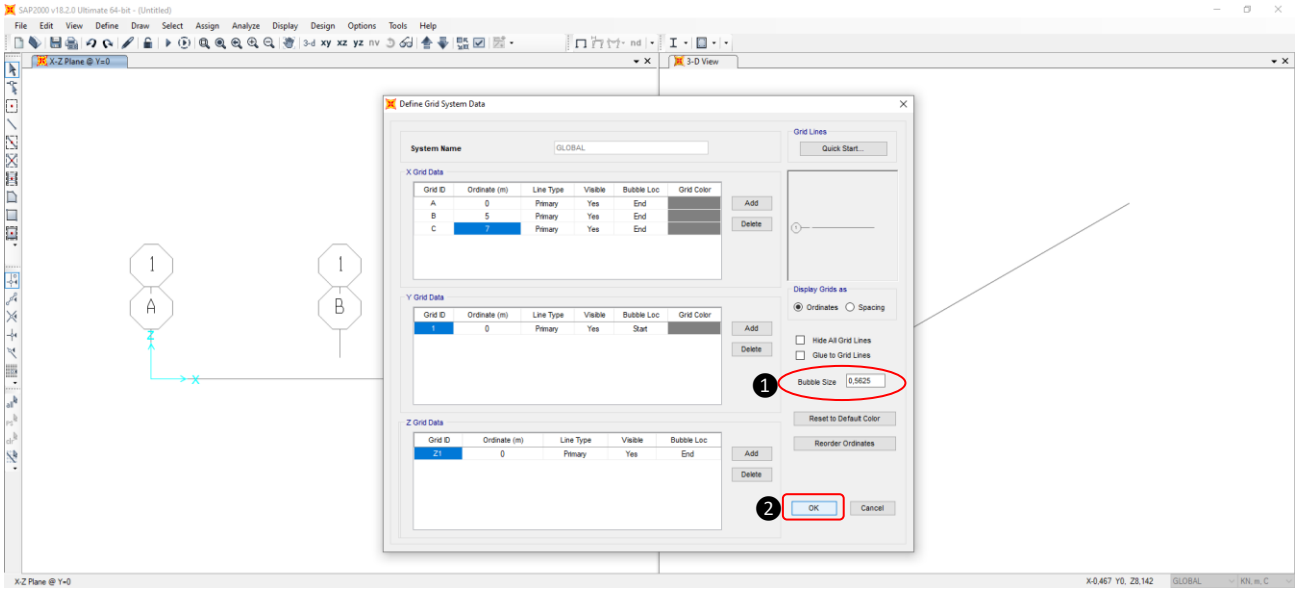
Slika 1.10: Izbira ukaza za nastavitev globalnega koordinatnega sistema

Odpre se novo okno *Define Grid System Data* (Slika 1.11 – ❶), kjer so v treh razdelkih, to je v *X Grid Data*, *Y Grid Data* in *Z Grid Data*, izpisane vse mrežne črte za smeri *X*, *Y* in *Z*. V razdelku *X Grid Data* popravimo koordinato točke C tako, da jo označimo in popravimo iz 10 m na 7 m ter na koncu potrdimo z `<Enter>` na tipkovnici (Slika 1.11 – ❷). Prav tako lahko po želji zmanjšamo (oziroma prilagodimo) velikost mehurčkov, vidnih v pogledu *X*–*Z* (Slika 1.11 – ❸). Če jih torej želimo zmanjšati, na primer za polovico, potem v polje poleg *Bubble Size* s predefinirano vrednostjo 1,125 vpišemo »/2« (Slika 1.11 – ❹) in potrdimo z `<Enter>` na tipkovnici.



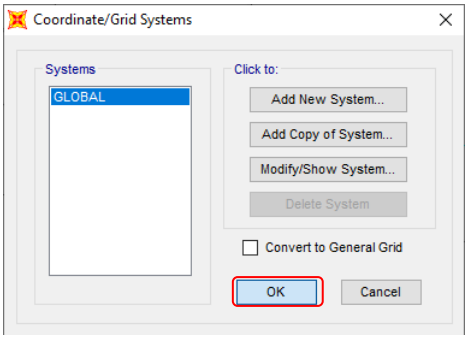
Slika 1.11: Nastavitev mrežnih črt v globalnem koordinatnem sistemu

Program vpisano vrednost sam izračuna in se izpiše nova vrednost, to je 0,5625 (Slika 1.12 – ❶). Na koncu vse skupaj potrdimo z ukazom *OK* (Slika 1.12 – ❷).



Slika 1.12: Nastavitev velikosti mehurčkov pri izpisu mrežnih črt

Nato še enkrat v oknu *Coordinate/Grid Systems* potrdimo s klikom na *OK* (Slika 1.13). V nasprotnem primeru lahko prekinemo spremembo nastavitev mrežnih črt (***Opomba 1***).

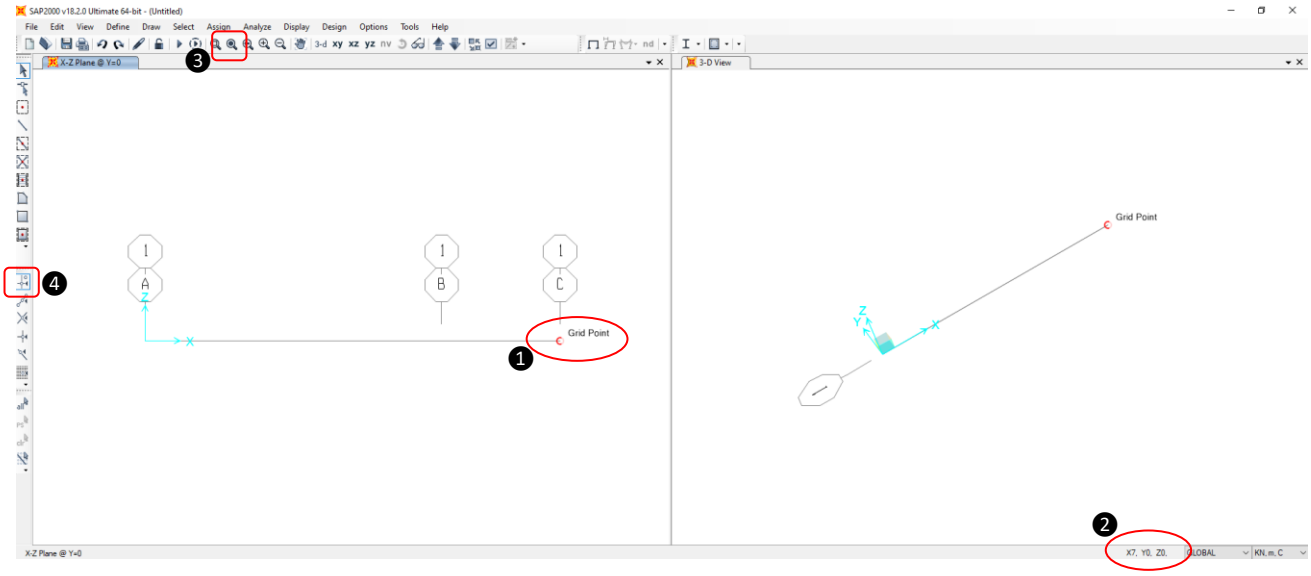


Slika 1.13: Potrditev nastavitev mrežnih črt v globalnem koordinatnem sistemu

Opomba 1: *Če ne želimo shraniti sprememb nastavitev v kateremkoli oknu, lahko kadarkoli vse skupaj brez upoštevanja sprememb prekinemo s klikom na Cancel ali na križec* ☒ *v desnem zgornjem kotu okna. Lahko pa to tudi prekinemo s tipko* <Esc> *na tipkovnici.*

Takoj lahko opazimo, da so se mehurčki zmanjšali, prav tako pa se je točka C premaknila v smeri *X* na definiranih 7 m. To lahko (po potrebi) najhitreje preverimo tako, da kazalec miške premaknemo v neposredno bližino točke C (presečišče mrežnih črt), kjer se pojavi rdeči krogec z napisom *Grid Point* (Slika 1.14 – ❶), v spodnjem desnem kotu zaslona pa se hkrati izpišejo koordinate (Slika 1.14 – ❷).

Izrisane mrežne črte v pogledu *X–Z* lahko po potrebi razširimo na celotno okno, tako da v glavnem meniju *View* izberemo *Restore Full View* (*F3*). Druga, še nekoliko hitrejša možnost je, da v orodni vrstici kliknemo na ikono 🔍 (Slika 1.14 – ❸). Hkrati moramo paziti, da je aktivno tisto okno, ki ga želimo prilagoditi.



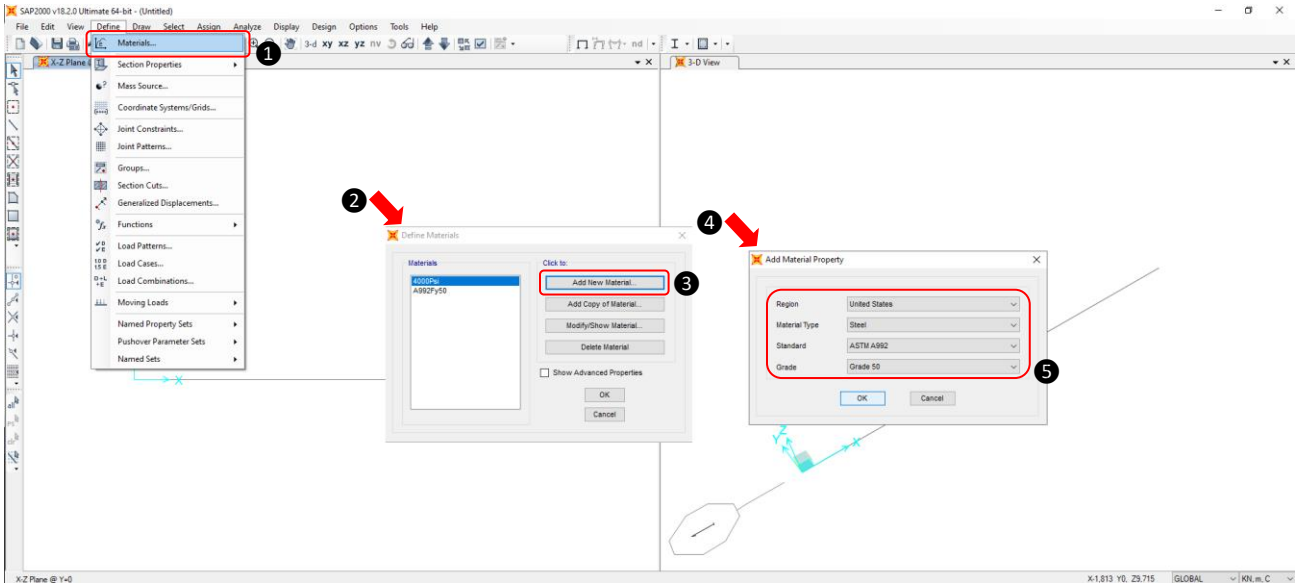
Slika 1.14: Nov izris mrežnih črt

Opomba 2: *Če se s kazalcem približamo presečišču mrežnih črt, se ta avtomatsko premakne na presečišče in se hkrati izriše še rdeči krogec. To omogoča možnost, ki jo lahko po želji izklopimo s klikom na ikono* *v orodni vrstici na levem robu (Slika 1.14 – ❹). Možnost je aktivna, ko je ikona izrisana z modro obrobo. Ta možnost enako velja tudi za definirane točke ali vozlišča elementov.*

– *Matematično modeliranje konstrukcije: definiranje materiala*

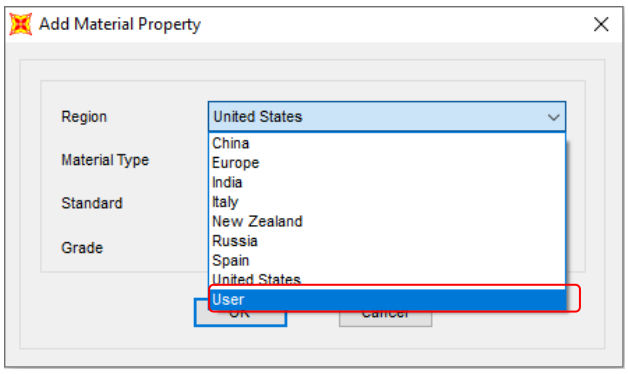
V naslednjem koraku lahko definiramo material (alternativno bi lahko namesto definiranja materiala najprej na primer izrisali končne elemente ali definirali njihove prereze), tako da v visečem meniju *Define* izberemo *Materials* … (Slika 1.15 – ❶). Odpre se okno *Define Materials* (Slika 1.15 – ❷) z dvema predefiniranima materialoma v razdelku *Materials*. Za obravnavano konstrukcijo je treba definirati nov material, zato v razdelku *Click to:* izberemo *Add New Material* …(Slika 1.15 – ❸). Prikaže se okno *Add Material Property* (Slika 1.15 – ❹), kjer določimo geografsko regijo (*Region*), tip materiala (*Material Type*), standard (*Standard*) in razred (*Grade*) (Slika 1.15 – ❺). Ker je okno *Add Material Property* (Slika 1.15 – ❹) prekrivalo okno *Define Materials* (Slika 1.15 – ❷), smo ga premaknili na drugo lokacijo (glej ***Opomba 3***).

Opomba 3: *Tako okno, ki prekriva polje, ki ga želimo videti, enostavno pomaknemo tako, da se s kazalcem pomaknemo v predel čisto na vrhu okna, kjer je napis. Nato kliknemo in držimo levi gumb miške. Okno premaknemo do želenega mesta in gumb sprostimo.*



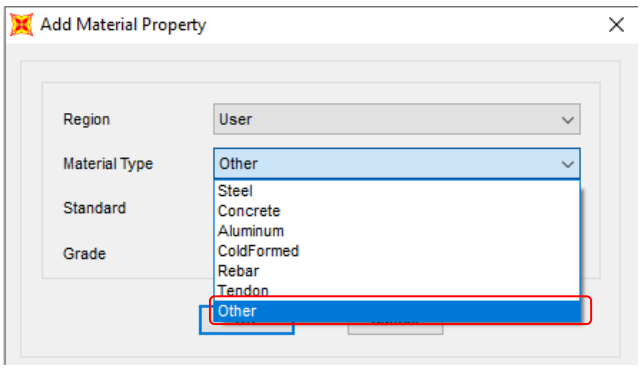
Slika 1.15: Definiranje materiala

Edini znani podatek za material je vrednost modula elastičnosti, zato je najprimerneje, da v razdelku *Region* na seznamu izberemo *User* (Slika 1.16). Ostale možnosti s seznama so namenjene predvsem za projektiranje konstrukcij po različnih standardih držav.



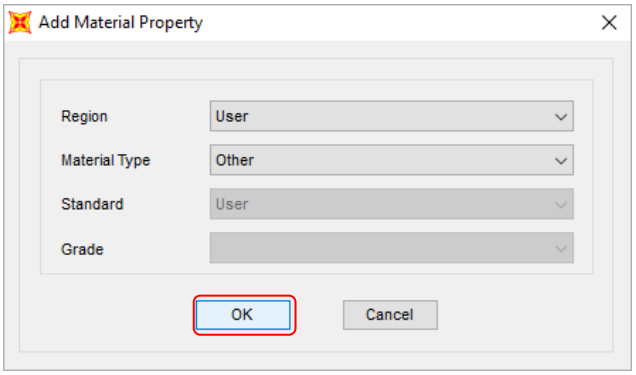
Slika 1.16: Definiranje materiala po geografski regiji

V razdelku *Material Type* pa na seznamu izberemo *Other* (Slika 1.17).



Slika 1.17: Definiranje vrste materiala

S tem ko smo izbrali za *Region* → *User* in *Material Type* → *Other*, sta zadnja dva razdelka (*Standard* in *Grade*) postala neaktivna in ju ni več možno spreminjati. S klikom na *OK* potrdimo izbiro (Slika 1.18).

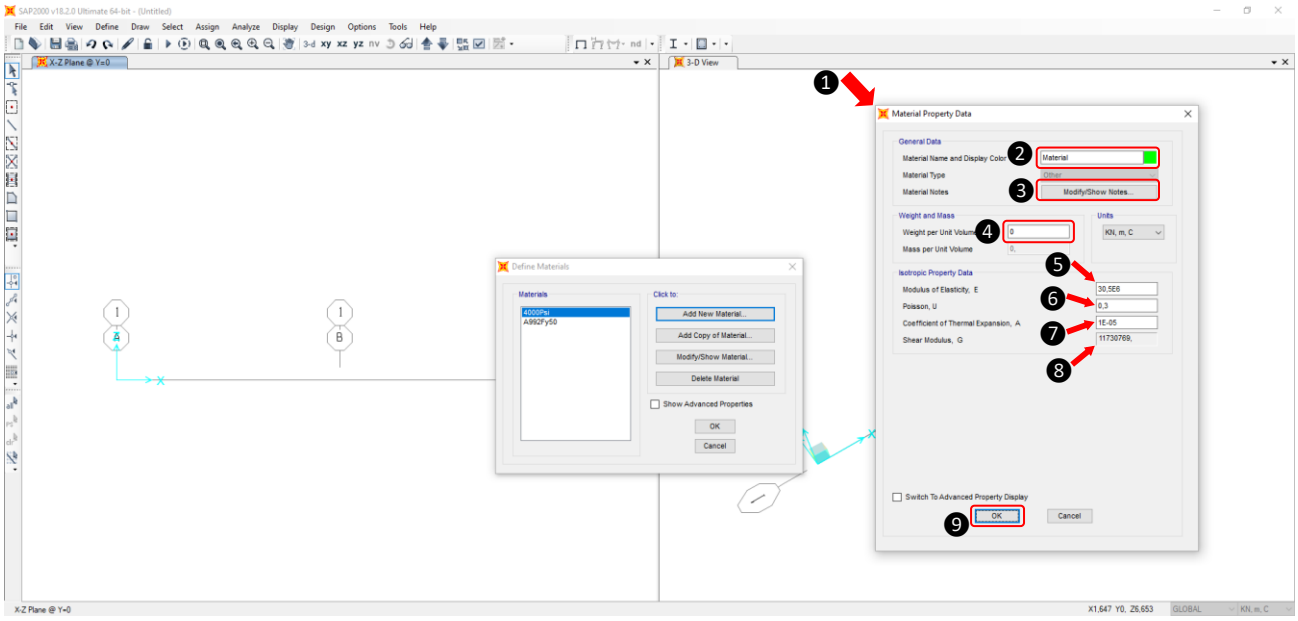


Slika 1.18: Potrditev izbire materiala

Odpre se okno *Material Property Data* (Slika 1.19 – ❶). V razdelku *General Data* čisto na vrhu okna lahko (po lastni izbiri) določimo ime materiala, za katerega smo izbrali *Material* (Slika 1.19 – ❷). Z opcijo *Modify/Show Notes ...*, ki ni bistvena in jo lahko preskočimo, lahko vpišemo morebitne zapiske (Slika 1.19 – ❸). V razdelku *Weight and Mass* v okencu poleg *Weight per Unit Volume* določimo specifično težo. Glede na to, da v prikazanem primeru ne upoštevamo lastne teže konstrukcije, bomo namesto predefinirane vrednosti izbrali vrednost nič (Slika 1.19 – ❹). V spodnjem razdelku *Isotropic Property Data* vpišemo vrednost elastičnega modula E = 30,5·10^6 (kPa – glede na izbrane enote v razdelku *Units*), ki je v okencu poleg *Modulus of Elaticity, E* (Slika 1.19 – ❺, glej ***Opomba 4***).

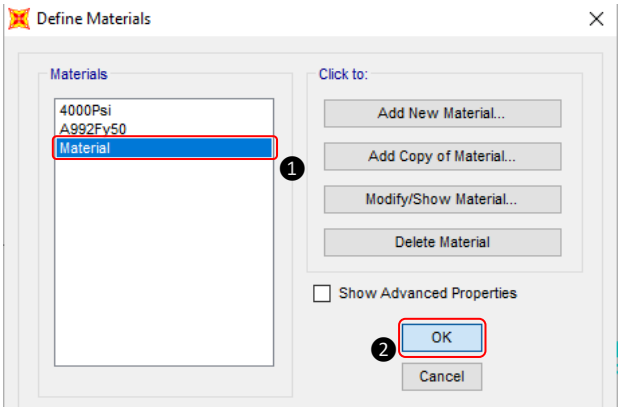
Opomba 4: Kadar vpisujemo decimalno število, potem uporabimo takšno decimalno ločilo, kot je privzeto v operacijskem sistemu, saj v nasprotnem primeru napačno uporabljeno decimalno ločilo vodi do napake, ki v nekaterih primerih ni takoj razvidna.

Ker v navodilih naloge ni podan Poissonov količnik, v izračunu ne bomo upoštevali vpliva strižnih sil, ki ga pri linijskih konstrukcijah običajno zanemarimo. Vpliv strižnih sil v programu določamo pri definiranju prereza (glej Slika 1.23, str. 22). Torej je lahko izbrana vrednost Poissonovega količnika poljubna (v mejah $0 \leq \nu < 0{,}5$), zato bomo okence *Poisson, U*, v katerem je že predefinirana vrednost Poissonovega količnika $\nu = 0{,}3$, pustili nespremenjeno (Slika 1.19 – ❻, glej ***Opomba 4***). V oknu poleg *Coefficient of Thermal Expansion* pa vpišemo koeficient termalnega raztezanja, ki je $\alpha = 1 \cdot 10^{-5}$/°K (Slika 1.19 – ❼). V zadnji vrstici razdelka, poleg *Shear Modulus, G*, je v neaktivnem (zatemnjenem) oknu prikazan še strižni modul, ki se kot funkcija elastičnega modula in Poissonovega količnika samodejno prilagaja vpisanim vrednostim (Slika 1.19 – ❽). Na koncu vse skupaj potrdimo z *OK* (Slika 1.19 – ❾).



Slika 1.19: Nastavitve materialnih lastnosti

V oknu *Define Materials* se v razdelku *Materials* izpiše na novo definiran material z izbranim imenom *Material* (Slika 1.20 – ❶). Na novo definiran material potrdimo z *OK* (Slika 1.20 – ❷). V nasprotnem primeru lahko s klikom na *Cancel* še vedno prekinemo ukaz in material ne bo definiran (glej ***Opomba 1***, str. 15).



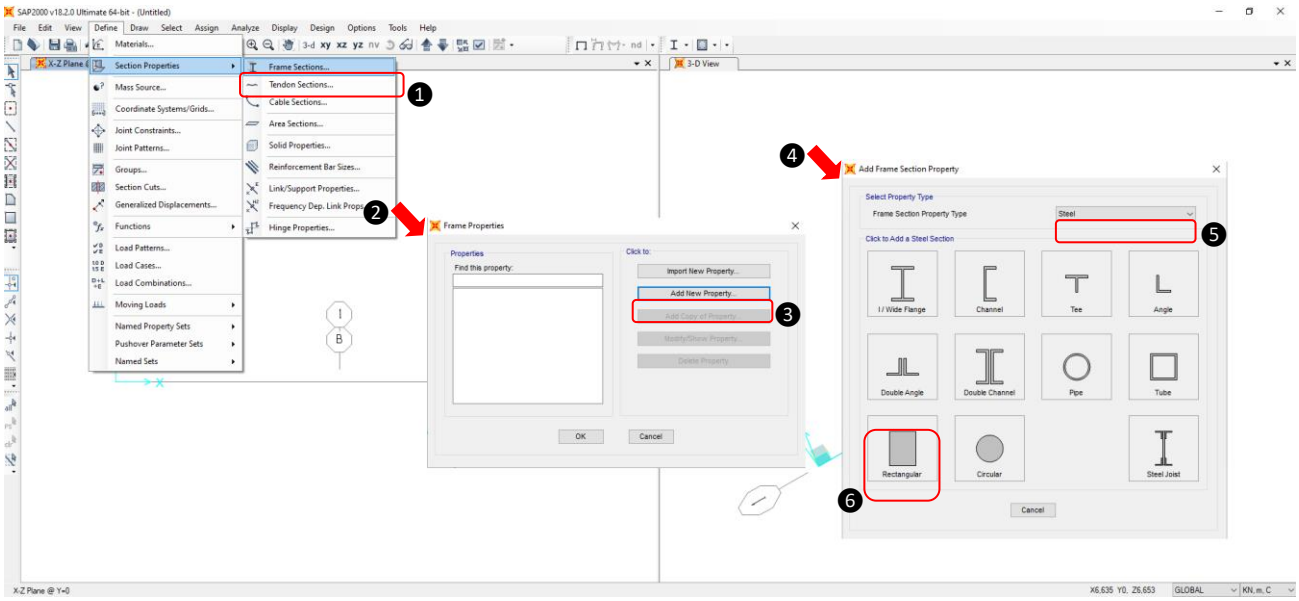
Slika 1.20: Potrditev na novo definiranega materiala

- *Diskretizacija konstrukcije: definiranje prereza*

Za definiranje prereza se v visečem meniju *Define* pomaknemo na *Section Properties* in izberemo *Frame Sections …* (Slika 1.21 – ❶). Odpre se novo okno, poimenovano *Frame Properties* (Slika 1.21 – ❷). V razdelku *Properties* še ni definiranega nobenega prereza in je zato prazno. Za definiranje novega prereza se z miško v razdelku *Click to:* pomaknemo na ikono *Add New Property …* in izbiro potrdimo s klikom na levi gumb miške (Slika 1.21 – ❸). Odpre se še drugo okno, in sicer *Add Frame Section Property* (Slika 1.21 – ❹). V razdelku *Select Property Type* na vrhu okna je seznam najpogosteje uporabljenih materialov za inženirsko prakso. Na seznamu je že kot predefinirano izbrano jeklo (*Steel*) (Slika 1.21 – ❺). V spodnjem razdelku *Click to Add a Steel Section* pa imamo tipične oblike konstrukcijskih prerezov glede na izbran material.

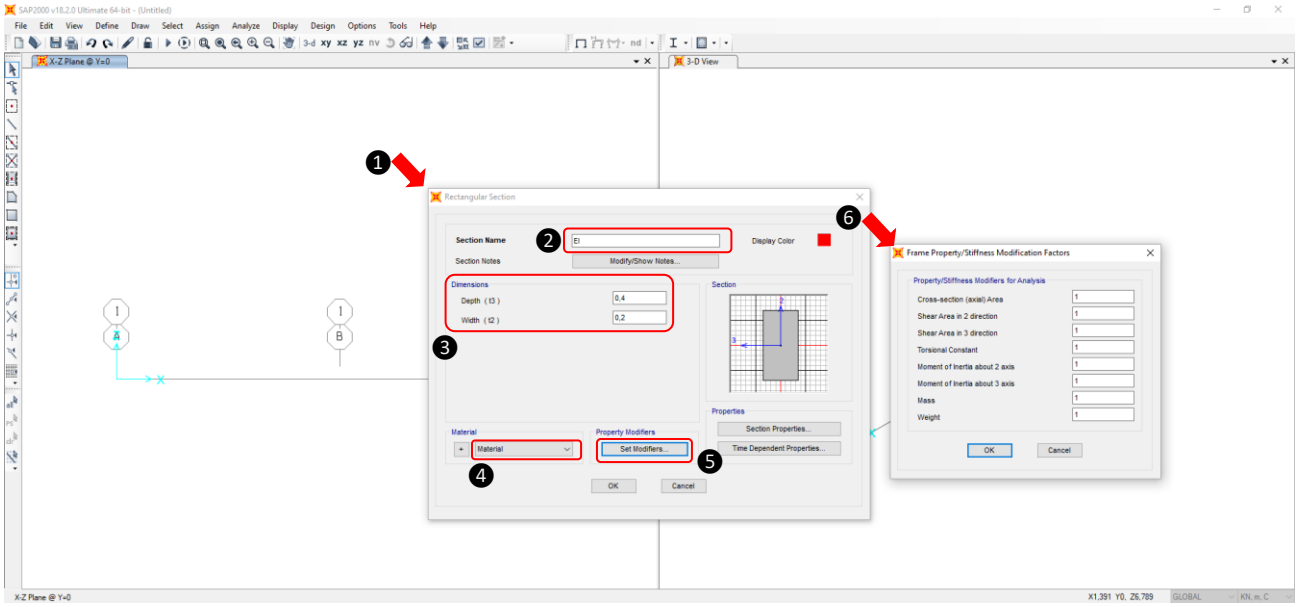
Čeprav modul elastičnosti (E = 30 GPa) za izbran primer ustreza betonskemu, je za linearne statične analize brez projektiranja pomembno zgolj to, da imamo na izbiro polni pravokotni prerez (*Rectangular*), ki je na voljo tudi za predefinirano izbrano jeklo (*Steel*). S kazalcem se pomaknemo na pravokotni prerez in potrdimo s klikom na levi gumb miške (Slika 1.21 – ❻).

Opomba 5: *V primeru, da imamo nestandardno obliko prereza (ki v razdelku Click to Add a Steel Section ne obstaja) ali kompozitni prerez, potem v razdelku Select Property Type na seznamu izberemo možnost Others z opcijo General, kjer sami podamo geometrijske karakteristike prereza, ali opcijo Section Designer, kjer lahko sami grafično podamo poljubno obliko kompozitnega ali nekompozitnega prereza, za katerega program sam preračuna pripadajoče geometrijske karakteristike.*



Slika 1.21: Nastavitve prereza

Nato se odpre okno *Rectangular Section* (Slika 1.22 – ❶). V razdelku *Section Name* namesto podanega imena *FSEC1* izberemo na primer *EI* (Slika 1.22 – ❷). V razdelku *Dimensions* določimo obe dimenziji pravokotnega prereza. Za globino prereza (*Depth*), ki poteka v smeri 2 lokalnega koordinatnega sistema končnega elementa, izberemo 0,4 m in za širino (*Width*), ki poteka v smeri 3, izberemo 0,2 m (Slika 1.22– ❸, glej ***Opomba 4***, str. 18). V razdelku *Material* na seznamu izberemo definirani material z imenom Material (Slika 1.22 – ❹). V istem razdelku je poleg na voljo še ikona z znakom +. Če materiala ne bi že predhodno definirali, ga je možno definirati sedaj s klikom na to ikono. V razdelku *Property Modifiers* je ikona *Set Modifiers* ... (Slika 1.22 – ❺) in s klikom nanjo se odpre okno *Frame Property/Stiffness Modification Factors* (Slika 1.22 – ❻) z razdelkom *Property/Stiffness Modifiers for Analysis*. V razdelku je na seznamu modifikatorjev osem količin, ki jih lahko v analizi bodisi povečamo (s pomočjo vrednosti > 1) bodisi zmanjšamo (z vrednostjo < 1).

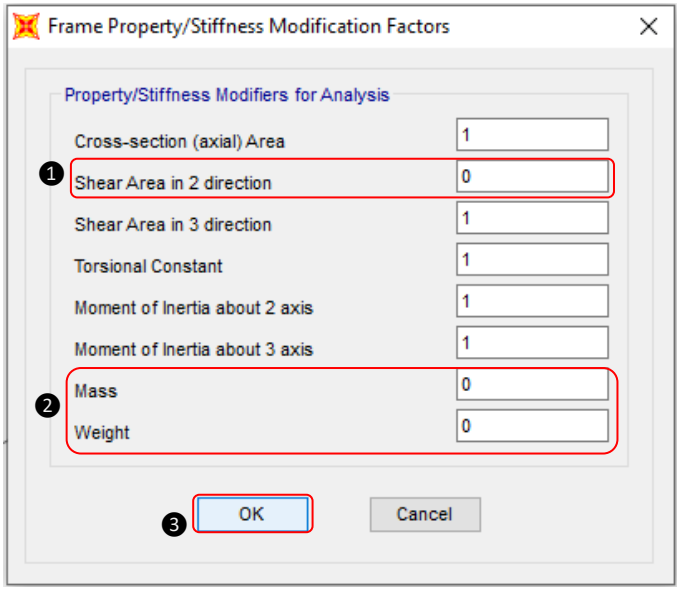


Slika 1.22: Nastavitve prereza

Po vrsti navedene količine so:

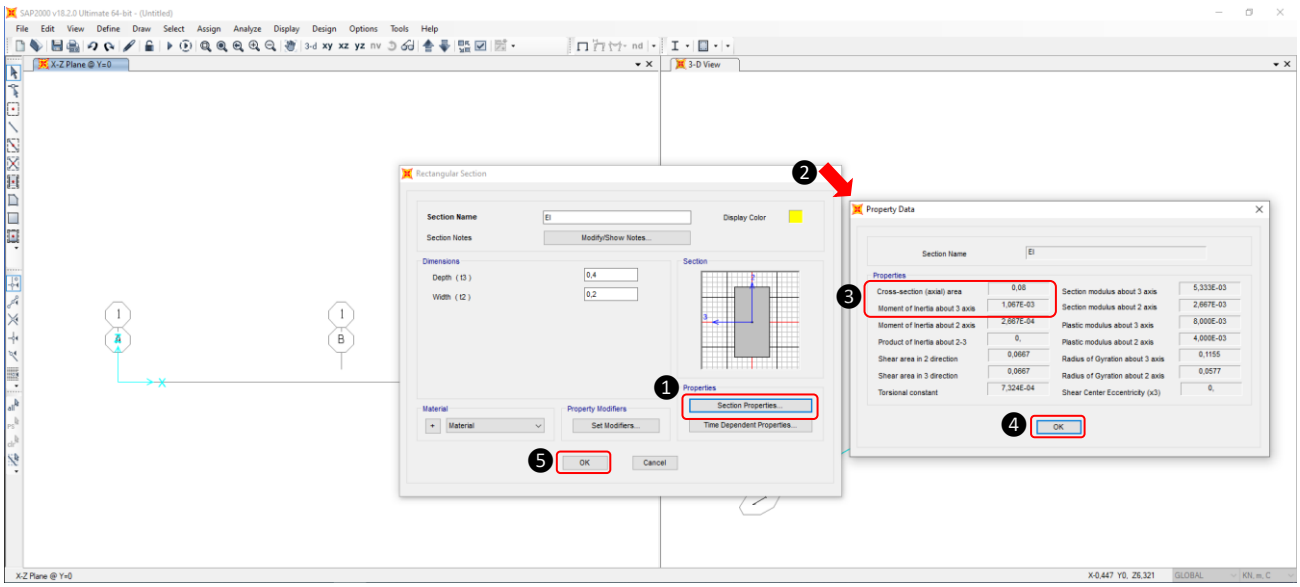
- površina prereza (*Cross-section (axial) Area*);
- strižna površina v lokalni koordinatni smeri 2 prereza (*Shear Area in 2 direction*);
- strižna površina v lokalni koordinatni smeri 3 prereza (*Shear Area in 3 direction*);
- torzijski vztrajnostni moment (*Torsional Constant*);
- upogibni težiščični vztrajnostni moment okoli lokalne koordinatne smeri 2 prereza (*Moment of Inertia about 2 axis*);
- upogibni težiščični vztrajnostni moment okoli lokalne koordinatne smeri 3 prereza (*Moment of Inertia about 3 axis*);
- masa (*Mass*);
- teža (*Weight*).

Pri prvih šestih (po vrsti) naštetih količinah lahko (v okencih desno, poleg napisov z manipulacijo velikosti faktorja, večjega ali manjšega od 1) posredno spremenimo osno, strižno, torzijsko in upogibno togost, medtem ko pri zadnjih dveh količinah lahko spremenimo težo ali maso končnih elementov za izbrani prerez. Vpliv strižnih deformacij v smeri *Z* globalnega koordinatnega sistema (torej v smeri 2 lokalnega koordinatnega sistema elementa) smo zanemarili tako, da smo v okencu poleg *Shear Area in 2 direction* vpisali vrednost nič (Slika 1.23 – ❶). Velikosti vrednosti modifikatorjev za maso in težo ne bosta vplivali na rezultate te analize, ker smo že za material (pri obravnavanem prerezu) definirali, da sta enaka nič. Vseeno smo izbrali, da sta modifikatorja (v zadnjih dveh vrsticah) za maso in težo nič (Slika 1.23 – ❷). Na koncu vse skupaj še potrdimo z *OK* (Slika 1.23 – ❸).



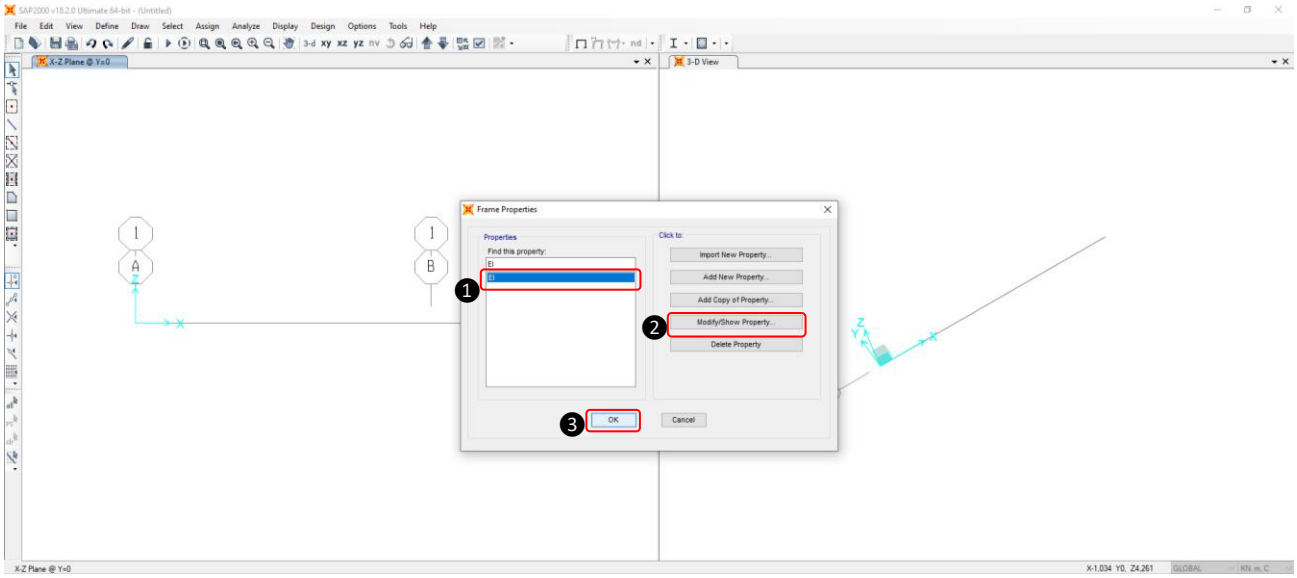
Slika 1.23: Natavitve modifikatorjev prereza

Okno *Frame Property/Stiffness Modification Factors* se nato zapre, v predhodnem oknu *Rectangular Section* pa lahko (neobvezno) preverimo še geometrijske karakteristike prereza s klikom na ikono *Section Properties* ... (Slika 1.24 – ❶). Odpre se okno *Property Data* (Slika 1.24 – ❷) s prikazanimi štirinajstimi geometrijskimi karakteristikami prereza, ki so na voljo samo za pregled in kontrolo (vrednosti ni mogoče spreminjati). Za linearno statično analizo v ravnini *X–Z* s pravokotnim prerezom sta brez upoštevanja strižnih deformacij pomembni le dve količini, in sicer površina prereza, ki vpliva na osno togost, in upogibni težiščni vztrajnostni moment v lokalni smeri 3 prereza, ki vpliva na upogibno togost (Slika 1.24 – ❸). Za obe označeni količini lahko hitro preverimo, ali ustrezata vrednostma, ki sledita iz formul za površino prereza in upogibni vztrajnostni moment za pravokotni presek. Okno zapremo s klikom na ikono *OK* (Slika 1.24 – ❹). V oknu *Rectangular Section* vse skupaj potrdimo s klikom na *OK* (Slika 1.24 – ❺).



Slika 1.24: Kontrola geometrijskih karakteristik

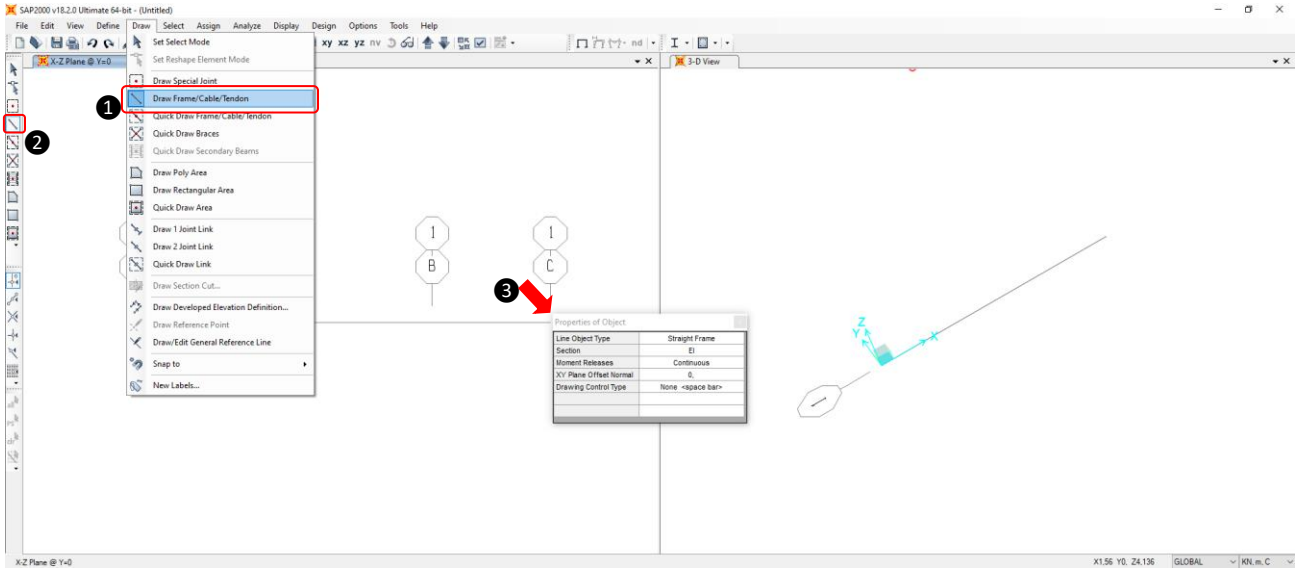
V začetnem oknu *Frame Properties* se v razdelku *Properties* izpiše na novo definirani prerez z imenom *EI* (Slika 1.25 – ❶). Če želimo dodatno popraviti karakteristike prereza, se lahko s klikom na ikono *Modify/Show Property ...* (Slika 1.25 – ❷) kadarkoli vrnemo v predhodno okno *Rectangular Section*. Definirani prerez dokončno potrdimo še s klikom na ikono *OK* (Slika 1.25 – ❸). V nasprotnem primeru lahko s klikom na ikono *Cancel* še vedno prekinemo ukaz in prerez ne bo definiran (glej ***Opomba 1***, str. 15).



Slika 1.25: Potrditev nastavitve prereza

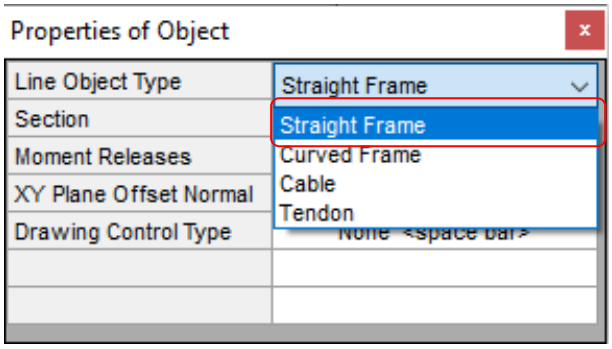
– *Diskretizacija konstrukcije: definiranje končnih elementov (topologije)*

Topologijo linijskih končnih elementov definiramo tako, da v visečem meniju *Draw* izberemo možnost *Draw Frame/Cable/Tandon* (Slika 1.26 – ❶). Druga možnost je, da v orodni vrstici kliknemo na ikono (Slika 1.26 – ❷). Odpre se okno *Properties of Object* (Slika 1.26 – ❸), kjer izberemo lastnosti končnega elementa.



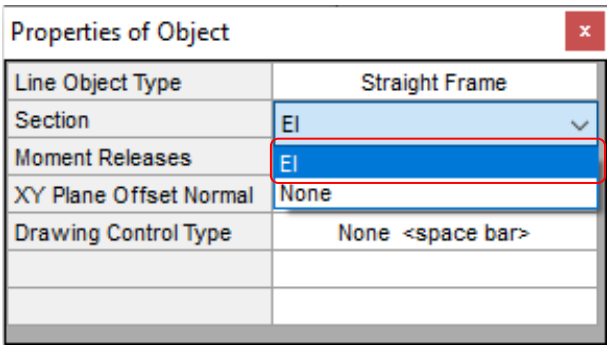
Slika 1.26: Nastavitve linijskega končnega elementa

V prvi vrstici *Line Object Type* prvega stolpca lahko izbiramo med štirimi različnimi tipi linijskih končnih elementov. Za obravnavan primer (ravni nosilec) je edina primerna izbira *Straight Frame*, ki je že bila predefinirana (Slika 1.27).



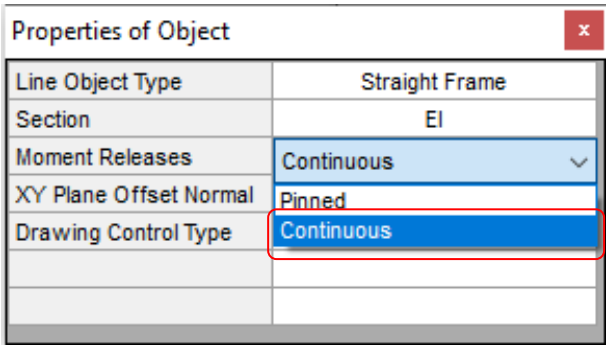
Slika 1.27: Izbira tipa linijskega končnega elementa

V drugi vrstici *Section* je že nastavljen prerez, ki smo ga predhodno definirali z imenom *EI* (Slika 1.28). Druga možnost *None* nam omogoča, da lahko končni element izrišemo, še preden definiramo prerez.



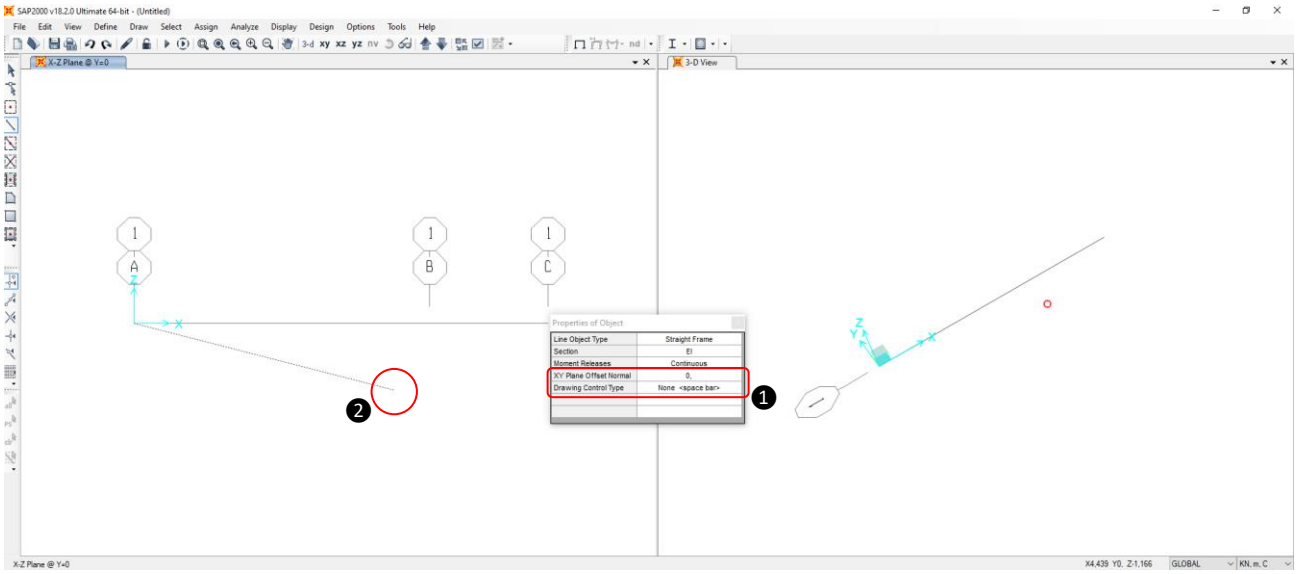
Slika 1.28: Izbira prereza linijskega končnega elementa

V tretji vrstici *Moment Releases* sta na izbiro dve možnosti: *Pinned* in *Continuous*). *Pinned* predstavlja palični končni element s sproščenimi momenti na obeh koncih, medtem ko *Continuous* predstavlja polno vpeti končni element, ki je predefiniran in pride v poštev za obravnavani primer (Slika 1.29).



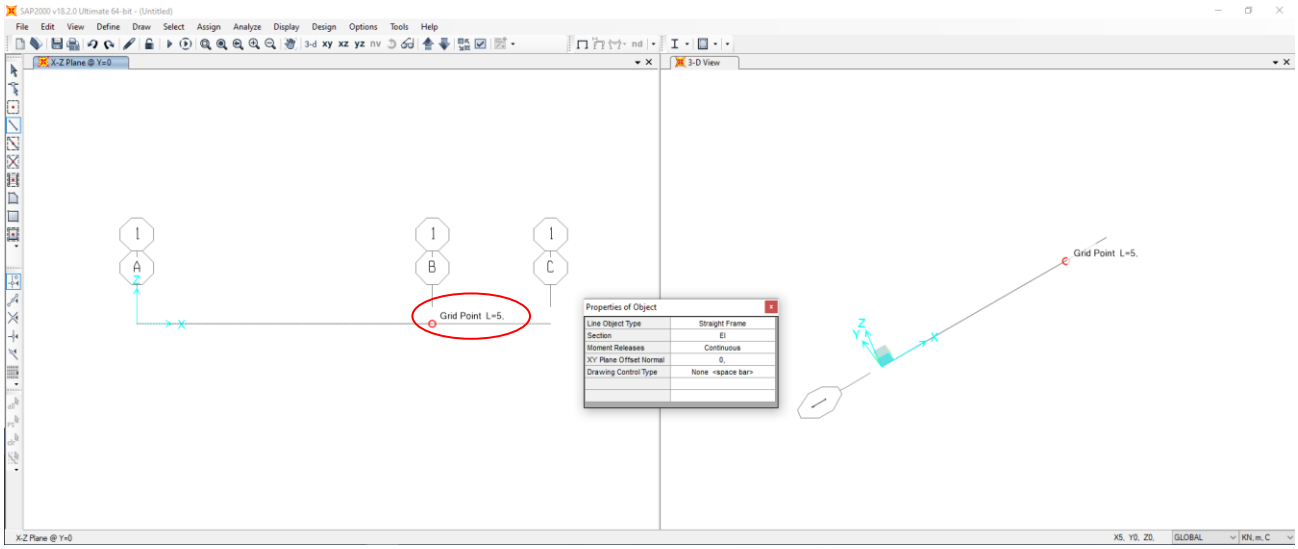
Slika 1.29: Izbira tipa sprostitve linijskega končnega elementa

Četrta in peta vrstica sta namenjeni načinu izrisa končnega elementa (Slika 1.30 – ❶). Ker imamo na razpolago že definirane mrežne črte, po katerih bomo izrisali oba končna elementa, lahko prednastavljeni možnosti pustimo. Prvi končni element definiramo in izrišemo tako, da se s kazalcem pomaknemo v začetno vozlišče A in potrdimo s klikom na levi gumb miške. Nato kazalec vodimo naprej proti končnemu vozlišču B in med premikanjem kazalca se sproti izrisuje črta med izbranim začetnim vozliščem in trenutno lego kazalca (Slika 1.30 – ❷).



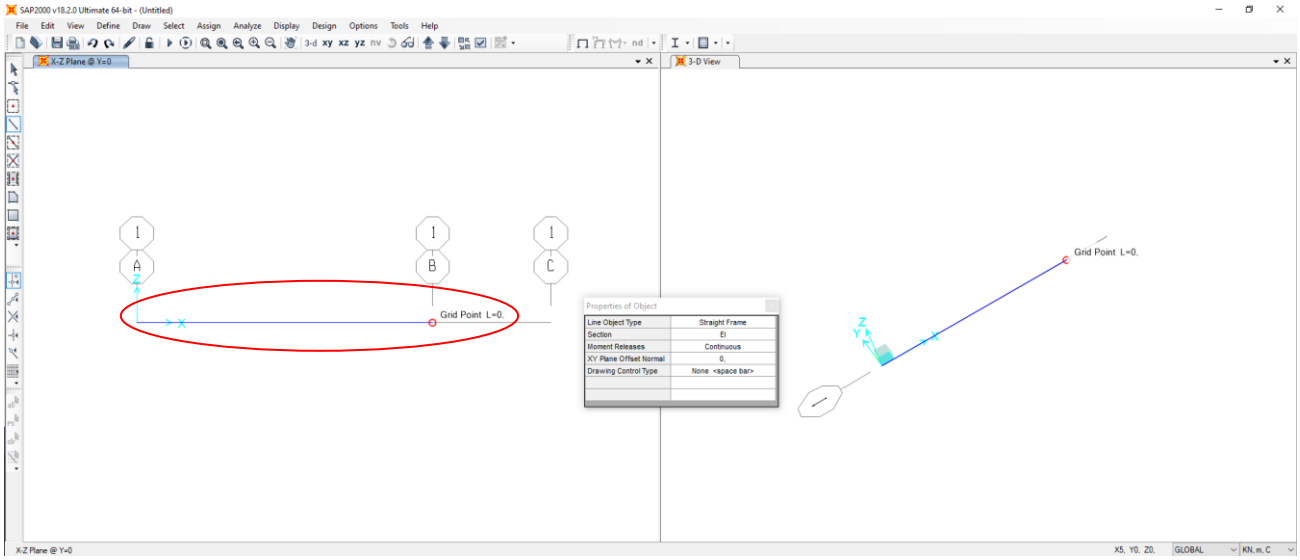
Slika 1.30: Izris prvega končnega elementa

Ko se s kazalcem pomaknemo do vozlišča B (to je presečišča mrežnih črt), se izpišeta *Grid Point* (glej ***Opomba 2***, str. 16) in dolžina končnega elementa $L = 5$ (Slika 1.31).



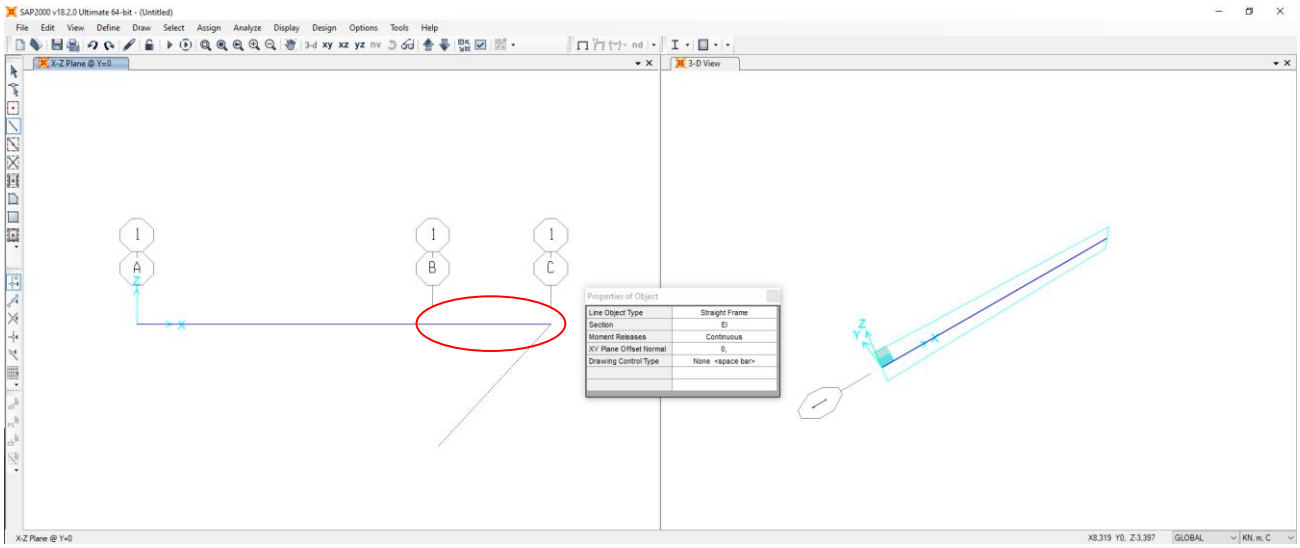
Slika 1.31: Izris prvega končnega elementa

Element potrdimo s klikom na levi gumb miške in končni element se izriše z modro barvo. Hkrati se v presečišču vozlišča B (na lokaciji začetnega vozlišča drugega končnega elementa) izpiše $L = 0$, kar predstavlja dolžino morebitnega naslednjega končnega elementa v danem trenutku (Slika 1.32).



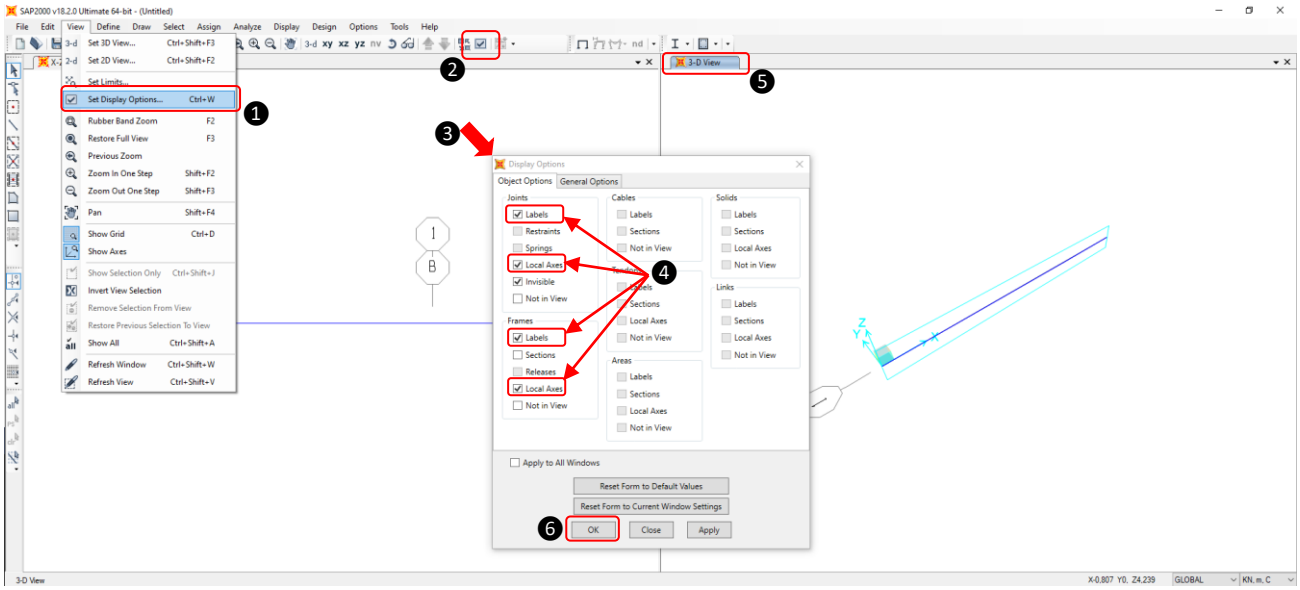
Slika 1.32: Izris prvega končnega elementa

Na isti način definiramo še drugi končni element (ne da bi morali ponovno aktivirati okno *Properties of Object*, pri čemer je kot začetno vozlišče izbrano končno vozlišče prvega elementa), tako da kazalec samo vlečemo dalje do končnega vozlišča C in drugi končni element potrdimo z levim klikom miške (Slika 1.33). Kazalec lahko vlečemo dalje za izris morebitnega naslednjega oziroma tretjega končnega elementa, vendar smo z vnosom končnih elementov primera oziroma izbrane diskretizacije končali. Zato lahko okno *Properies of Object* zapremo s klikom na križec v desnem zgornjem kotu tega okna ali s pritiskom na tipko <Esc>.



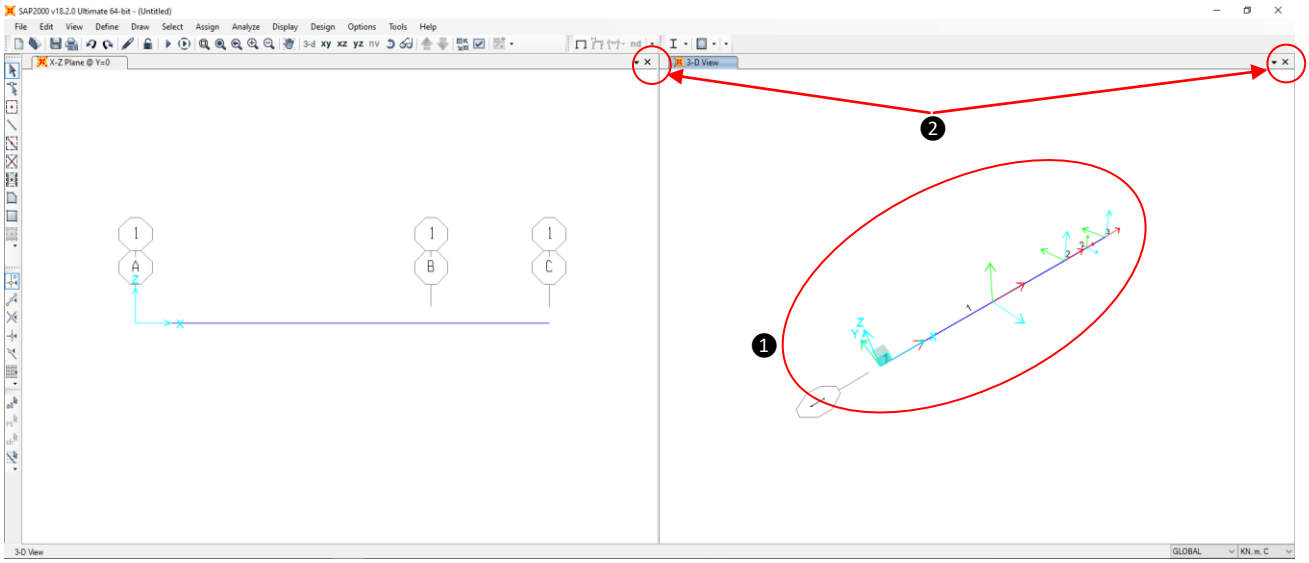
Slika 1.33: Izris drugega končnega elementa

Za grafični prikaz oznak in lokalnih koordinatnih smeri vozlišč ter končnih elementov v glavnem meniju kliknemo na *View*, se pomaknemo na *Set Display Options* (*Ctrl + W*) in potrdimo s klikom (Slika 1.34 – ❶). Enakovredna in hkrati hitrejša možnost je, da v orodni vrstici kliknemo na ☑ (Slika 1.34 – ❷). Odpre se okno *Display Options* (Slika 1.34 – ❸) in v razdelkih *Joints* in *Frames* označimo *Labels* in *Local Axes* (Slika 1.34 – ❹). S klikom kjerkoli na desno okno aktiviramo 3D-pogled (Slika 1.34 – ❺), v katerem želimo prikazati oznake in koordinatne osi vozlišč ter končnih elementov, in to potrdimo s klikom na *OK* (Slika 1.34 – ❻).



Slika 1.34: Možnosti prikaza

Okno *Display Options* se zapre, hkrati pa se v aktiviranem desnem oknu (*3-D View*) s številkami označijo vsa vozlišča in končni elementi. Prikažejo se tudi lokalni koordinatni sistemi vozlišč in končnih elementov (Slika 1.35 – ❶). Vedno imamo možnost, da morebiti nepotrebno prikazno okno po želji zapremo s klikom na križec ✕ v zgornjem levem kotu (Slika 1.35 – ❷) in s tem še povečamo prostor za prikaz konstrukcije v ostalem prikaznem oknu.



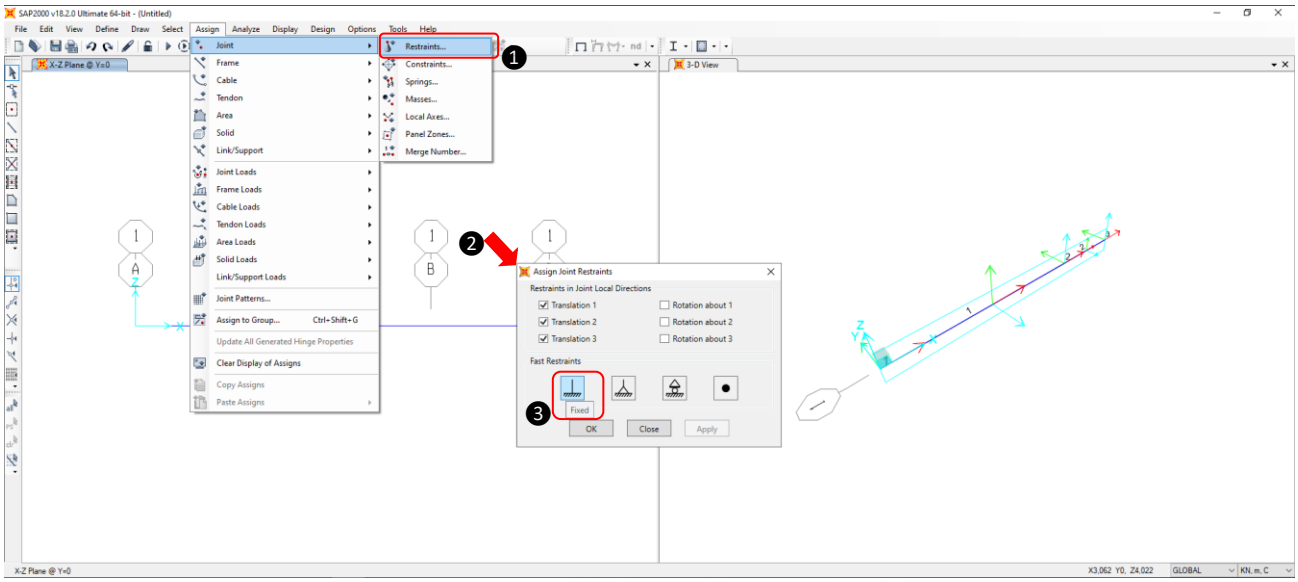
Slika 1.35: Prikaz označb in lokalnih koordinatnih sistemov vozlišč ter končnih elementov v 3D-pogledu

Opomba 6: *Lokalne koordinatne osi* ***vozlišč*** *so grafično prikazane s tremi barvnimi odtenki: 1 (→), 2 (→) in 3 (→). Lokalne koordinatne osi vozlišč so v osnovi definirane tako, da sovpadajo z osmi X, Y in Z globalnega koordinatnega sistema.*

Tudi lokalne koordinatne osi ***elementa*** *so grafično prikazane z istimi barvnimi odtenki: 1 (→), 2 (→) in 3 (→), pri čemer lokalna koordinatna os 1 (→) deluje vedno v smeri osi od začetnega proti končnem vozlišču.*

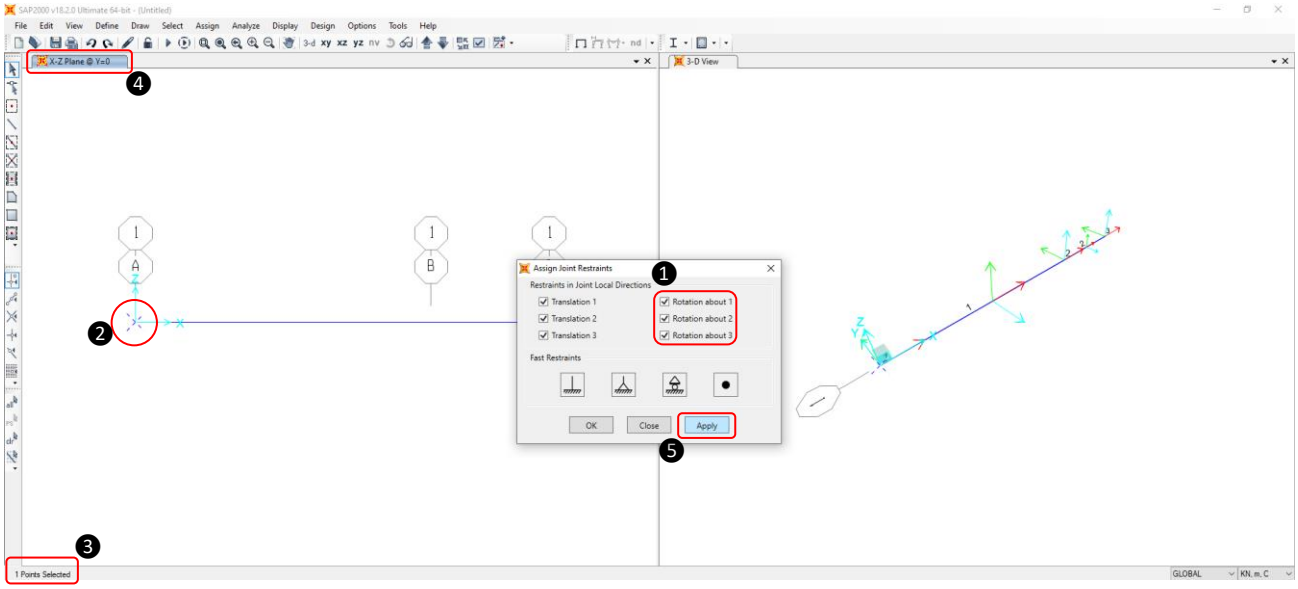
– *Diskretizacija konstrukcije: definiranje kinematičnih robnih pogojev (podpor)*

Za določitev podpor na konstrukciji v glavnem meniju kliknemo na *Assign* in se s kazalcem pomaknemo na *Joint* (odpre se nov meni), kjer s klikom izberemo *Restraints* ... (Slika 1.36 – ❶). Odpre se okno *Assign Joint Restraints* (Slika 1.36 – ❷) z razdelkoma *Restraints in Joint Local Directions* in *Fast Restrains*. V prvem razdelku posamično izbiramo med šestimi možnimi preprečitvami vozliščnih prostostnih stopenj. V drugem razdelku (*Fast Restraints*) pa imamo na izbiro že pripravljene štiri najpogostejše tipe podpor za različne možnosti preprečitev pomikov in zasukov. To so: vpeta (*fixed*), nepomična (*pinned*) in vodoravno pomična podpora (*roller*) v smeri lokalne osi 1. Zadnja izbira je možnost brez preprečitve (*no restraints*), s katero lahko odstranimo morebitno že definirano podporo. Ker imamo na skrajno levem koncu konstrukcije vpeto podporo, je treba v vozlišču preprečiti pomike in zasuke v vseh smereh (1, 2 in 3). To najenostavneje storimo tako, da v razdelku *Fast Restraints* kliknemo na prvo ikono vpete podpore (Slika 1.36 – ❸).



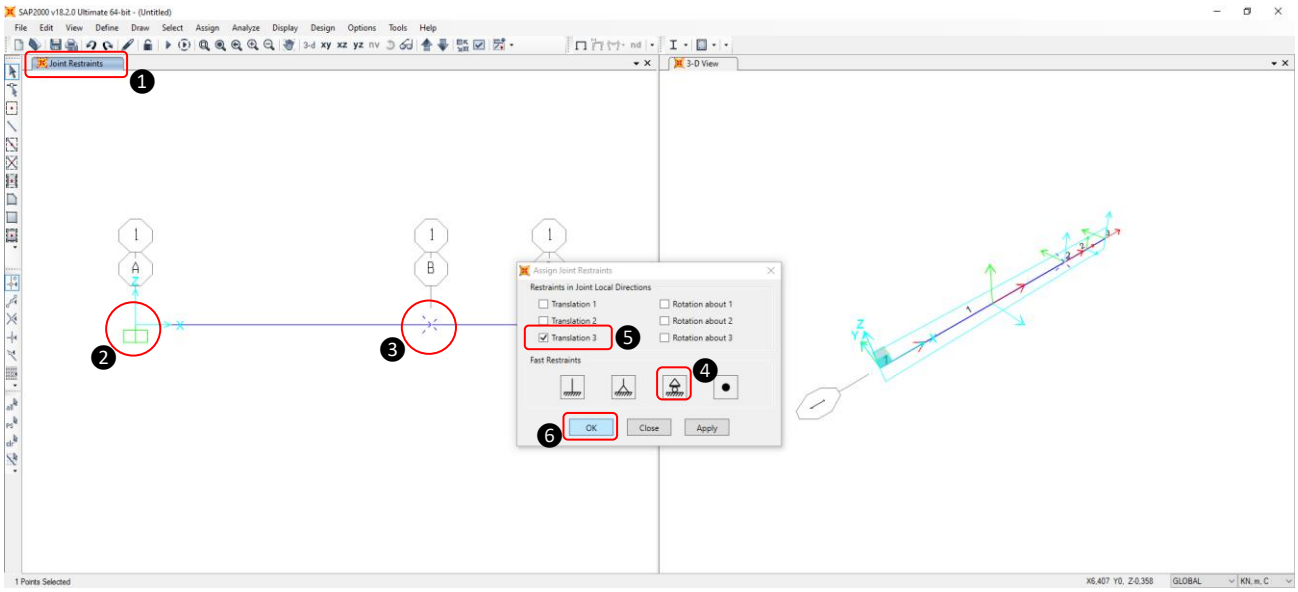
Slika 1.36: Definiranje vpete podpore v vozlišču A

V zgornjem razdelku *Restraints in Joint Local Directions* se samodejno označijo še rotacije vseh treh lokalnih koordinatnih smeri (Slika 1.37 – ❶). V istem razdelku lahko posamezne komponente pomikov in rotacij tudi sami poljubno izbiramo s klikom na ikono ☑. Nato se s kazalcem pomaknemo na začetno vozlišče prvega končnega elementa (torej vozlišče *A*), kjer želimo podati vpeto podporo, in ga v levem prikaznem oknu (lahko bi izbrali tudi desno prikazno okno) označimo s klikom na levi gumb miške. V označenem vozlišču se pojavi križec (Slika 1.37 – ❷), hkrati pa se v spodnjem levem koncu zaslona izpiše trenutno število označenih vozlišč (Slika 1.37 – ❸). S tem ko smo v levem oknu označili vozlišče, postane ponovno aktivno levo prikazno okno (Slika 1.37 – ❹). Vse skupaj potrdimo s klikom na *Apply* (Slika 1.37 – ❺).



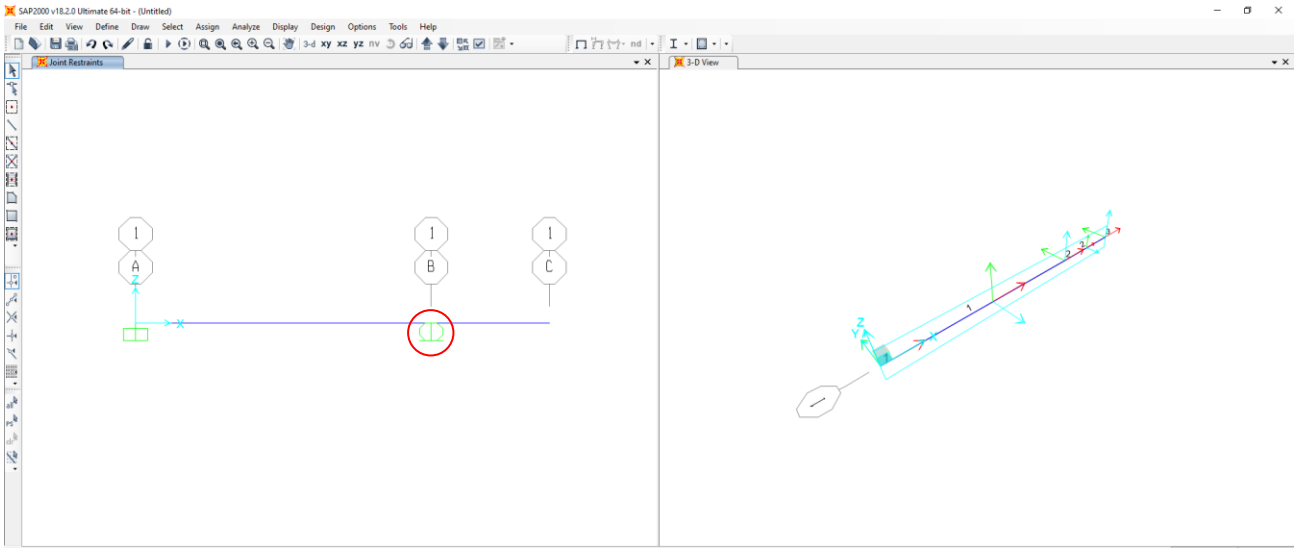
Slika 1.37: Definiranje vpete podpore v vozlišču A

Po potrditvi se v aktivnem pogledu *X–Z* (Slika 1.38 – ❶) grafično izriše vpeta podpora (Slika 1.38 – ❷). Določimo še desno horizontalno pomično podporo, tako da označimo vozlišče B (Slika 1.38 – ❸) in v razdelku *Fast Restraints* kliknemo na ikono (Slika 1.38 – ❹). Vidimo lahko, da je v razdelku *Restraints in Joint Local Directions* sedaj označena (in s tem preprečena) samo smer 3 (→) lokalnega koordinatnega sistema (*Translation 3*), ki sovpada s smerjo *Z* globalnega koordinatnega sistema, za katero želimo preprečiti pomik (Slika 1.38 – ❺). Ker je bil to zadnji vnos, lahko namesto na *Apply* kliknemo na *OK* (Slika 1.38 – ❻).



Slika 1.38: Definiranje pomične podpore v vozlišču B

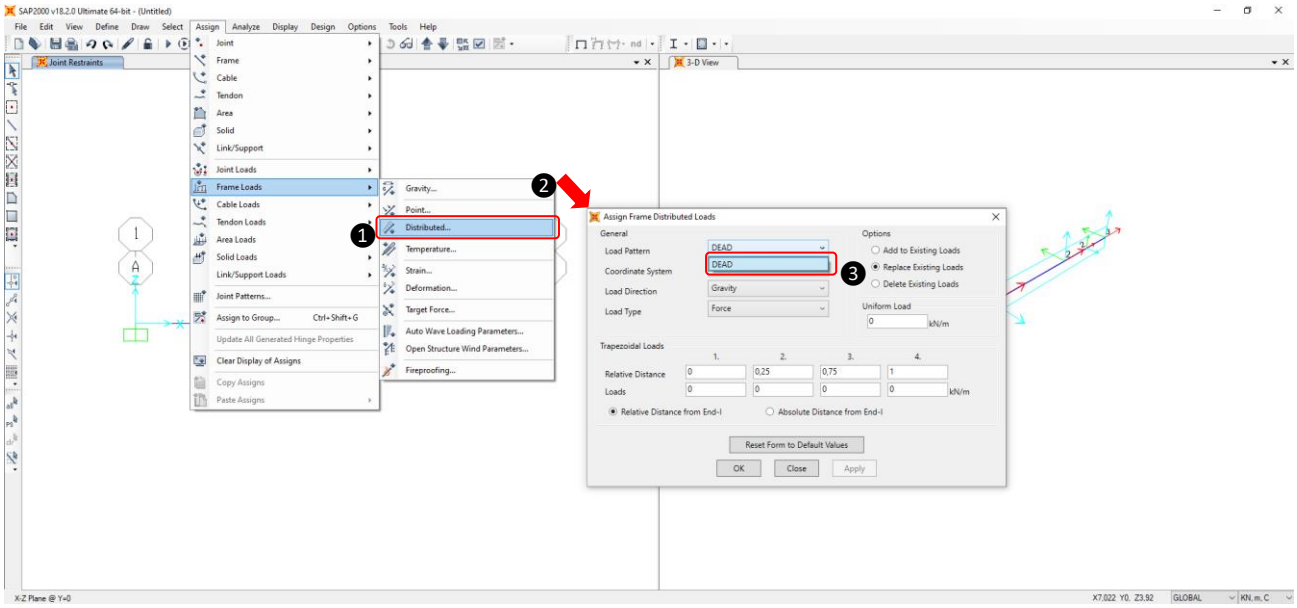
Po potrditvi se okno za vnašanje podpor zapre in hkrati se v aktivnem oknu izriše pomična podpora v vozlišču *B* (Slika 1.39).



Slika 1.39: Izris pomične podpore v pogledu *X–Z*

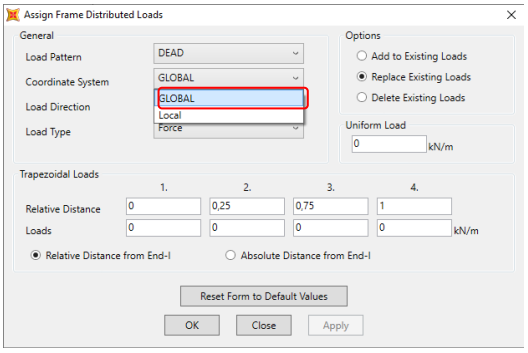
– *Določitev obtežb*

Pred analizo je treba določiti še vse obtežbe, ki delujejo na konstrukcijo. Najprej določimo enakomerno zvezno obtežbo, tako da v meniju kliknemo na *Assign*, se pomaknemo na *Frame Loads* in nato še na *Distributed* ... ter izbiro potrdimo z levim klikom miške (Slika 1.40 – ❶). Odpre se okno *Assign Frame Distributed Loads* (Slika 1.40 – ❷). Če se zgodi, da okno zakriva pogled na izrisano konstrukcijo, ga lahko premaknemo na katerokoli drugo lokacijo (glej ***Opomba 3***, str. 16). V razdelku *General* imamo v prvi vrstici najprej *Load Pattern*, kjer lahko izbiramo med različnimi obtežnimi primeri. Na izbiro imamo predefiniran obtežni vzorec z imenom *DEAD* (Slika 1.40 – ❸).



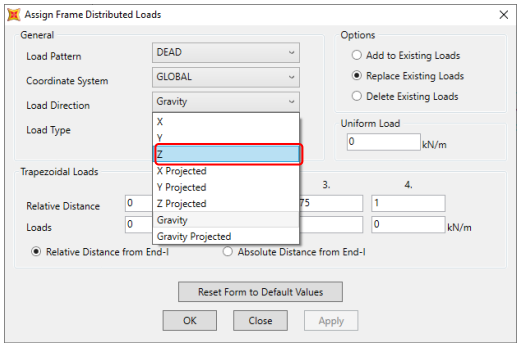
Slika 1.40: Definiranje enakomerne zvezne obtežbe

V drugi vrstici *Coordinate System* sta na izbiro globalni koordinatni sistem konstrukcije (*GLOBAL*) in lokalni koordinatni sistem končnega elementa (*Local*). Na končnem elementu obtežba glede na lokalni koordinatni sistem deluje v nasprotni smeri 2 (→), medtem ko glede na globalnega deluje v nasprotni smeri Z (glej **Napaka! Vira sklicevanja ni bilo mogoče najti.**, str. 27). Za obravnavani primer je zato povsem vseeno, kateri koordinatni sistem izberemo. Odločimo se za globalni koordinatni sistem konstrukcije (Slika 1.41).



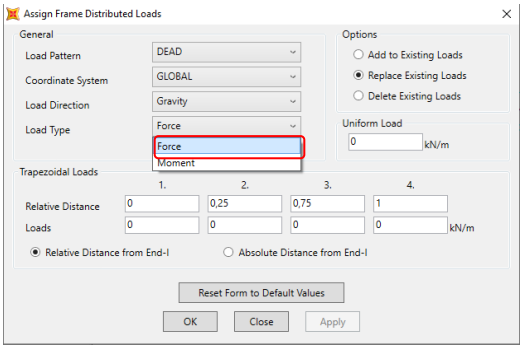
Slika 1.41: Definiranje enakomerne zvezne obtežbe

V tretji vrstici (*Load Direction*) za izbrani globalni koordinatni sistem glede na smer Z delovanja obtežbe na seznamu izberemo *Z* (Slika 1.42). Ker je gravitacija definirana v negativni smeri *Z*, v kateri deluje tudi obtežba, bi lahko na seznamu izbrali tudi *Gravity*.



Slika 1.42: Definiranje enakomerne zvezne obtežbe

V zadnji vrstici (*Load Type*) pa izbiramo med dvema tipoma obtežbe, in sicer v obliki razporejene sile (*Force*) ali momenta (*Moment*) po nosilcu. V našem primeru kot obremenitev deluje enakomerno razporejena prečna obtežba, zato je kot edina primerna izbira *Force* (Slika 1.43).



Slika 1.43: Definiranje enakomerne zvezne obtežbe

V razdelku *Options* imamo na seznamu tri možnosti podajanja obtežbe na končni element (Slika 1.44 – ❶):

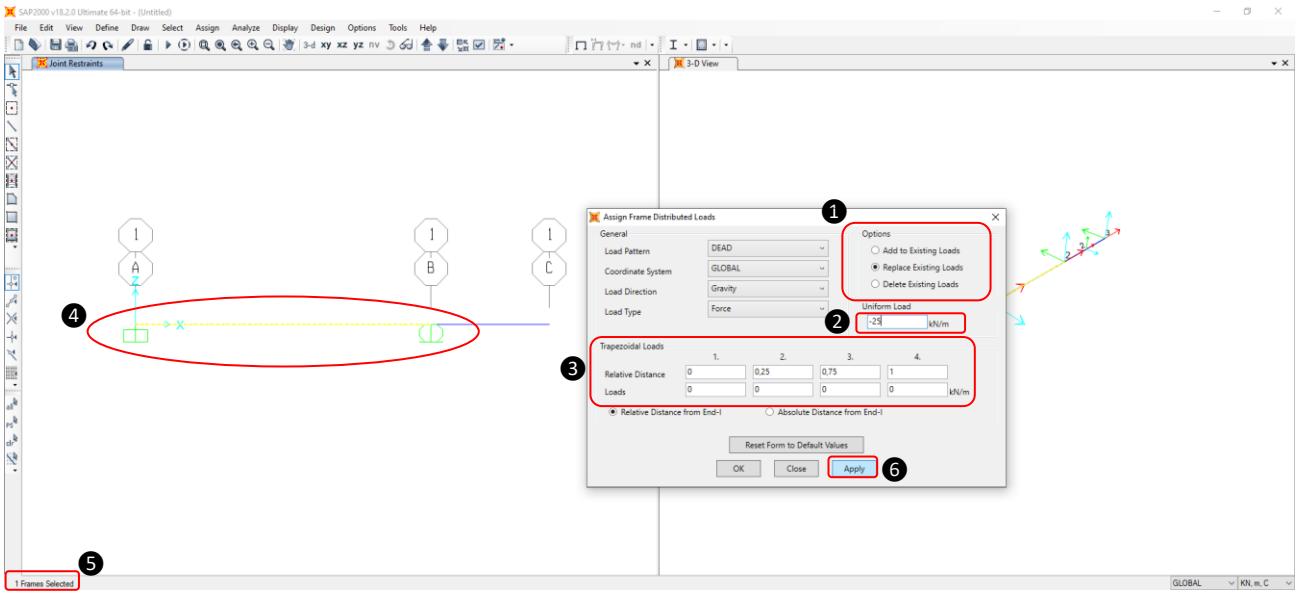
– *Add to Existing Loads* (izberemo, če želimo obtežbo dodati k že obstoječim obtežbam po končnem elementu);

– *Replace Existing Load* (izberemo, kadar želimo nadomestiti že obstoječe obtežbe z novo);

– *Delete Existing Load* (izberemo, če želimo odstraniti vse obtežbe iz končnega elementa).

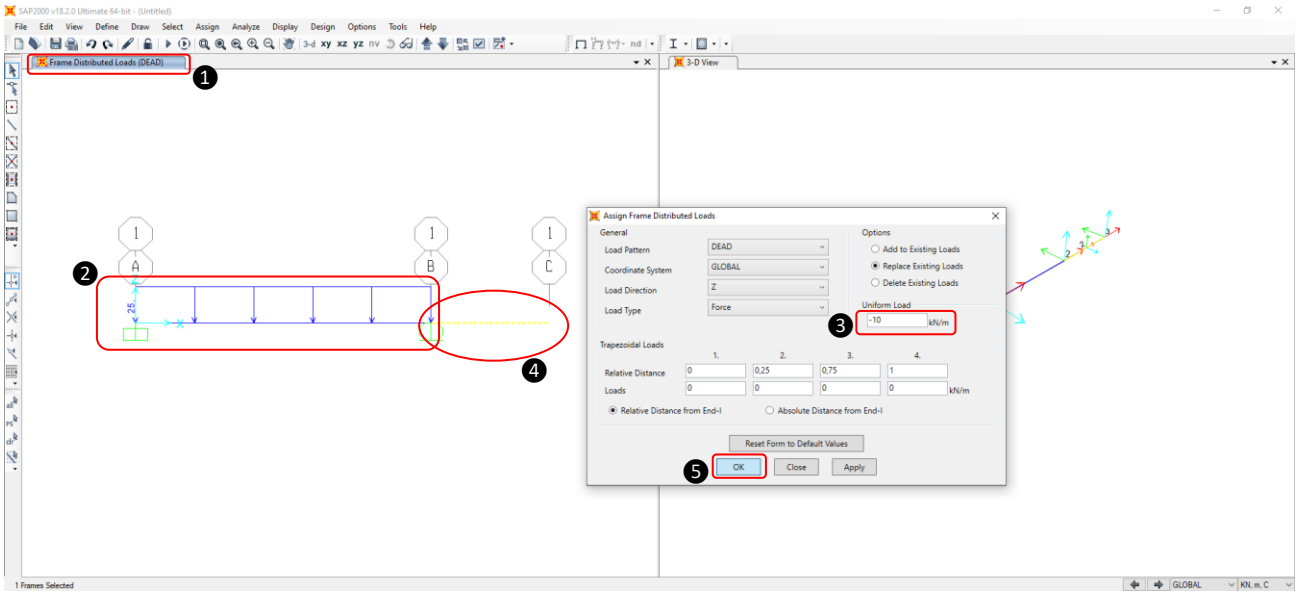
Pomembno je vedeti, da se vse tri naštete možnosti nanašajo samo na izbrani obtežni vzorec (*Load Pattern*). Če na primer izberemo *delete*, bodo izbrisane samo obtežbe iz trenutno izbranega obtežnega vzorca, druge obtežbe pa bodo ostale na elementu. Ker končnemu elementu še nismo podali nobene obtežbe, lahko na seznamu izberemo tako možnost *Add to Existing Loads* kot tudi *Replace Existing Loads*.

V razdelku *Uniform Load* vnesemo vrednost –25 (Slika 1.44 – ❷). Ker obtežba deluje v nasprotni smeri izbrane globalne koordinatne osi *Z*, moramo dodati še ustrezni predznak (–). Na razpolago je še razdelek *Trapezoidal Loads* (Slika 1.44 – ❸), ki je namenjen za primer morebitne odsekovno trapezne obtežbe (vrednosti obremenitev lahko vpišemo za največ štiri lokacije po elementu), ki se prištejejo vrednosti enakomerne obtežbe. Ta razdelek lahko pustimo (tako kot je predefinirano) z ničnimi vrednostmi obtežb, ker smo celotno obtežbo že upoštevali v razdelku *Uniform Load*. Označimo prvi končni element (ko kliknemo nanj, se obarva rumeno), na katerega želimo nanesti obtežbo (Slika 1.44 – ❹). Število označenih končnih elementov lahko preverimo tudi v levem spodnjem kotu okna, kjer se izpiše *1 Frames Selected* (Slika 1.44 – ❺). Na koncu vse skupaj potrdimo s klikom na *Apply* (Slika 1.44 – ❻).



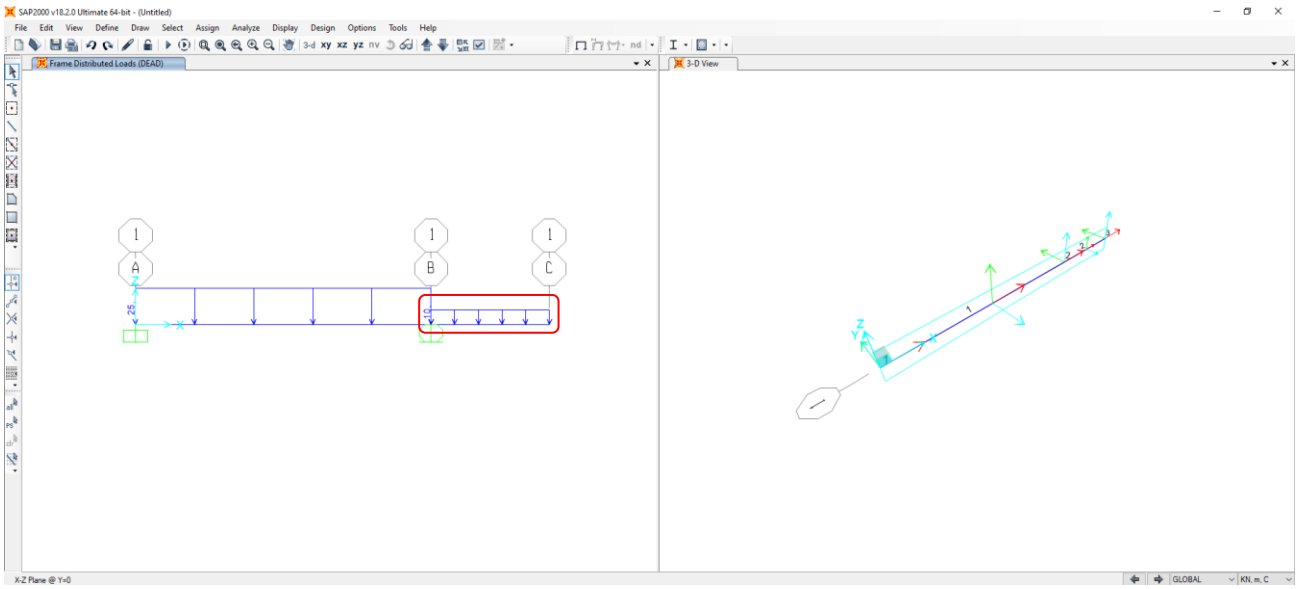
Slika 1.44: Definiranje enakomerne zvezne obtežbe za prvi končni element

S klikom na *Apply* se na označenem prvem končnem elementu v aktivnem pogledu *X–Z* (Slika 1.45 – ❶) izriše enakomerna zvezna obtežba z ustrezno smerjo (Slika 1.45 – ❷). Za določitev obtežbe drugega končnega elementa v razdelek *Uniform Load* namesto vrednosti obtežbe –25 vpišemo tokrat –10 (Slika 1.45 – ❸). Označimo drugi končni element (Slika 1.45 – ❹) in ga potrdimo s klikom na *OK* (Slika 1.45 – ❺).



Slika 1.45: Izris enakomerne zvezne obtežbe na prvem končnem elementu in definiranje enakomerne zvezne obtežbe za drugi končni element

Hkrati se okno *Assign Frame Distributed Loads* zapre, v označenem (aktivnem) pogledu *X–Z* pa se še na drugem končnem elementu izriše enakomerna obtežba (Slika 1.46).

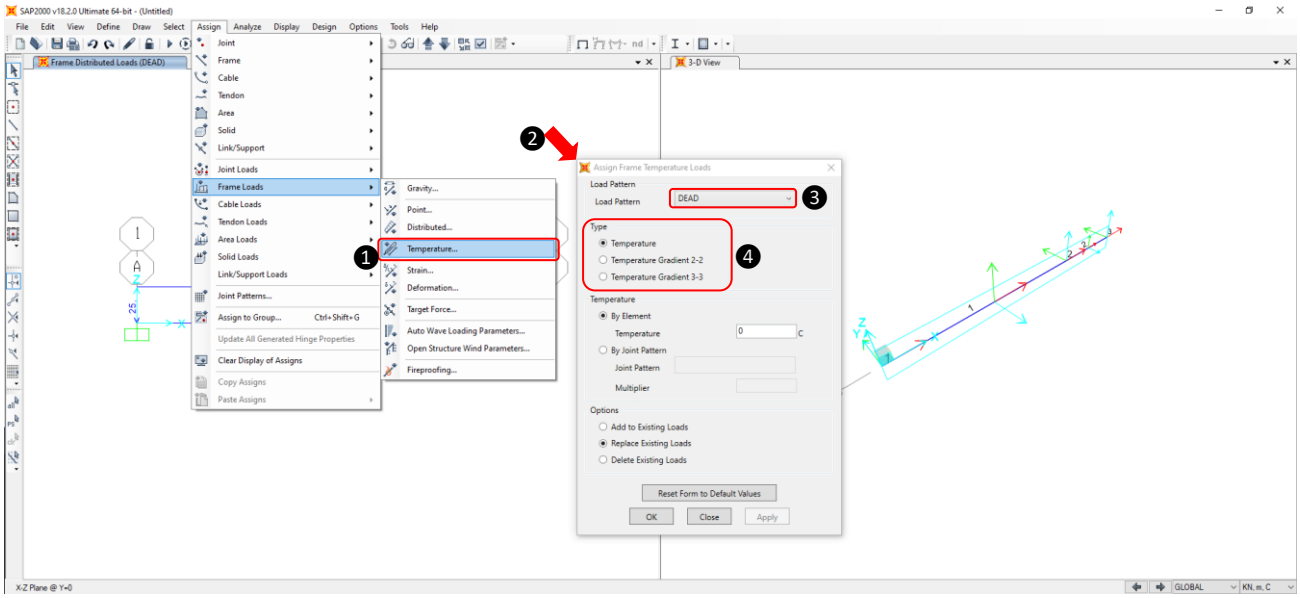


Slika 1.46: Izris enakomerne zvezne obtežbe na drugem končnem elementu

Oba končna elementa sta po celotni dolžini obremenjena še z enakomerno temperaturno obtežbo. Razlika med prirastkoma temperature na spodnji in zgornji strani po celotni osi nosilca ne vpliva le na osne deformacije zaradi povprečne spremembe temperature v prerezu, temveč tudi na upogibne deformacije zaradi temperaturnega gradienta, ki se linearno spreminja po višini prereza. Iz tega razloga moramo temperaturno obtežbo na oba končna elementa podati v dveh delih.

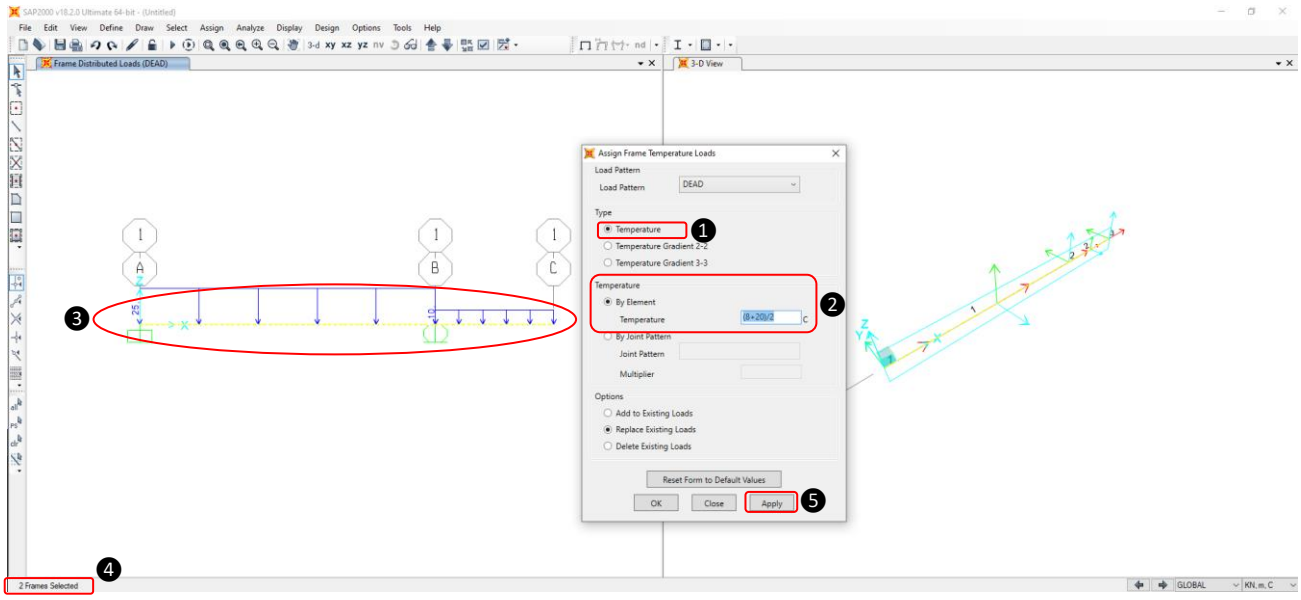
Za podajanje temperaturne obtežbe po celotni dolžini končnega elementa v glavnem meniju kliknemo na *Assign*, se pomaknemo na *Frame Loads* in naprej na *Temperature* ... (Slika 1.47 – ❶). Odpre se okno *Assign Frame Temperature Loads* (Slika 1.47 – ❷). V razdelku *Load Pattern* na vrhu je že nastavljen (edini) obtežni primer *DEAD* (Slika 1.47 – ❸). V drugem razdelku *Type* na

seznamu izbiramo med povprečno spremembo temperature (*Temperature*) in temperaturnim gradientom za obe smeri prereza (*Temperature Gradient 2-2* in *Temperature Gradient 3-3*) (Slika 1.47 – ❹).



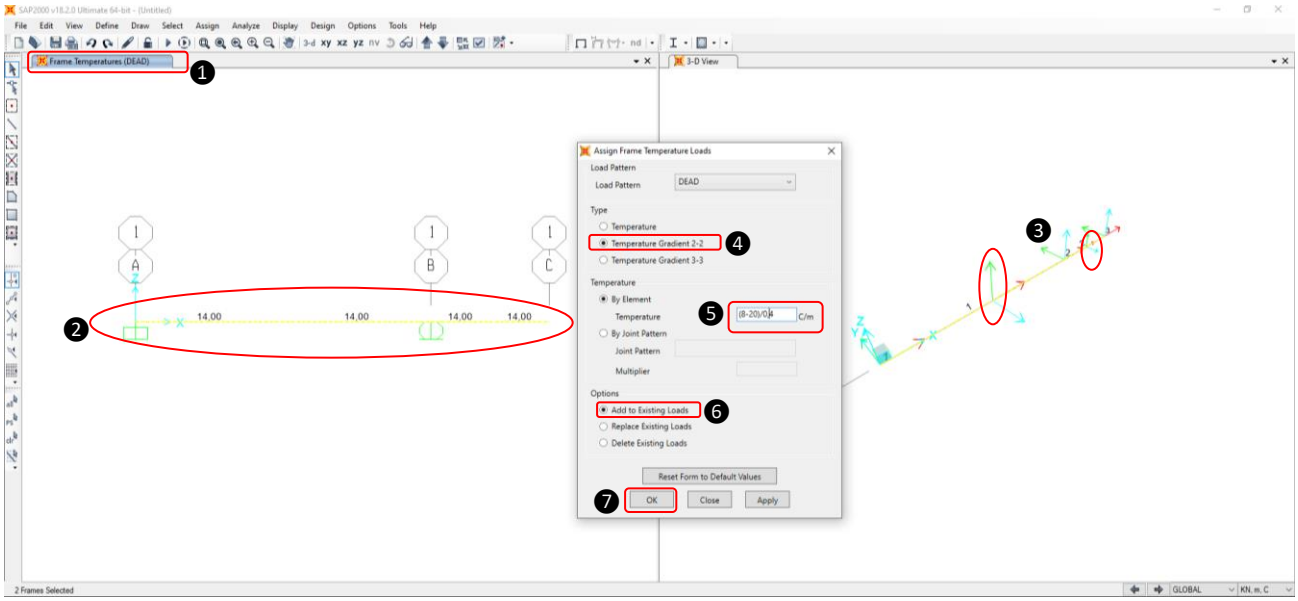
Slika 1.47: Definiranje temperaturne obtežbe

Povprečno spremembo temperature podamo tako, da v razdelku *Type* na seznamu pustimo označeno *Temperature* (Slika 1.48 – ❶). Nato se pomaknemo v razdelek *Temperature*, v katerega lahko vpišemo kar izraz (8 + 20) / 2 (Slika 1.48 – ❷), ki predstavlja povprečje zgornje in spodnje vrednosti temperature prereza končnega elementa. Program zna sam preračunati preproste izraze in v danem primeru dobi vrednost 14 (°C). Namesto izraza lahko vrednost tudi vpišemo kar neposredno v okno. Označimo še oba končna elementa, ki se obarvata rumeno (Slika 1.48 – ❸). Število označenih elementov lahko hitro preverimo v levem spodnjem kotu, kjer se izpiše *2 Frames Selected* (Slika 1.48 – ❹). Na koncu vse skupaj potrdimo s klikom na *Apply* (Slika 1.48 – ❺).

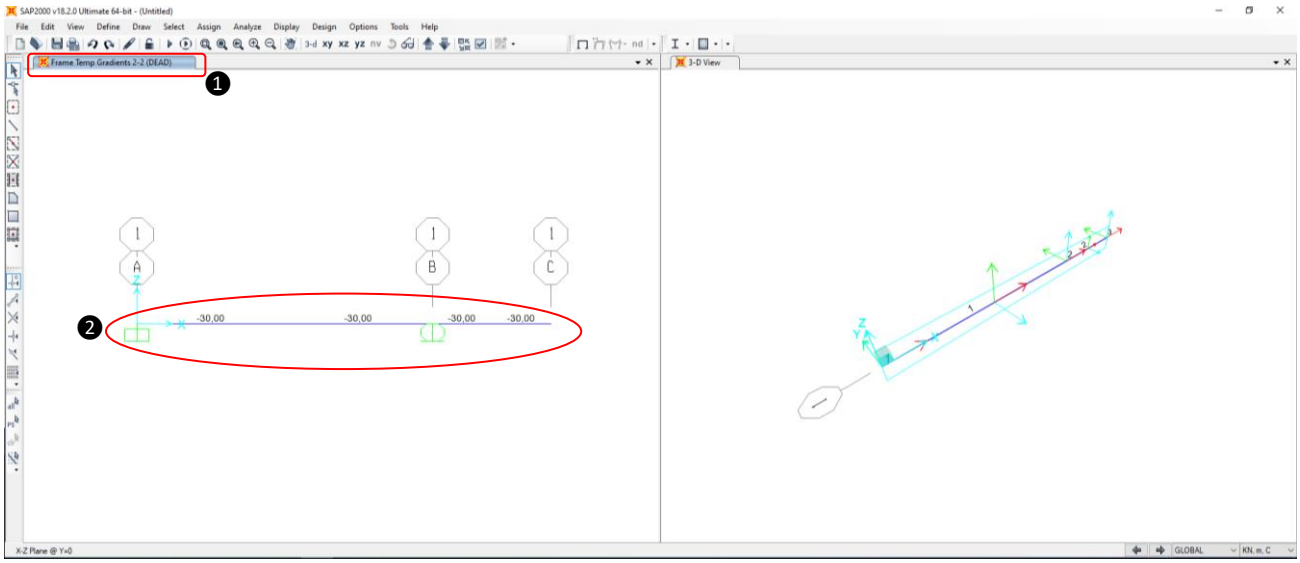


Slika 1.48: Definiranje povprečne temperaturne obtežbe

V aktivnem (levem) oknu (Slika 1.49 – ❶) se na obeh končnih elementih namesto enakomerne zvezne obtežbe izriše povprečna temperaturna obtežba z izračunano povprečno vrednostjo spremembe temperature 14 °C (Slika 1.49 – ❷). Za določitev temperaturnega gradienta v smeri 2 (→) lokalnega koordinatnega sistema (Slika 1.49 – ❸) obeh končnih elementov pa v razdelku *Type* na seznamu izberemo *Temperature Gradient 2-2* (Slika 1.49 – ❹). Nato v razdelku *Temperature* v prazno okno vpišemo temperaturni gradient, ki predstavlja razliko med temperaturnima spremembama na zgornji in spodnji ploskvi, deljeno z višino. Tako vpišemo izraz (8 – 20) / 0,4, ki ga program sam preračuna v –30 (Slika 1.49 – ❺). Tudi tukaj lahko v okno kar neposredno vpišemo vrednost namesto izraza. Prav tako moramo v razdelku *Options* zdaj na seznamu namesto *Replace Existing Loads* obvezno označiti *Add to Existing Loads*, da se obtežba temperaturnega gradienta prišteje k že obstoječi povprečni temperaturni obtežbi (Slika 1.49 – ❻). Ponovno označimo oba končna elementa in kliknemo na *OK* (Slika 1.49 – ❼).



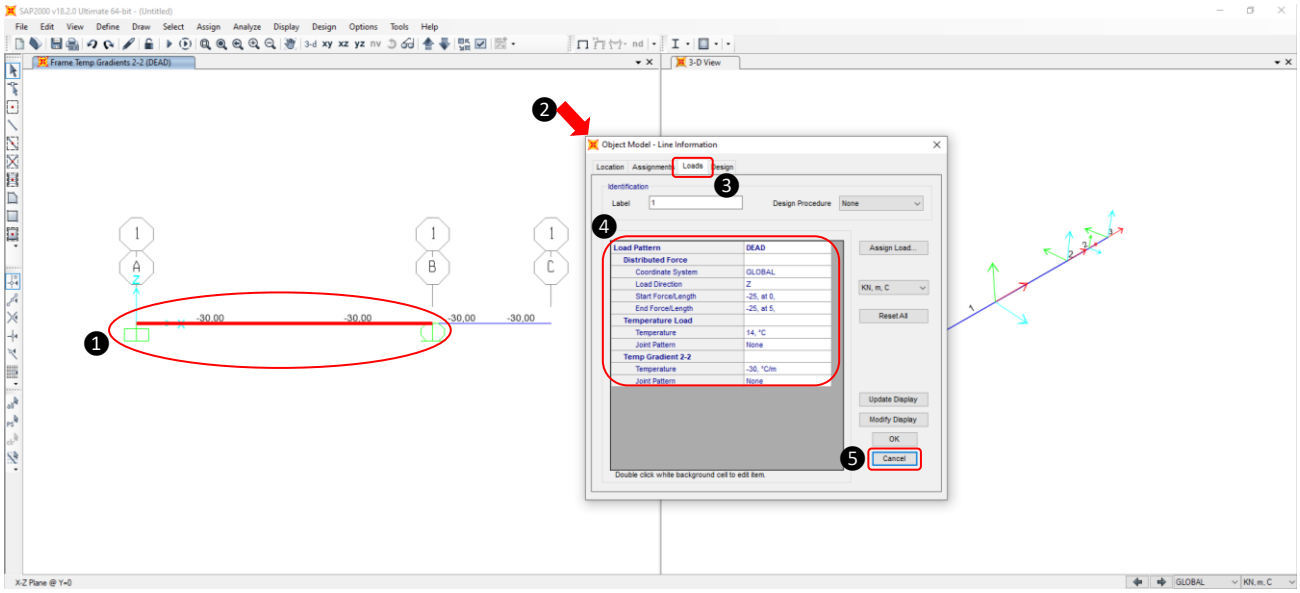
Slika 1.49: Definiranje obtežbe zaradi temperaturnega gradienta



Slika 1.50: Izris obtežbe zaradi temperaturnega gradienta

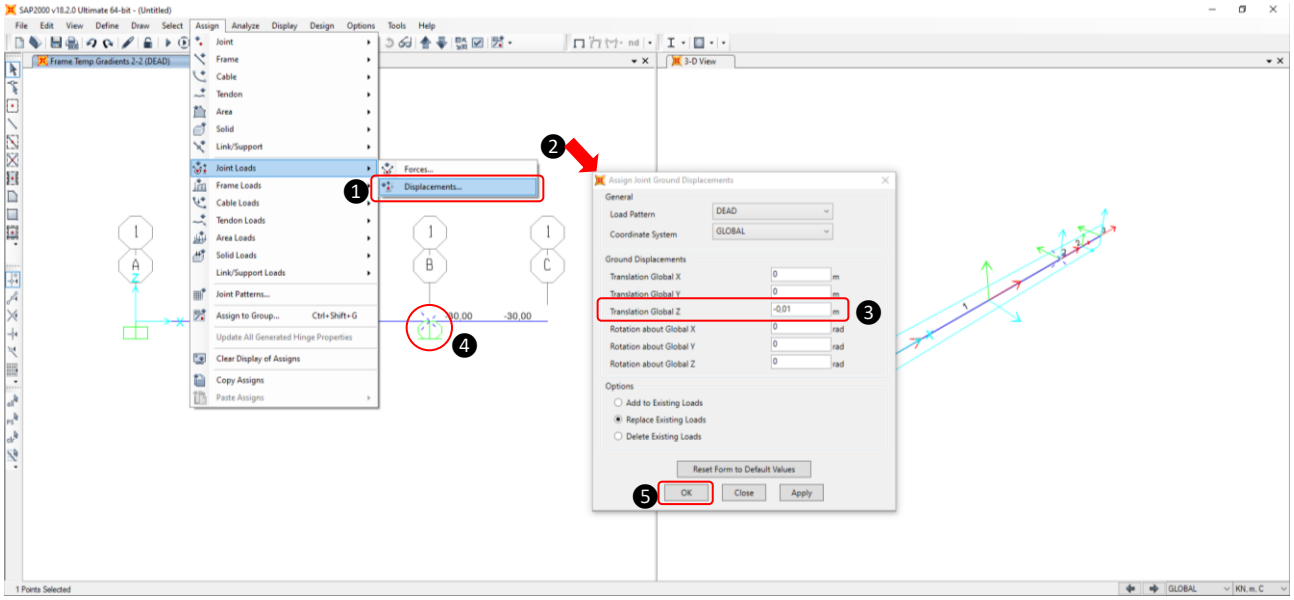
Okno *Assign Frame Temperature Loads* se zapre, hkrati pa se v aktivnem (levem) oknu (Slika 1.50 – ❶) na obeh končnih elementih izpiše temperaturna obtežba z vrednostjo temperaturnega gradienta -30.00 (Slika 1.50 – ❷).

Če želimo preveriti, ali so vse vrednosti različnih obtežb po končnem elementu ustrezno vnesene, se s kazalcem pomaknemo na na primer prvi končni element in kliknemo na desni gumb miške (Slika 1.51 – ❶). Odpre se okno *Object Model – Line Information* (Slika 1.51 – ❷), v katerem so zbrane vse informacije o izbranem elementu, kot so: lokacija, material, geometrijske karakteristike, obtežba itd. Za kontrolo obtežb kliknemo na *Loads* (Slika 1.51 – ❸) in na seznamu se izpišejo vse podane obtežbe (Slika 1.51 – ❹). Ko se prepričamo, da so vnesene obtežbe ustrezne, lahko okno brez sprememb zapremo s klikom na *Cancel* (Slika 1.51 – ❺). Če bi bile vrednosti napačne, bi jih lahko na seznamu (z dvojnim klikom na levi gumb miške) tudi popravili.



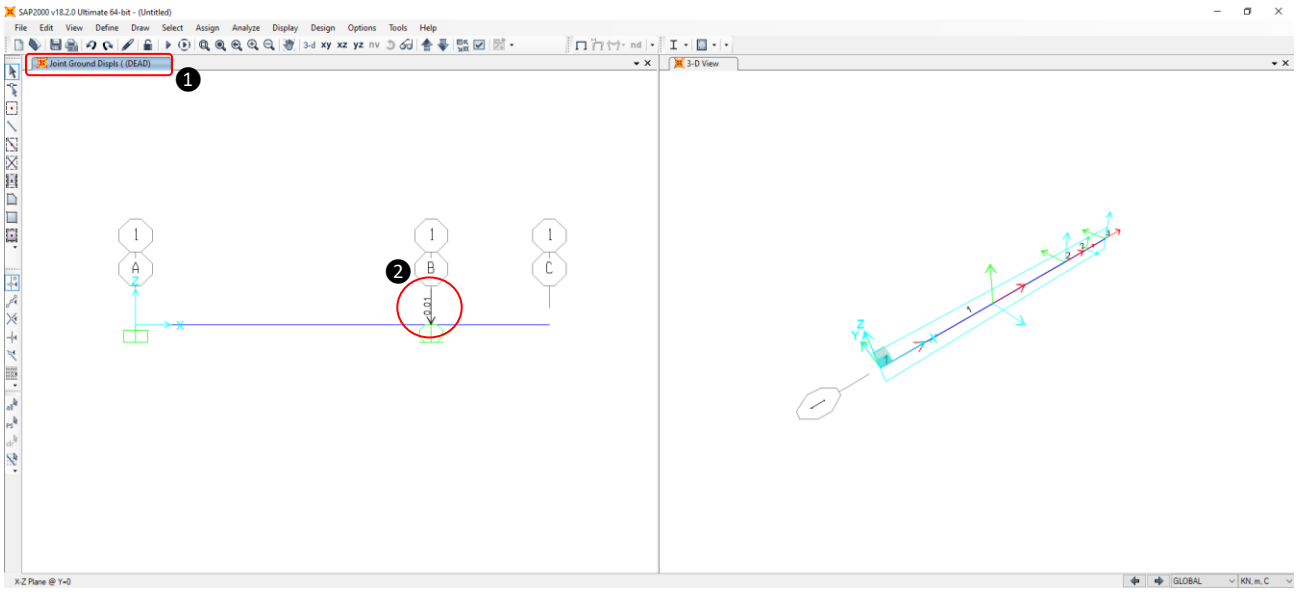
Slika 1.51: Informacije o izbranem končnem elementu

Kot obremenitev, ki jo moramo še podati, nastopa tudi vertikalni pomik desne podpore. V glavnem meniju kliknemo na *Assign* in se s kazalcem pomaknemo na *Joint Loads* in nato še na *Displacements* ... ter potrdimo s klikom (Slika 1.52 – ❶). Odpre se okno *Assign Joint Ground Displacements* (Slika 1.52 – ❷), v katerem lahko podamo morebitne neničelne vozliščne zasuke in pomike tal za vse tri možne smeri. Ker bomo vertikalni pomik podpore podali kar v globalnem koordinatnem sistemu (*GLOBAL*), se v razdelku *Ground Displacements* na seznamu pomaknemo na *Traslation Global Z* in glede na negativno smer delovanja pomika (v metrih) vpišemo –0,01 (Slika 1.52 – ❸, glej ***Opomba 4***, str. 18). Označimo še vozlišče, na katerem želimo izvesti pomik (Slika 1.52 – ❹), in kliknemo na *OK* (Slika 1.52 – ❺).



Slika 1.52: Definiranje vertikalnega pomika podpore

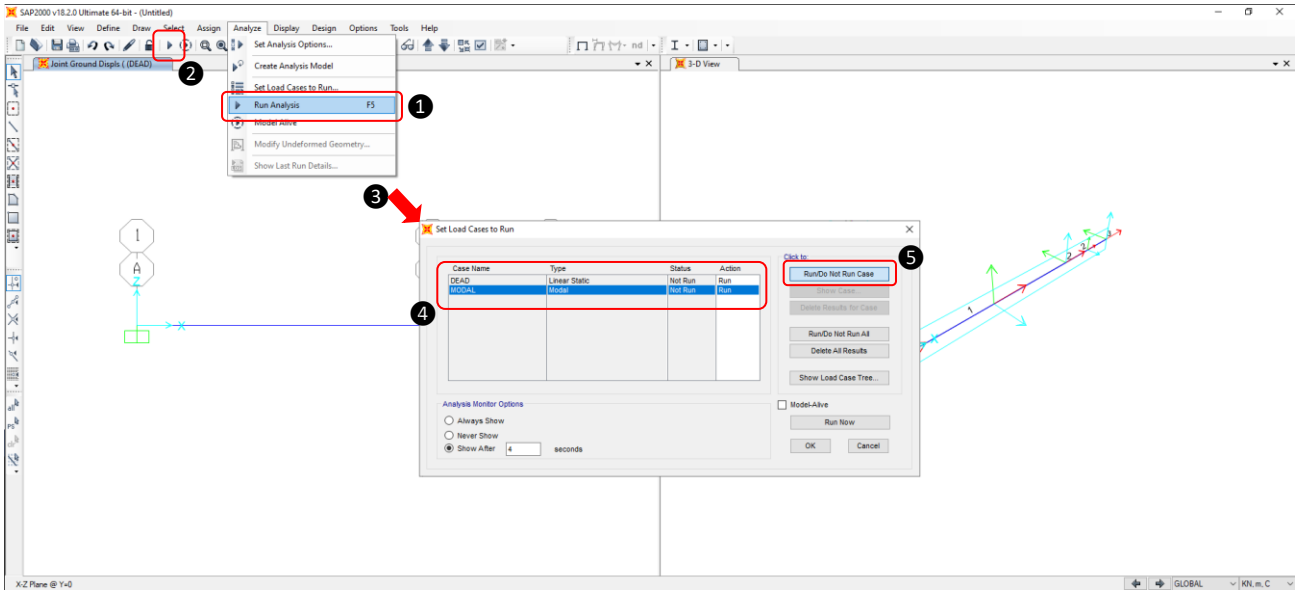
Okno *Assign Joint Ground Displacements* se zapre, hkrati pa se (na označenem vozlišču) v aktivnem (levem) oknu (Slika 1.53 – ❶) v obliki puščice izpišeta smer in velikost pomika podpore (Slika 1.53 – ❷).



Slika 1.53: Izris vertikalnega pomika pomične podpore

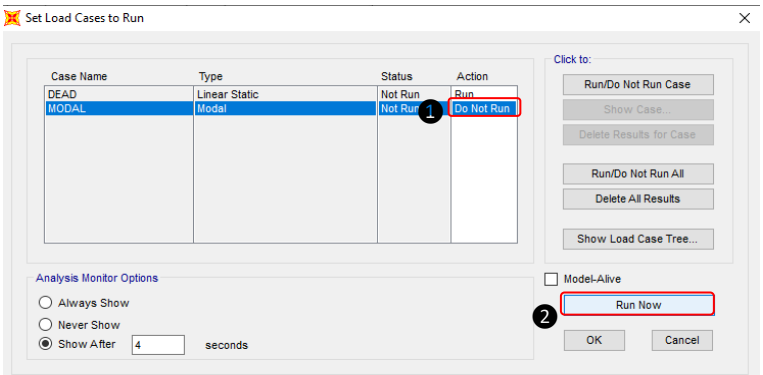
1.3 Analiza podanih podatkov

Zdaj, ko smo definirali vsa vozlišča, končne elemente, robne pogoje in obtežbe, lahko izvedemo analizo tako, da v glavnem meniju kliknemo na *Analyze* in se pomaknemo na *Run Analysis* (*F5*) ter to potrdimo s klikom (Slika 1.54 – ❶). Dodatna enakovredna možnost je, da (namesto v meniju) v orodni vrstici kliknemo na ▶ (Slika 1.54 – ❷). Odpre se okno *Set Load Cases to Run* (Slika 1.54 – ❸), v katerem se pojavijo vsi definirani obtežni primeri. Za ta primer sta že sistemsko predefinirana dva obtežna primera za dve različni analizi, in sicer za linearno statično analizo z imenom *DEAD* in modalno analizo z imenom *MODAL* (Slika 1.54 – ❹). Slednjo, ki je ne bomo obravnavali, preprosto z levim klikom označimo (obarva se modro) in nato kliknemo še na *Run/Do Not Run Case* (Slika 1.54 – ❺), s čimer to možnost deaktiviramo.



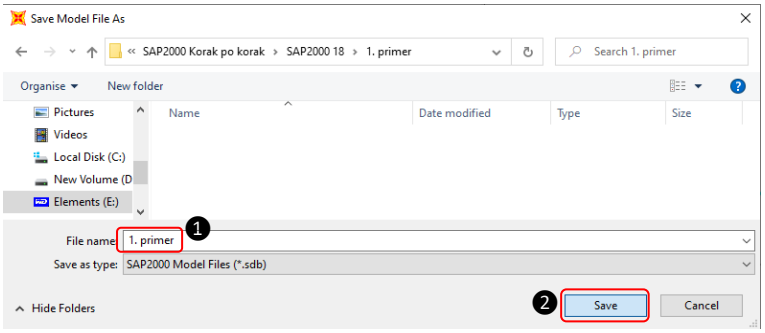
Slika 1.54: Nastavitve obtežnih primerov za zagon analize

Pri obtežnem primeru z imenom *MODAL* se v četrtem stolpcu (*Action*) namesto *Run* izpiše *Do Not Run* (Slika 1.55 – ❶), kar pomeni, da program te analize ne bo izvedel. Za izvedbo linearne statične analize edinega obtežnega primera z imenom *DEAD* kliknemo še na *Run Now* (Slika 1.55 – ❷).



Slika 1.55: Nastavitve obtežnih primerov za zagon analize

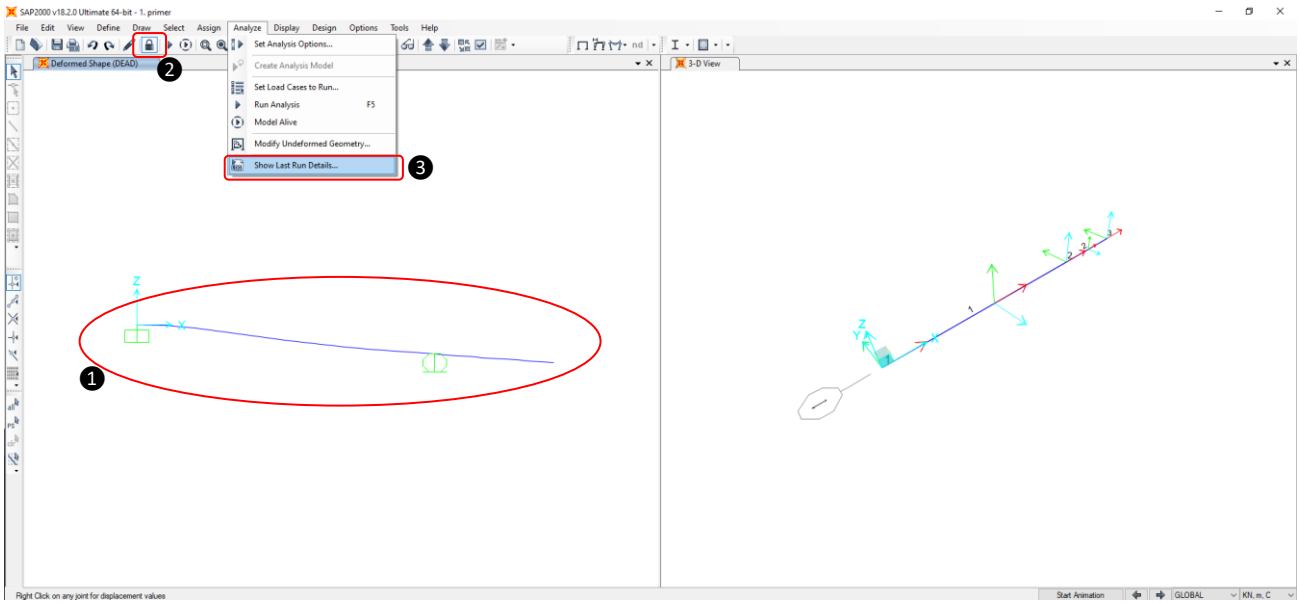
Če dokumenta še nismo shranili, se najprej pojavi okno *Save Model File As*. Znotraj okna poiščemo lokacijo na disku in izberemo ime primera, na primer *primer 1* (Slika 1.56 – ❶, glej ***Opomba 7***), ter shranimo s klikom na *Save* (Slika 1.56 – ❷).



Slika 1.56: Shranjevanje datoteke na disk

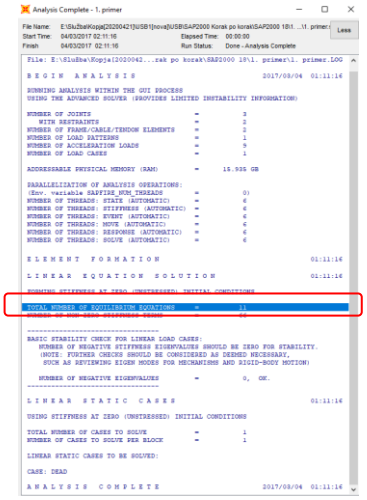
Opomba 7: Pri izbiri imena dokumenta in tudi map, v katerih se dokument nahaja, se uporaba šumnikov strogo odsvetuje, saj se lahko pojavijo problemi pri izvajanju analize. Program sam ne opozori na neustrezno uporabo šumnikov!

Nato se zažene analiza in po nekaj sekundah se (ne glede na to, katero okno imamo aktivirano) samo v levem oknu izriše konstrukcija v deformirani legi (Slika 1.57 – ❶). Prav tako se model zaklene in v orodni vrstici se namesto odklenjene ključavnice 🔓 pojavi ikona zaklenjene ključavnice 🔒 (Slika 1.57 – ❷). Tako podatkov o konstrukciji ni več možno spreminjati. Za prikaz podrobnosti izvedene analize v glavnem meniju kliknemo na *Analyse* in izberemo *Show Last Run Details* ... (Slika 1.57 – ❸).



Slika 1.57: Deformirana lega konstrukcije

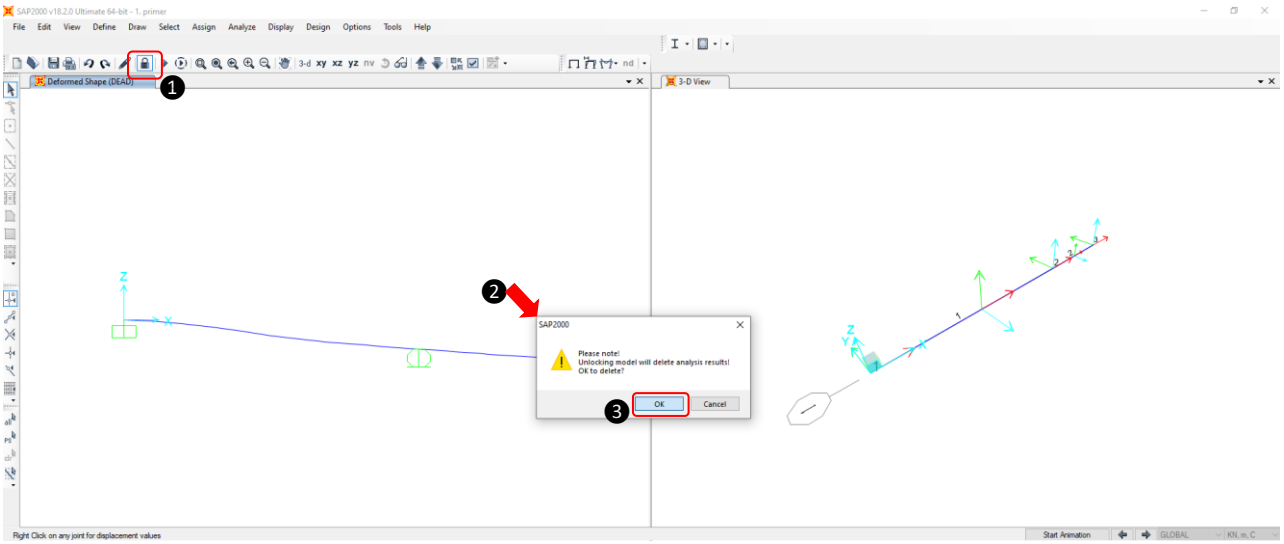
V novem oknu lahko poleg vseh podrobnih informacij opazimo, da je bilo za to analizo rešenih 11 linearnih ravnotežnih enačb za določitev vseh (11) neznanih pomikov in zasukov (Slika 1.58).



Slika 1.58: Podrobnosti analize

Vsako od 3 vozlišč ima v prostoru 6 prostostnih stopenj, in če odštejemo 6 preprečenih pomikov in zasukov v levi podpori ter 1 znani (0,01 m) vertikalni pomik v desni podpori (od skupno 18 prostostnih stopenj), potem imamo vsega skupaj 11 neznanih pomikov in zasukov (prostostnih stopenj) in posledično tudi enačb. Število prostostnih stopenj lahko zaradi ravninskega modela dodatno zmanjšamo, če pred zagonom analize upoštevamo samo bistvene prostostne stopnje.

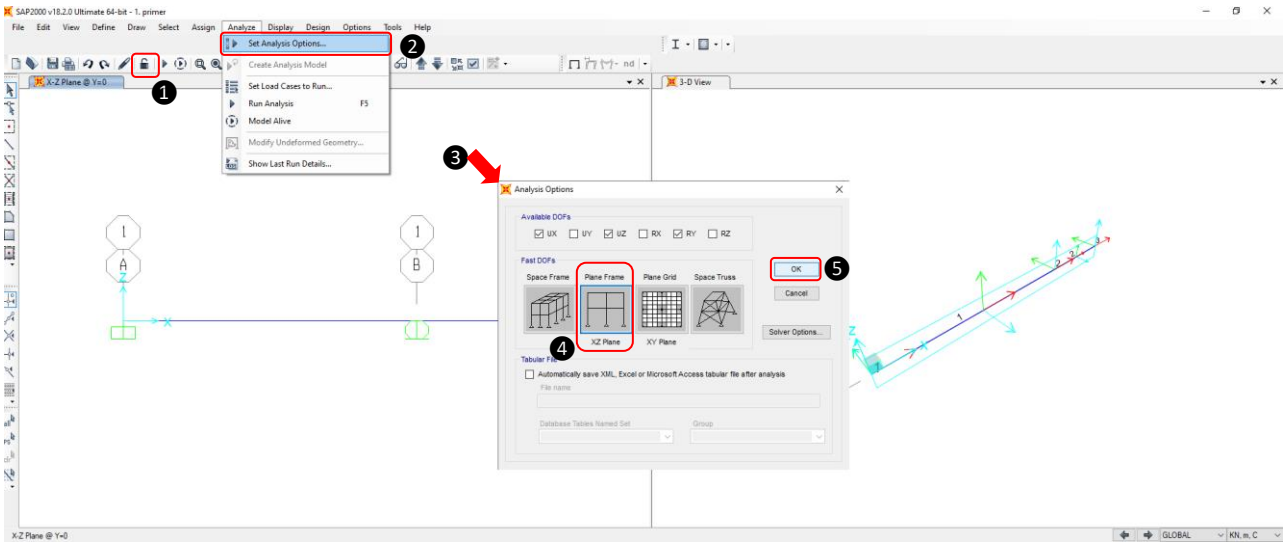
Če to želimo narediti, je najprej treba odkleniti model s klikom na ikono zaklenjene ključavnice (Slika 1.59 – ❶). Prikaže se okno *SAP2000* (Slika 1.59 – ❷), ki nas opozarja, da se bodo vsi rezultati analize s klikom na *OK* izbrisali (Slika 1.59 – ❸).



Slika 1.59: Odklepanje modela

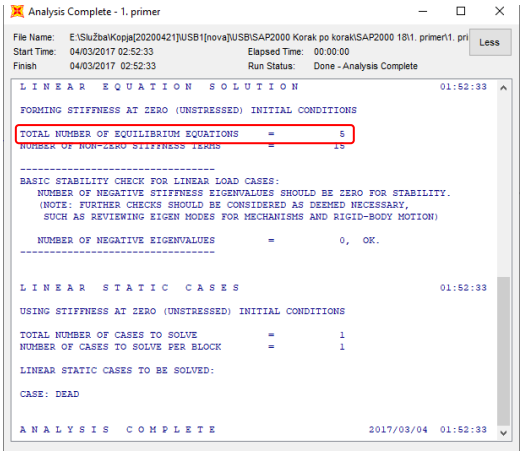
Ob kliku na *OK* se namesto zaklenjene ključavnice v orodni vrstici ponovno prikaže ikona odklenjene ključavnice (Slika 1.60 – ❶), ki označuje, da je model odklenjen in je omogočeno spreminjanje. Za nastavitve prostostnih stopenj v analizi v glavnem meniju kliknemo na *Analyse* in izberemo *Set Analysis Options* ... (Slika 1.60 – ❷). Odpre se novo okno *Analysis Options* (Slika 1.60 – ❸) in v razdelku *Available DOFs* uporabnik izbere tiste prostostne stopnje, za katere meni, da so bistvene za analizo. Za analizo ravninske (v ravnini *X*–*Z*) konstrukcije označimo pomika v globalnih smereh *X* in *Z* ter zasuk okoli osi *Y*. Enakovredna (a hitrejša) pot je, da kar enostavno v

hitrem meniju (*Fast DOFs*) označimo ikono ravninskega okvirja (*XZ Plane*) in nam program sam izbere bistvene (enake) prostostne stopnje (Slika 1.60 – ❹). Sicer so v hitrem meniju na izbiro še prostorski okvir (upoštevane so vse prostostne stopnje), ravninska mreža (upoštevani so pomik v smeri *Z* in zasuka okoli osi *Y* in *X*) in prostorsko paličje (upoštevani so vsi pomiki). Vse skupaj potrdimo s klikom na *OK* (Slika 1.60 – ❺).



Slika 1.60: Nastavitve analize

Analizo ponovno zaženemo z ukazom in nato še z *Run Now*. Če ponovno odpremo okno s podrobnostmi analize, lahko vidimo, da se je število ravnotežnih enačb iz 11 zmanjšalo na 5 (Slika 1.61). V analizi ravninskega okvirja ima zdaj vsako vozlišče (namesto šestih) 3 prostostne stopnje, kar nanese skupaj 9 prostostnih stopenj. Ko odštejemo preprečena pomika in zasuk v levi podpori ter znani vertikalni pomik v desni podpori, dobimo skupaj 5 neznanih prostostnih stopenj. Po pregledu podrobnosti analize okno zapremo s klikom na križec v desnem zgornjem kotu okna.



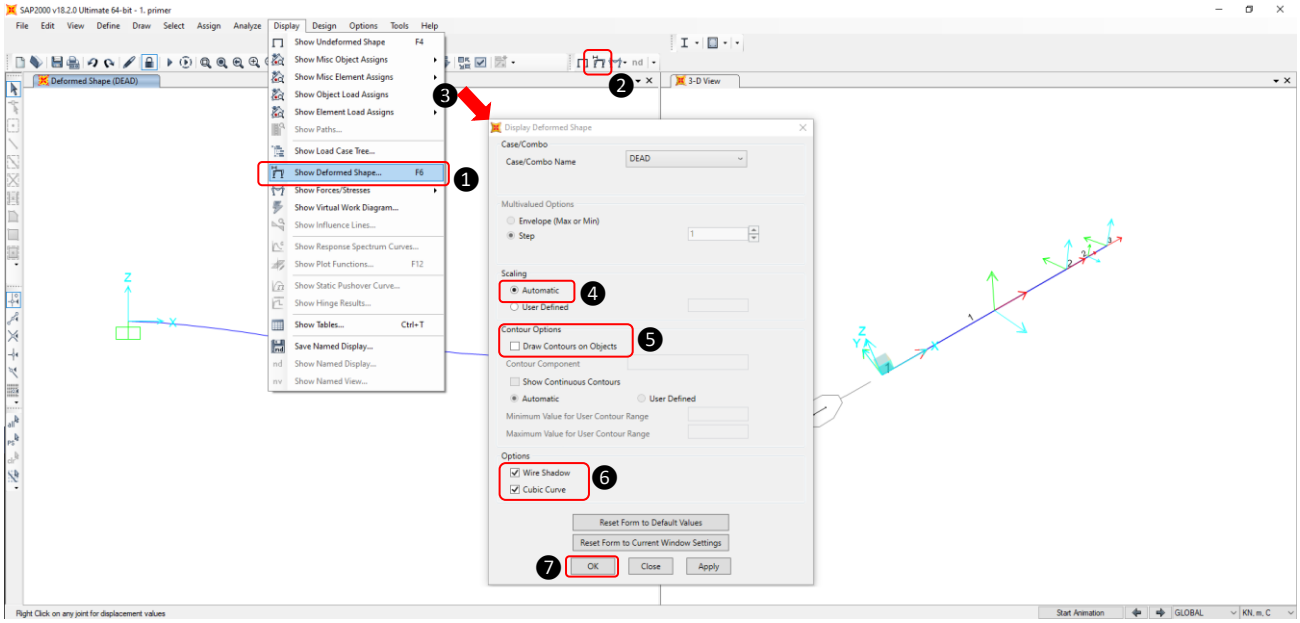
Slika 1.61: Podrobnosti analize

Opomba 8: *Pri majhnem številu enačb je zmanjšanje števila prostostnih stopenj nepotrebno, saj zgolj neopazno vpliva na čas trajanja analize. Je pa neupoštevanje nepotrebnih prostostnih stopenj zelo pomembno pri kompleksnejših analizah (zlasti nelinearnih) z ogromnim številom prostostnih stopenj in različnih obtežnih primerov, kjer lahko z zmanjšanjem nepotrebnih prostostnih stopenj pomembno vplivamo na čas procesiranja in večjo preglednost rezultatov.*

1.4 Poprocesiranje

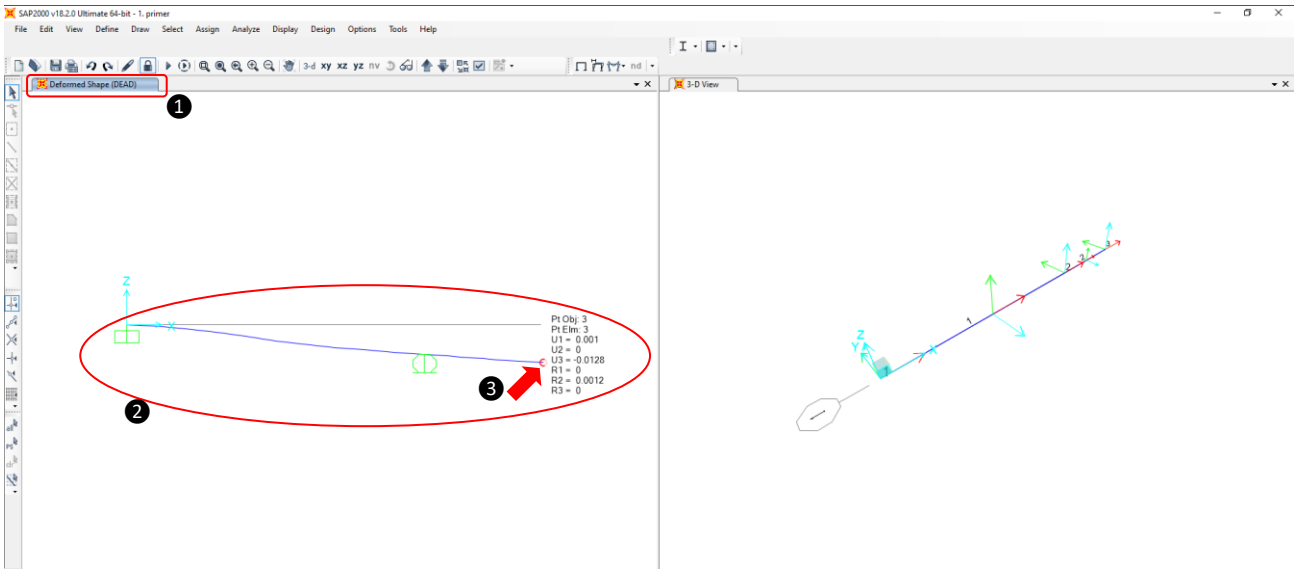
– Grafični prikaz deformirane lege konstrukcije

Ker je prikazana le deformirana lega konstrukcije, je hkrati smiselno za primerjavo prikazati tudi začetno pozicijo. V glavnem meniju kliknemo na *Display* in nato še na *Show Deformed Shape ...* (F6) (Slika 1.62 – ❶). V orodni vrstici imamo še enakovredno in hitrejšo možnost s klikom na ikono (Slika 1.62 – ❷). Nato se odpre okno *Display Deformed Shape* (Slika 1.62 – ❸). V razdelku *Scaling* smo na seznamu izbrali *Automatic* za samodejni izris upogibnice konstrukcije (Slika 1.62 – ❹). Če s samodejnim izrisom nismo zadovoljni, lahko sami določimo primerno velikost upogibnice, tako da namesto *Automatic* izberemo *User Defined*. V razdelku *Contour Options*, ki ga bomo preskočili, ima uporabnik (s klikom na *Draw Contours on Object*) možnost, da se na upogibnici z barvno lestvico izriše velikost izbranega pomika (Slika 1.62 – ❺). V spodnjem razdelku *Options* je možnost *Cubic Curve* že predefinirano označena. Ta omogoča, da se upogibnica (namesto z linearno interpolacijo pomikov med vozlišči) izriše v obliki kubičnega polinoma. V tem primeru je kubični polinom kakovostnejša aproksimacija, a vseeno ne predstavlja povsem točne linije, saj je iz mehanike linijskih elementov znano, da je za primer enakomerne zvezne obtežbe in temperaturnega gradienta točna upogibnica elementa s konstantnim prerezom polinom četrte stopnje. Označimo še *Wire Shadow*, ki poleg deformirane lege omogoča prikaz začetne lege konstrukcije (Slika 1.62 – ❻). Vse skupaj potrdimo s klikom na *OK* (Slika 1.62 – ❼).



Slika 1.62: Nastavitve prikaza deformirane in nedeformirane lege konstrukcije

V aktivnem levem oknu (Slika 1.63 – ❶) se poleg deformirane lege konstrukcije v sivi barvi s tanjšo linijo izriše tudi njena začetna lega (Slika 1.63 – ❷). Če se zdaj na deformirani konstrukciji v levem oknu s kazalcem pomaknemo na eno od vozlišč, na primer vozlišče C, se v izbranih enotah izpišejo vrednosti vseh pomikov (v metrih) in zasukov (v radianih) (Slika 1.63 – ❸).

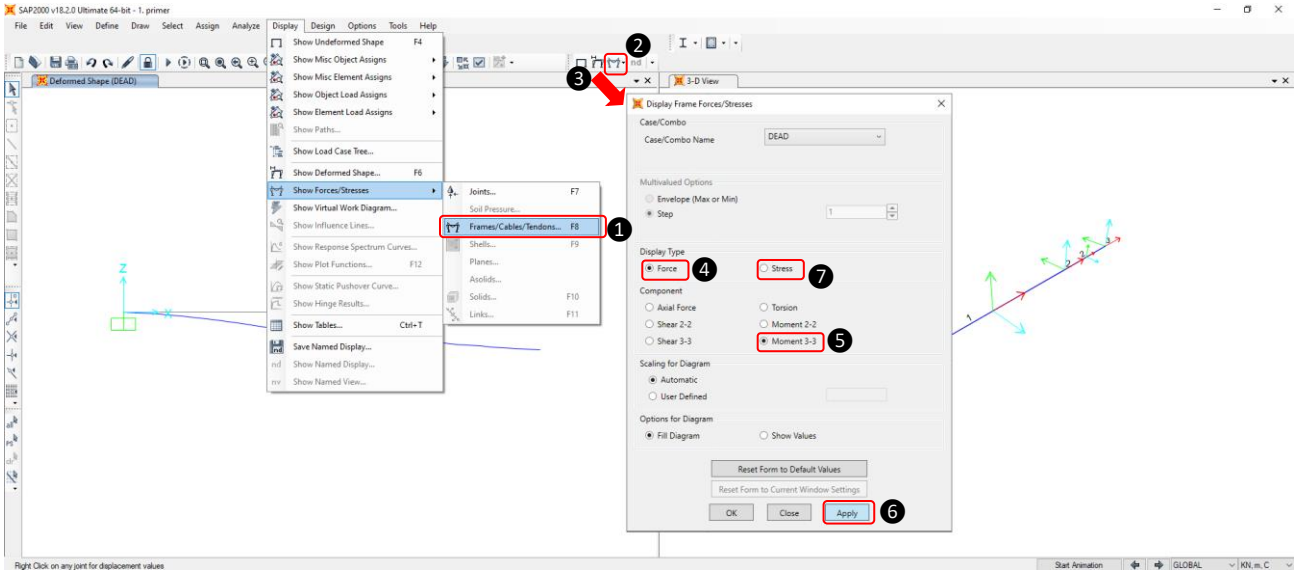


Slika 1.63: Prikaz začetne pozicije in deformirane lege konstrukcije

– Grafični prikaz notranjih statičnih količin

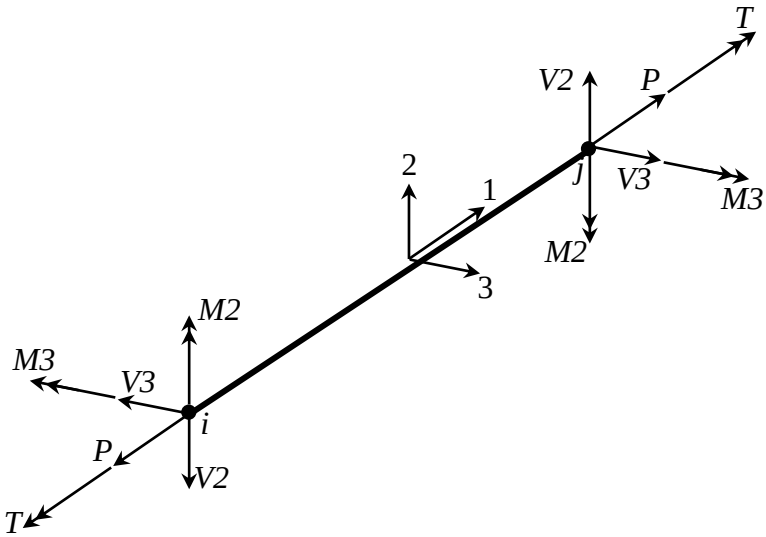
Za izris diagramov notranjih statičnih količin v glavnem meniju kliknemo na *Display* in se pomaknemo naprej na *Show Forces/Stresses* ter nato še na *Frames/Cables/Tendons* ... (F8) in izbiro potrdimo s klikom (Slika 1.64 – ❶). Enakovredna hitrejša možnost je, da v orodni vrstici kliknemo na in na seznamu izberemo *Frames/Cables/Tendons* ... (Slika 1.64 – ❷). Odpre se okno *Display Frame Forces/Stresses* (Slika 1.64 – ❸). Če okno v pogledu *X–Z* prekriva konstrukcijo, ga lahko po potrebi premaknemo (glej ***Opomba 3***, str. 16) na primernejšo lokacijo. Ker nas zanima razporeditev notranjih sil in momentov (osnih sil, prečnih sil in upogibnih momentov) po konstrukciji, v razdelku *Display Type* izberemo *Force* (Slika 1.64 – ❹). V razdelku *Component* imamo na voljo 3 komponente notranjih sil (osna sila *P* – Axial force, prečna sila *V2* – *Shear 2-2* in prečna sila *V3* – *Shear 3-3*) in enako število notranjih momentov (torzijski moment *T* – *Torsion*, upogibni moment *M2* – *Moment 2-2* in upogibni moment *M3* – *Moment 3-3*). Ker je konstrukcija ravninska, ki ni torzijsko obremenjena, so (glede na lokalni koordinatni sistem končnih elementov) veličine *T*, *M2* in *V3* nič. Za izris upogibnih momentov *M3*, ki delujejo okoli osi 3, izberemo *Moment 3-3* (Slika 1.64 – ❺). Vse skupaj potrdimo s klikom na *Apply* (Slika 1.64 – ❻).

Opomba 9: *V primeru, da uporabnika zanima razporeditev notranjih napetosti, ki so na voljo v predefiniranih 9 lokacijah prereza, je treba v razdelku Display Type namesto Force označiti Stress* (Slika 1.64 – ❼). *V vsakem obravnavanem prerezu vzdolž celotne konstrukcije program izpiše vrednosti napetosti v 9 točkah (8 na robovih in 1 v težišču prereza). Izbiramo lahko med tremi komponentami napetosti, in sicer eno normalno v smeri (normale) prereza 1 in dvema strižnima v smereh 2 in 3 lokalnega koordinatnega sistema končnega elementa.*



Slika 1.64: Nastavitve izrisa diagrama upogibnih momentov

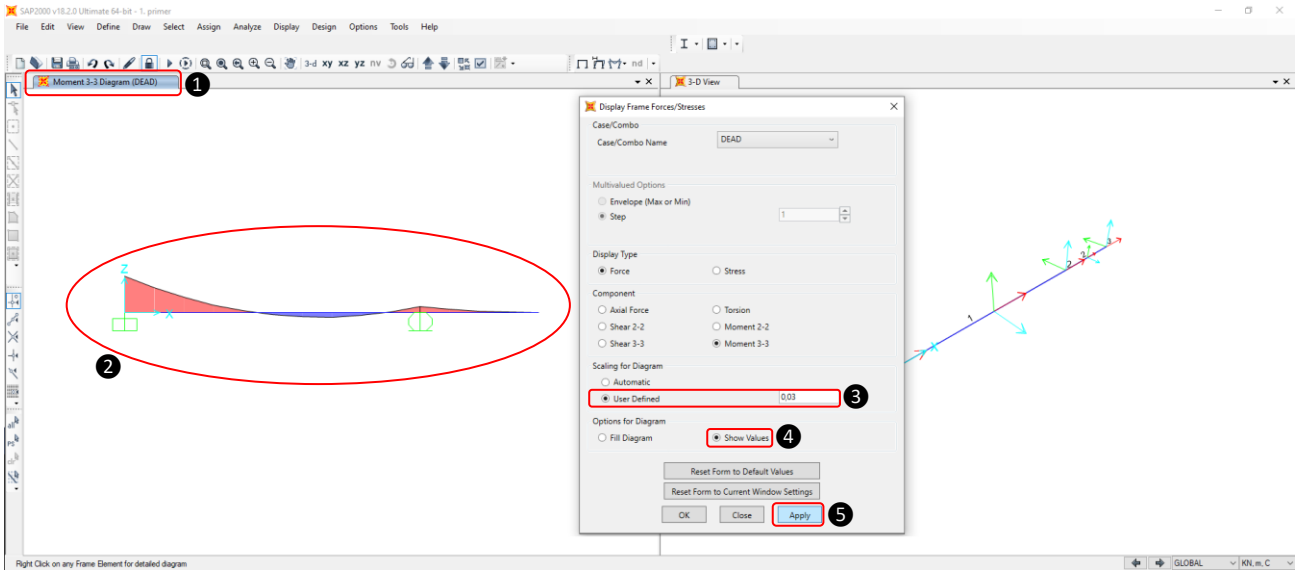
Opomba 10: *Z izjemo upogibnega momenta M2, ki je na desni strani končnega elementa v končnem vozlišču j kot pozitiven vektorsko definiran v nasprotni smeri lokalne osi 2, so vse ostale notranje statične količine (P, V2, V3, T in M2) vektorsko definirane kot pozitivne v smereh lokalnih osi končnega elementa. Leva stran končnega elementa (v vozlišču i) je uravnotežena z desno, kar pomeni, da so vse notranje statične količine na levi strani obratno usmerjene kot na desni strani* (Slika 1.65).



Slika 1.65: Pozitivno definirane notranje sile in momenti v obeh vozliščih končnega elementa

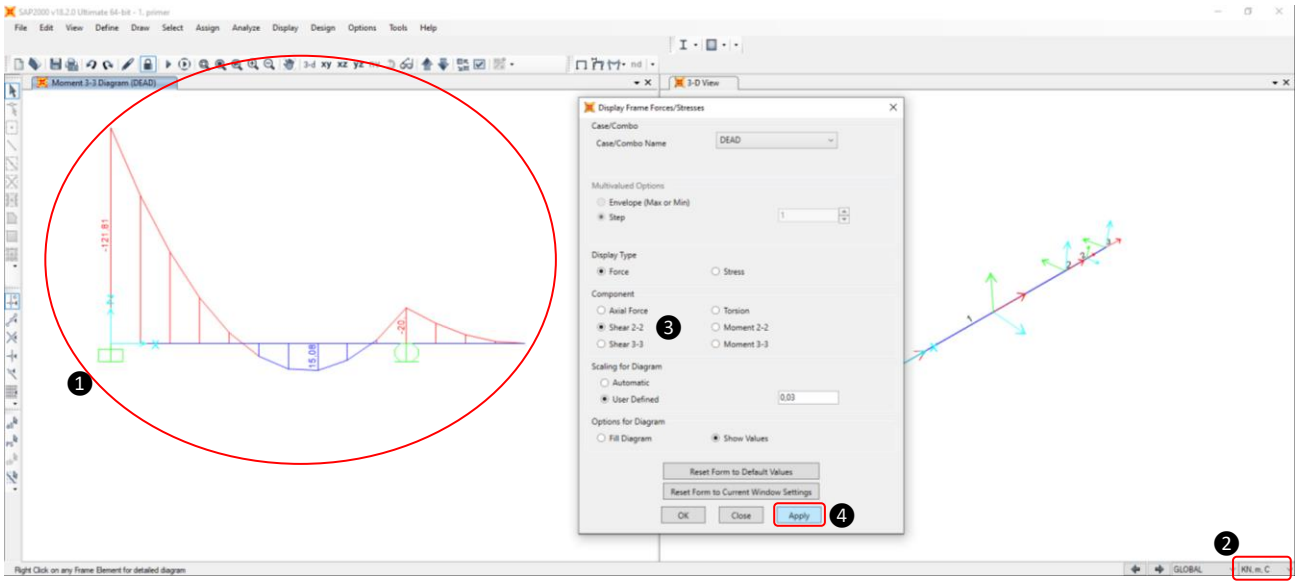
Nato se v aktivnem (Slika 1.66 – ❶) levem oknu (v pogledu *X–Z*) izrišejo diagrami upogibnih momentov (Slika 1.66 – ❷). Z rdečo barvo so označeni negativni momenti, z modro pa pozitivni (glej ***Opomba 10***). Če želimo diagrame prikazati nazorneje (v večjem merilu), potem v razdelku *Scaling for Diagram* namesto *Avtomatic* izberemo *User Defined* in sami (po želji) določimo ustrezno velikost (Slika 1.66 – ❸, glej ***Opomba 4***, str. 18). Poleg diagramov je smiselno prikazati

tudi ključne vrednosti momentov. To storimo tako, da v razdelku *Options for Diagram* namesto *Fill Diagram* izberemo *Show Values* (Slika 1.66 – ❹). Vse skupaj še enkrat potrdimo s klikom na *Apply* (Slika 1.66 – ❺).



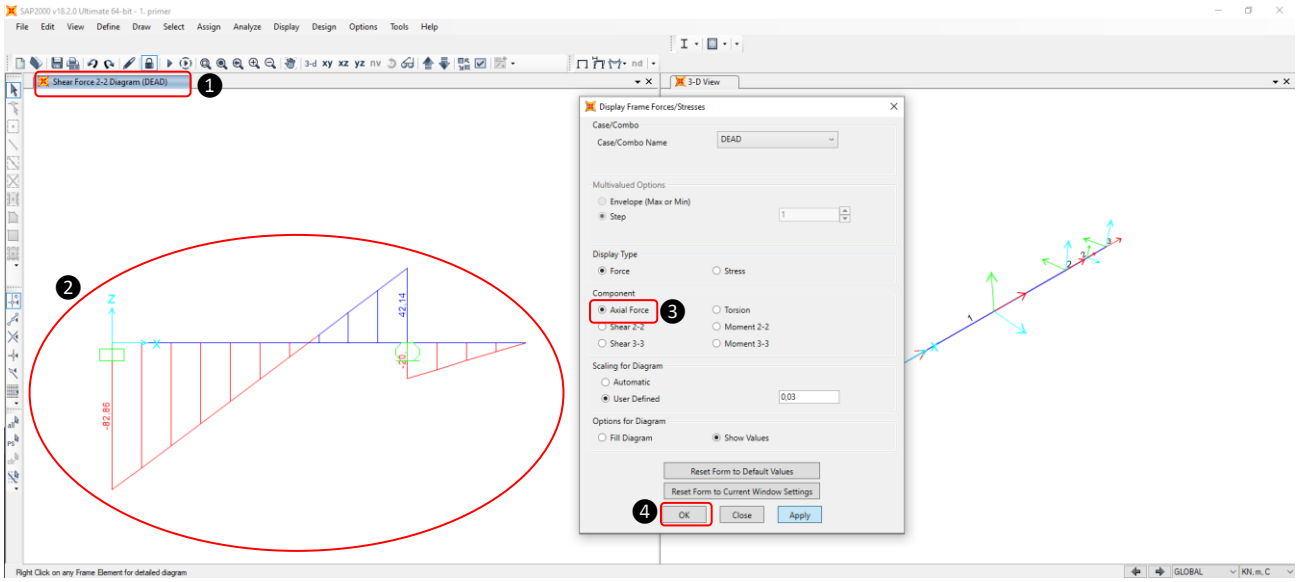
Slika 1.66: Nastavitve in izris diagrama upogibnih momentov

Poleg diagrama momentov, ki je sedaj izrisan v večjem merilu (Slika 1.67 – ❶), se na ekstremnih mestih izpišejo vrednosti v enotah, ki so izbrane v spodnjem desnem kotu zaslona (Slika 1.67 – ❷). Za prikaz strižnih sil (v smeri delovanja obtežbe) v razdelku *Component* označimo *Shear 2-2* (Slika 1.67 – ❸) in izbiro potrdimo s klikom na *Apply* (Slika 1.67 – ❹).



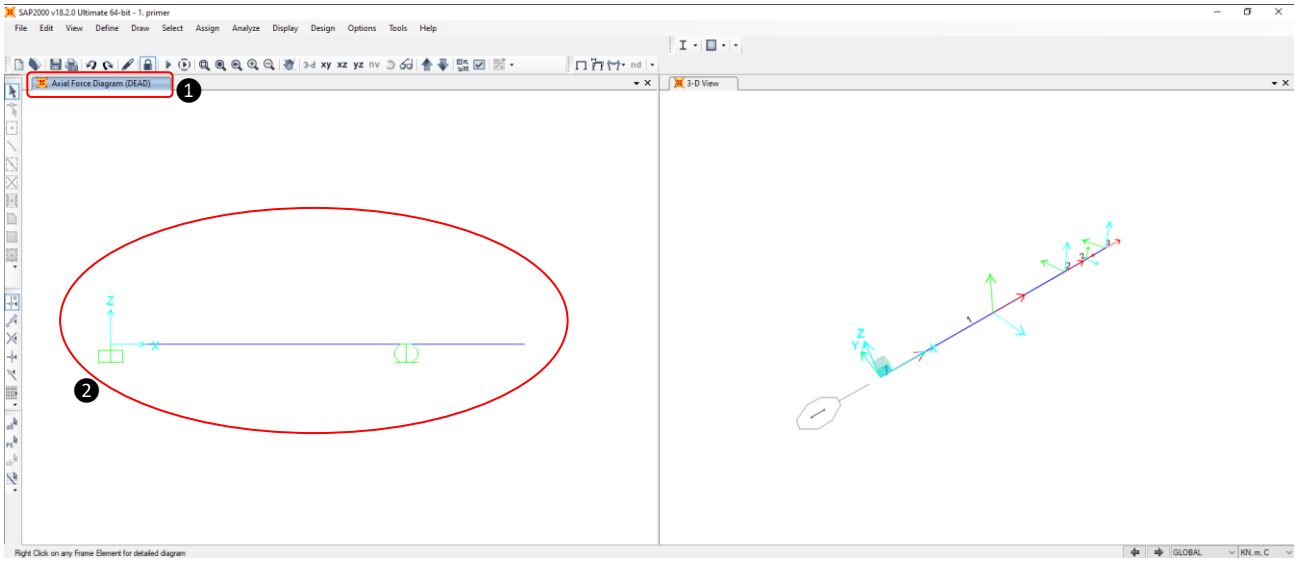
Slika 1.67: Izris diagrama upogibnih momentov

V aktiviranem oknu (Slika 1.68 – ❶) sledi izris strižnih sil (Slika 1.68 – ❷). Po želji lahko za izris osnih sil na seznamu izberemo *Axial Force* (Slika 1.68 – ❸). Ker notranjih statičnih količin ne bomo več izrisovali, lahko tokrat (namesto na *Apply*) kliknemo na *OK* (Slika 1.68 – ❹), da se okno ob izrisu hkrati zapre.



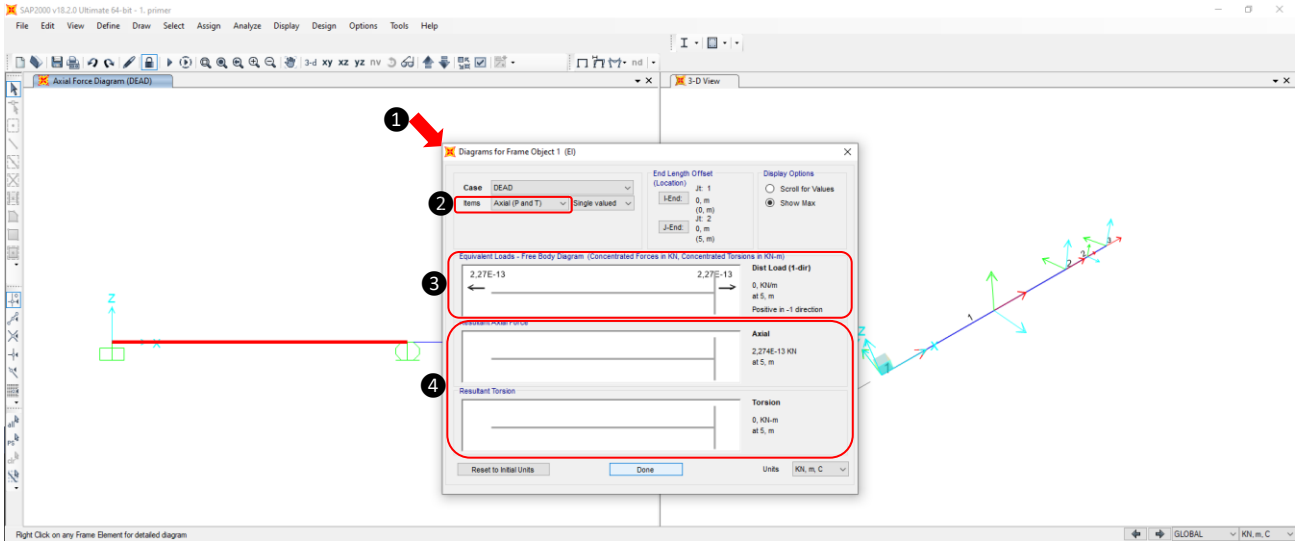
Slika 1.68: Izris diagrama prečnih sil

V aktiviranem oknu (Slika 1.69 – ❶) sledi izris osnih sil (Slika 1.69 – ❷), ki pa so pričakovano nič, zato se na konstrukciji ne prikažejo.



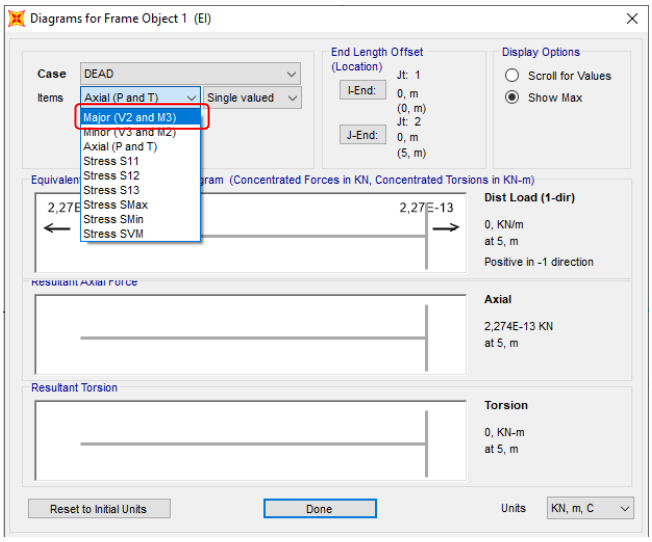
Slika 1.69: Izris diagrama osnih sil

Za podrobnejši prikaz notranjih statičnih količin po elementih se v levem oknu, kjer smo izrisali diagrame osnih sil, s kazalcem pomaknemo na primer na prvi končni element in s klikom na desni gumb miške se odpre okno *Diagrams for Frame Object 1 (EI)* (Slika 1.70 – ❶). Na seznamu (poleg *Items*) je izbran *Axial (P and T)* (Slika 1.70 – ❷), zaradi česar je v okencu *Equivalent loads – Free Body Diagram* na sliki prikazan uravnotežen končni element s koncentriranimi torzijskimi in osnimi silami v obeh vozliščih (Slika 1.70 – ❸). Čeprav morajo biti osne sile enake nič, vseeno nastopi minimalna osna sila $2{,}27 \cdot 10^{-13}$ kN, ki je posledica napake zaradi numeričnega zaokroževanja programa. V drugem in tretjem okencu *Resultant Axial Force* in *Resultant Torsion* pa sta po vrsti prikazana še (prazna) diagrama osnih sil in torzijskih momentov (Slika 1.70 – ❹).



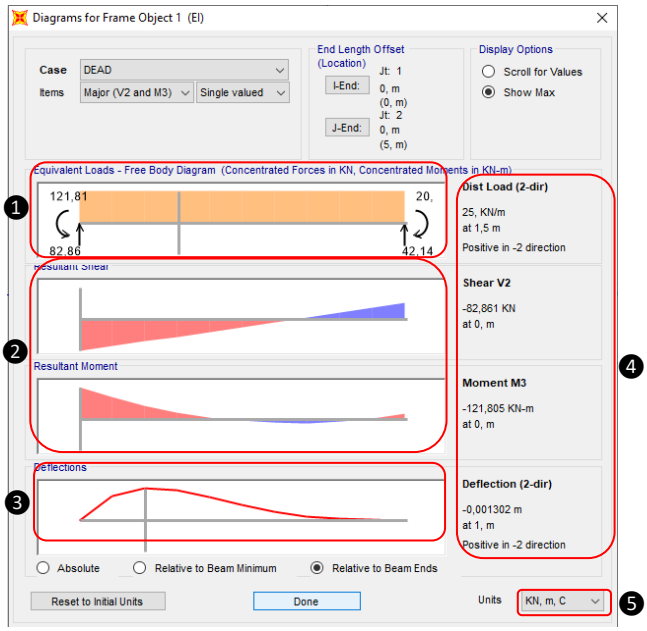
Slika 1.70: Diagrami osnih sil in torzijskih momentov za prvi končni element

Za prikaz ostalih notranjih količin, na primer prečnih sil (*Shear 2-2*) in pripadajočih momentov (*Moment 3-3*), kliknemo na *Axial (P and T)* in se na visečem seznamu pomaknemo na *Major (V2 and M3)* ter izbiro potrdimo z levim klikom (Slika 1.71).



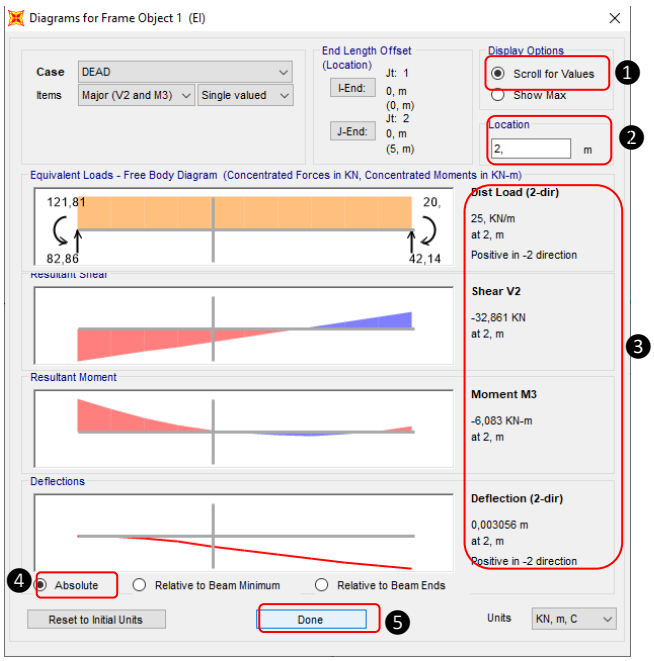
Slika 1.71: Izbiranje notranjih količin za prvi končni element

Sedaj je v prvem okencu *Equivalent loads – Free Body Diagram* prikazan uravnotežen prvi končni element s koncentriranima prečnima silama in upogibnima momentoma na obeh koncih ter enakomerno zvezno obtežbo (Slika 1.72 – ❶). V drugem in tretjem okencu *Resultant Shear* in *Resultant Moment* sta po vrsti prikazana diagrama za prečno silo in upogibni moment (Slika 1.72 – ❷). V zadnjem (četrtem) okencu *Deflections* pa je prikazana upogibnica označenega končnega elementa, ki je le aproksimativna funkcija relativnih (*Relative To Beam Ends*) prečnih pomikov (Slika 1.72 – ❸). Na desni strani so poleg diagramov v kN (za prečne sile), kNm (za momente) in v m (za prečne pomike) izpisane njihove maksimalne vrednosti in pripadajoče lokacije (Slika 1.72 – ❹). V spodnjem kotu okna lahko v polju *Units* po potrebi tudi spremenimo enote (Slika 1.72 – ❺).



Slika 1.72: Diagrami upogibnih momentov in prečnih sil ter prečni pomiki za prvi končni element

Če uporabnika namesto izpisa maksimalnih vrednosti zanimajo tudi vrednosti na drugih izbranih lokacijah, lahko v razdelku *Display Options* namesto *Show Max*, ki je trenutno označen, klikne na *Scroll for Values* (**Slika 1.73** – ❶) in v razdelku *Loacation* izbere želeno lokacijo, na primer 2 m (**Slika 1.73** – ❷). Desno poleg diagramov se izpišejo nove vrednosti za izbrano lokacijo, razen v prvem okencu *Equivalent loads – Free Body Diagram*, kjer ostanejo enake (**Slika 1.73** – ❸). Za izris upogibnice, ki prikazuje absolutne prečne pomike elementa, pa pod zadnjim okencem (*Defletions*) namesto *Relative to beam ends* izberemo možnost *Absolute* (**Slika 1.73** – ❹). Po pregledu rezultatov označenega končnega elementa okno zapremo s klikom na *Done* (**Slika 1.73** – ❺).

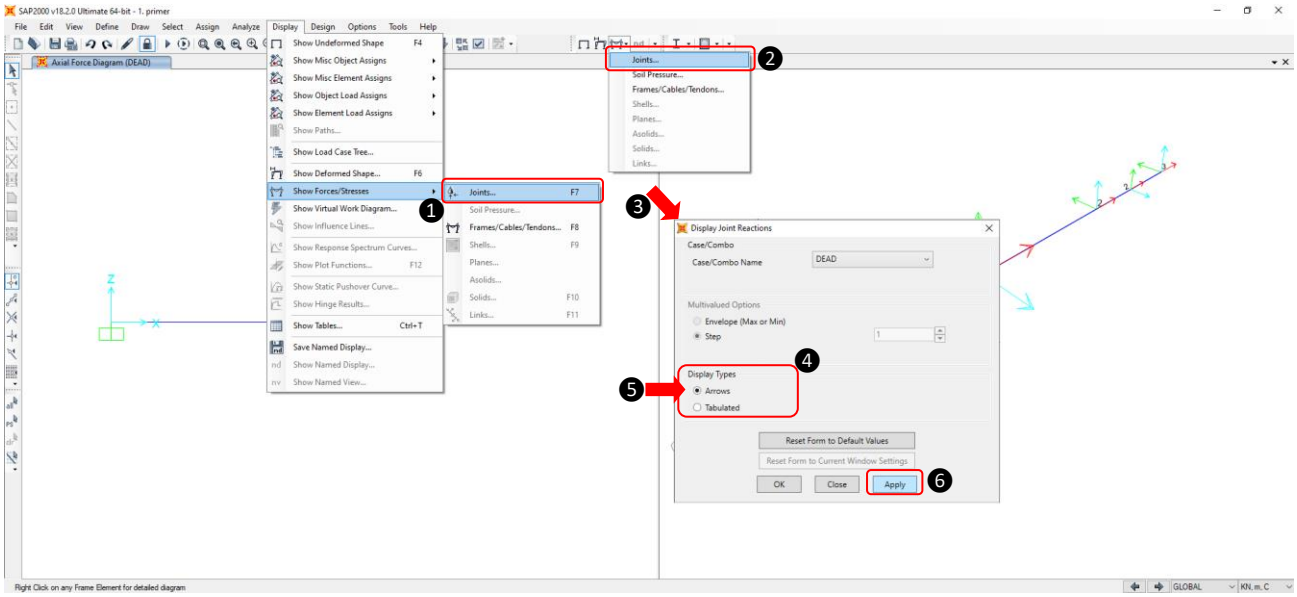


Slika 1.73: Vrednosti upogibnega momenta in prečne sile ter prečni pomik na lokaciji 2 m od začetka prvega končnega elementa

Opomba 11: *Vrednosti funkcij (obtežbe, prečnih sil, upogibnih momentov in prečnih pomikov) so za vse diagrame preračunane v točkah z enakimi razmiki 0,5 m (program sam avtomatsko izbere primeren razmik), ki so nato odsekoma linearno povezane (uporabnik lahko predefinirane razmike tudi prilagaja po lastni izbiri –* glej podpoglavje 1.5, str. 55*). Tako imamo na primer za funkcijo upogibnih momentov (ki je sicer polinom druge stopnje) točne vrednosti na razdaljah 0, 0,5 m, 1 m, 1,5 m ... 4,5 m in 5 m, medtem ko so vrednosti med temi točkami linearno interpolirane.*

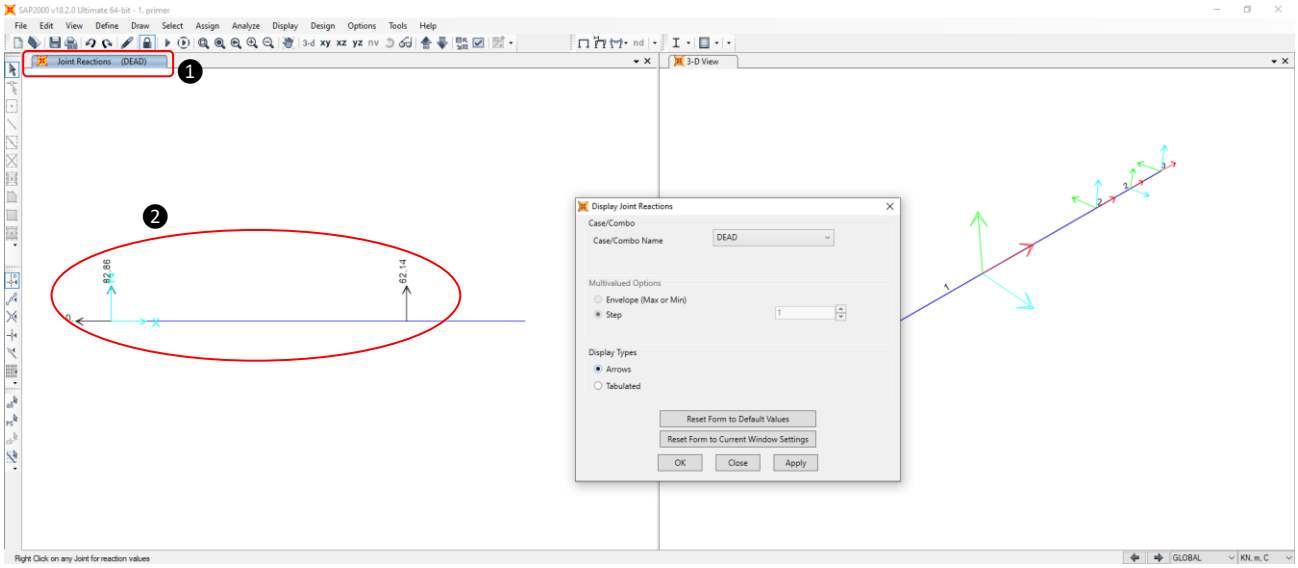
– Grafični prikaz reakcij

Za izris reakcij na konstrukciji v glavnem meniju kliknemo na *Display* in se v visečem meniju pomaknemo naprej na *Show Forces/Stresses* in nato še na *Joints* ... (F7) ter izbiro potrdimo s klikom (Slika 1.74 – ❶). Enakovredna in hkrati hitrejša možnost je, da v orodni vrstici kliknemo na ter na seznamu izberemo *Joints* ... (Slika 1.74 – ❷). Odpre se okno *Display Joint Reactions* (Slika 1.74 – ❸). V razdelku *Display Types* (Slika 1.74 – ❹) imamo dve možnosti prikaza reakcij. Prva možnost je *Arows*, ki omogoča vektorski izris reakcij v obliki puščic. Druga možnost pa je *Tabulated*, ki omogoča tabelirani izpis. Za prikaz reakcij v obliki puščic v razdelku *Display Types* izberemo *Arrows* (Slika 1.74 – ❺). Izbiro potrdimo s klikom na *Apply* (Slika 1.74 – ❻).



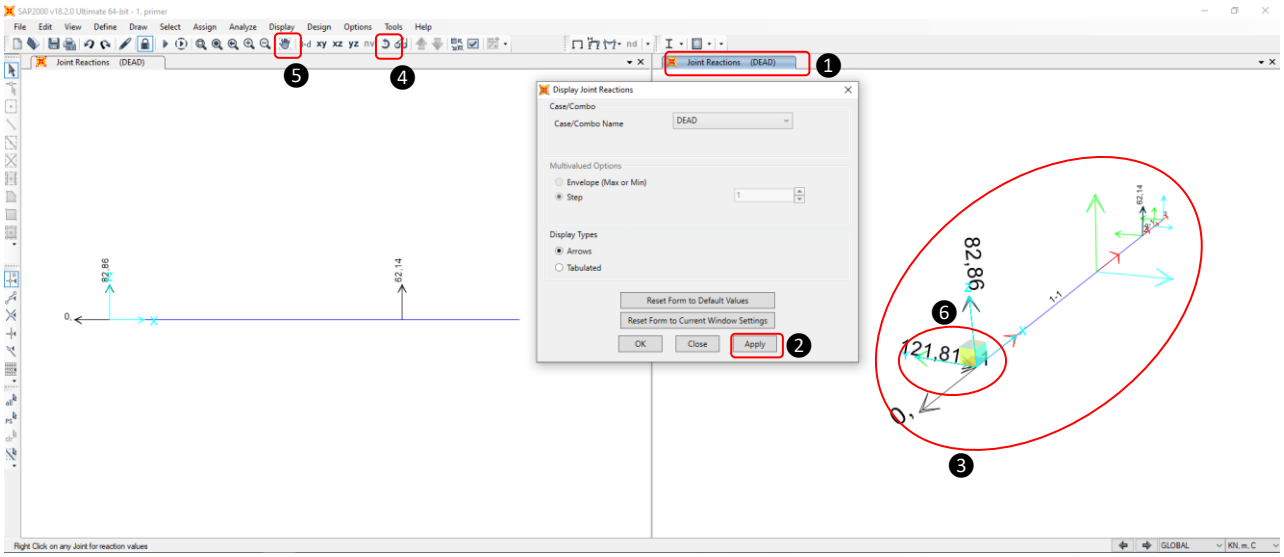
Slika 1.74: Nastavitve prikaza reakcij

V obeh vozliščih se v aktivnem pogledu ravnine *X–Z* (Slika 1.75 – ❶) izrišejo reakcije z vrednostmi in usmeritvami v obliki puščic (Slika 1.75 – ❷). Vrednost in usmeritev reakcijskega momenta v levi podpori, ki deluje pravokotno na ravnino *X–Z*, nista prikazani.



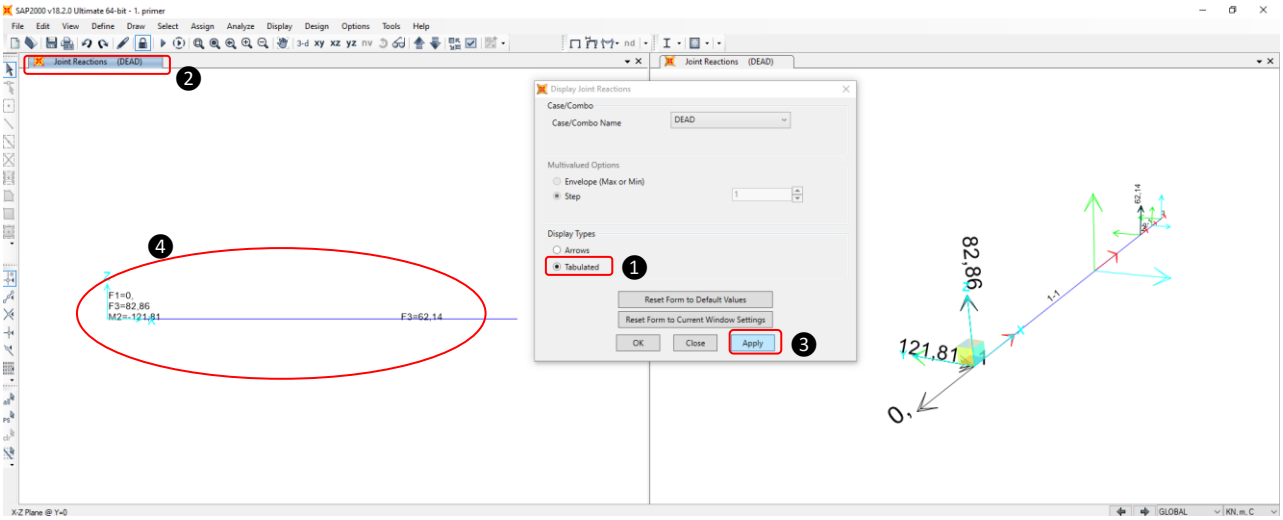
Slika 1.75: Prikaz reakcij v ravnini *X–Z*

Če želimo, da se izriše tudi reakcijski moment, je primerneje, da za prikaz (s klikom na desno okno) aktiviramo 3D-pogled (*3-D View*) (Slika 1.76 – ❶) in ponovno kliknemo na *Apply* (Slika 1.76 – ❷). Hkrati (Po kliku na *Apply*) se v 3D-pogledu izrišejo reakcije (Slika 1.76 – ❸). Ker okno *Display Joint Reactions* prekriva 3D-pogled, ga premaknemo na drugo lokacijo (glej ***Opomba 3***, str. 16). Za nazornejši prikaz reakcij lahko pogled konstrukcije zasučemo v poljuben položaj, tako da v orodni vrstici kliknemo na ikono (Slika 1.76 – ❹) in se s kazalcem pomaknemo v 3D-pogled. Zopet kliknemo na levi gumb miške in ga držimo ter s pomikanjem kazalca prilagodimo v želeni pogled konstrukcije. Ko smo s pogledom zadovoljni, lahko gumb spustimo. Celoten pogled konstrukcije lahko tudi translatorno premaknemo (namesto zasučemo), tako da v orodni vrstici izberemo ikono (Slika 1.76 – ❺). V 3D-pogledu lahko vidimo (Slika 1.76 – ❻), da reakcijski moment v vozlišču 1 (na lokaciji vpete podpore) z velikostjo 121,81 kNm deluje v nasprotno (*tj. protiurno*) smer osi 2 (→). Zaradi prekrivanja z globalnim koordinatnim sistemom je puščica morda manj opazna.



Slika 1.76: Prikaz reakcij v 3D-pogledu

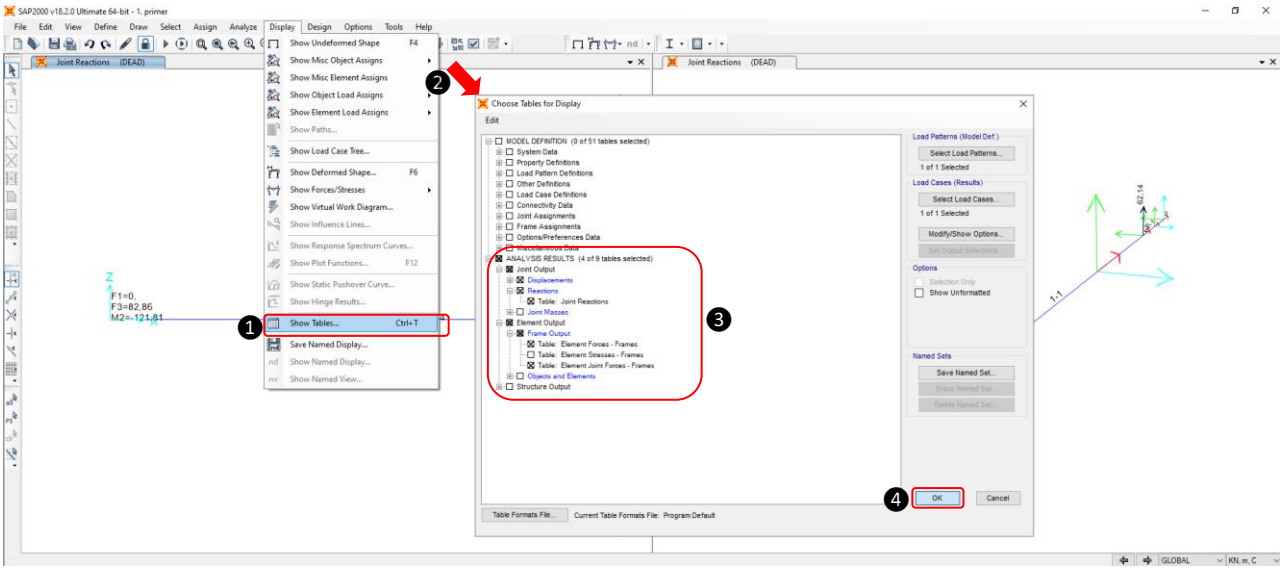
Vrednosti reakcij lahko prikažemo tudi v tabelirani obliki tako, da v razdelku *Display Types* izberemo *Tabulated* (Slika 1.77 – ❶). S klikom na levo okno aktiviramo pogled *X–Z* (Slika 1.77 – ❷) in izbiro potrdimo s klikom na *Apply* (Slika 1.77 – ❸). V aktivnem pogledu *X–Z* se na lokacijah podpor tako izrišejo tabelirane vrednosti vseh reakcij (Slika 1.77 – ❹). Ko zaključimo s kontrolo reakcij, lahko okno Display *Joint Reactions* zapremo s klikom na *OK* ali *Close*. Lahko pa enostavno na tipkovnici pritisnemo na tipko <Esc>.



Slika 1.77: Prikaz reakcij v tabelirani obliki

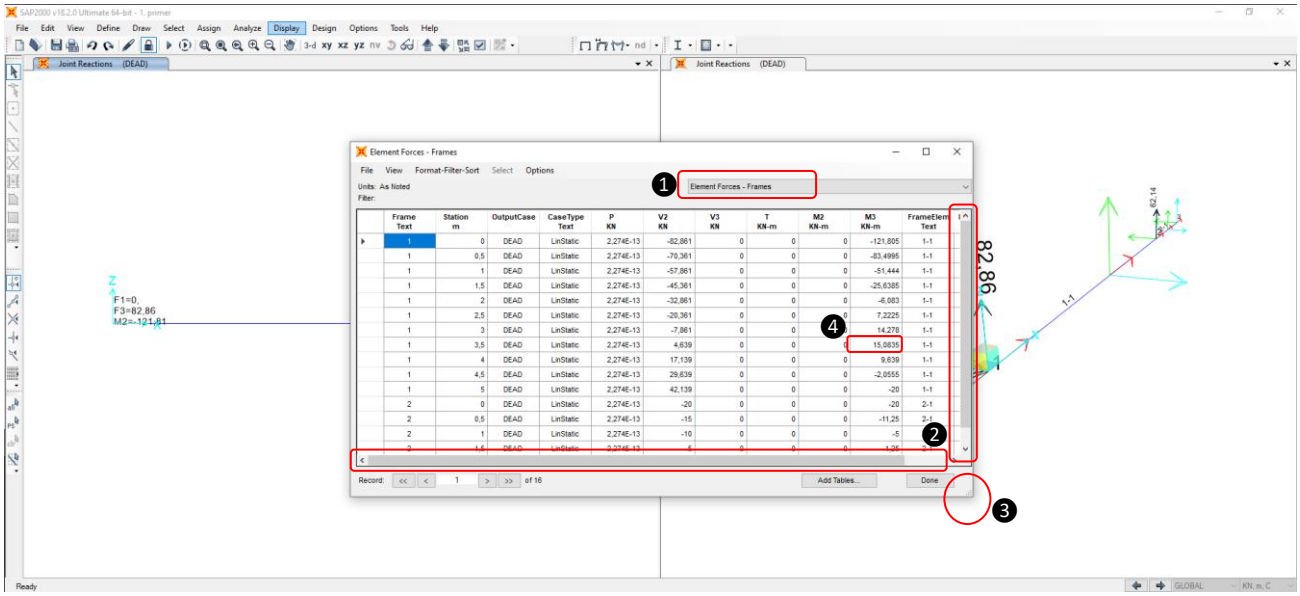
– *Tabelirani prikaz rezultatov*

Vse rezultate (vozliščne pomike, notranje statične količine, reakcije itd.) lahko po želji prikažemo tudi v tabelirani obliki. V glavnem meniju kliknemo na *Display in še enkrat na Show Tables …* (Ctrl + T) (Slika 1.78 – ❶). Nato se odpre okno *Choose Tables for Display* (Slika 1.78 – ❷). Za prikaz rezultatov vozliščnih pomikov in zasukov, reakcij, notranjih statičnih količin v končnih elementih ter vozliščnih sil na koncih elementov po vrsti označimo *Joint Displacements*, *Joint Reactions*, *Element Forces – Frames* in *Element Joint Forces – Frames* (Slika 1.78 – ❸). Izbrane količine potrdimo s klikom na *OK* (Slika 1.78 – ❹).



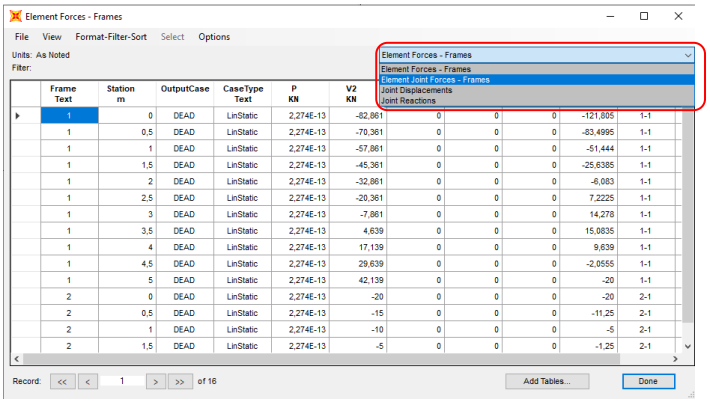
Slika 1.78: Izbira tabeliranih količin za prikaz

Za izbrane rezultate količin, ki so bile potrjene s klikom na *OK* (Slika 1.78 – ❹), se glede na abecedni vrstni red imen najprej odpre okno *Element Forces – Frames* (Slika 1.79 – ❶). Za oba elementa konstrukcije so v točkah z razmikom 0,5 m prikazani notranje sile (*P* – osna sila, *V2* – prečna sila v smeri 2, *V3* – prečna sila v smeri 3) in momenti (*T* – torzijski moment, *M2* – upogibni moment okoli osi 2 in *M3* – upogibni moment okoli osi 3). Zaradi velikega števila lokacij na trenutnem zaslonu niso zapisane vse vrednosti, zato je možno uporabiti vertikalni in horizontalni drsnik na desnem in spodnjem robu okna, da se lahko na seznamu pomaknemo nižje ali bolj desno (Slika 1.79 – ❷). Lahko pa tudi razširimo okno in potem, če so v tabeli prikazane vse vrednosti, drsnik za levo oziroma desno izgine (Slika 1.79 – ❸). Iz tabele lahko hitro razberemo tudi neposredno bližino tabeliranega maksimalnega pozitivnega upogibnega momenta, ki se nahaja na lokaciji 3,5 m prvega končnega elementa (Slika 1.79 – ❹). Ker je število izhodiščnih lokacij (glej podpoglavje 1.5, str. 55) možno spreminjati, se lahko z večjim številom izpisa lokacij po elementu še natančneje približamo točni vrednosti maksimalnega momenta.



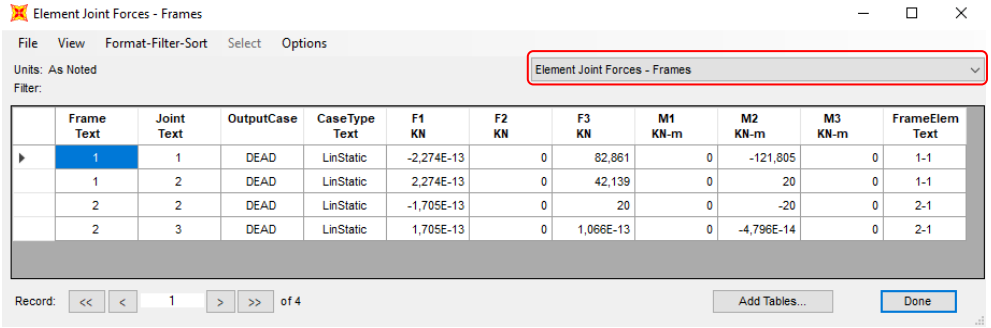
Slika 1.79: Prikaz tabeliranih vrednosti notranjih sil in momentov po elementu

Za prikaz ostalih rezultatov, ki smo jih označili v predhodnem oknu (*Choose Tables for Display*), v visečem meniju kliknemo na *Element Forces – Frames* in prikaže se celoten seznam izbranih količin (Slika 1.80).



Slika 1.80: Izbira tabeliranih količin na seznamu

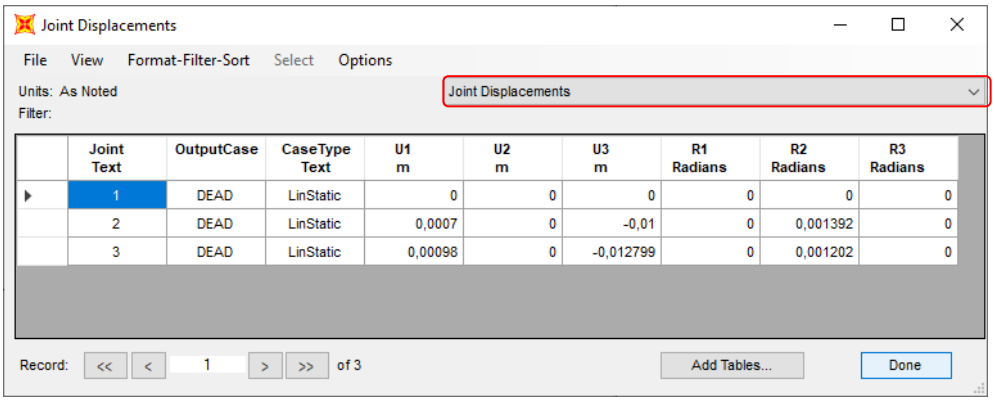
Za prikaz vozliščnih sil in momentov kliknemo na *Element Joint Forces – Frames* (Slika 1.81).



Frame Text	Joint Text	OutputCase	CaseType Text	F1 KN	F2 KN	F3 KN	M1 KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m	FrameElem Text
1	1	DEAD	LinStatic	-2,274E-13	0	82,861	0	-121,805	0	1-1
1	2	DEAD	LinStatic	2,274E-13	0	42,139	0	20	0	1-1
2	2	DEAD	LinStatic	-1,705E-13	0	20	0	-20	0	2-1
2	3	DEAD	LinStatic	1,705E-13	0	1,066E-13	0	-4,796E-14	0	2-1

Slika 1.81: Prikaz tabeliranih vrednosti vozliščnih sil in momentov

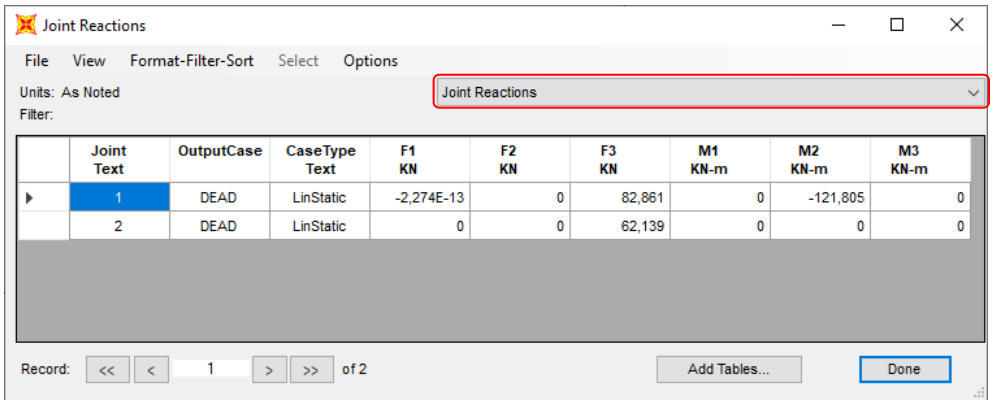
Za prikaz (vseh treh) vozliščnih pomikov in zasukov na seznamu izberemo *Joint Displacements* (Slika 1.82).



Joint Text	OutputCase	CaseType Text	U1 m	U2 m	U3 m	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
1	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0	0
2	DEAD	LinStatic	0,0007	0	-0,01	0	0,001392	0
3	DEAD	LinStatic	0,00098	0	-0,012799	0	0,001202	0

Slika 1.82: Prikaz tabeliranih vrednosti vozliščnih pomikov in zasukov

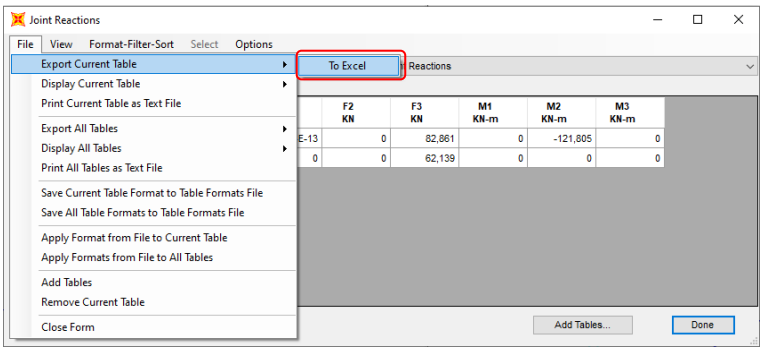
Za prikaz reakcij na seznamu izberemo *Joint Reactions* (Slika 1.83).



Joint Text	OutputCase	CaseType Text	F1 KN	F2 KN	F3 KN	M1 KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m
1	DEAD	LinStatic	-2,274E-13	0	82,861	0	-121,805	0
2	DEAD	LinStatic	0	0	62,139	0	0	0

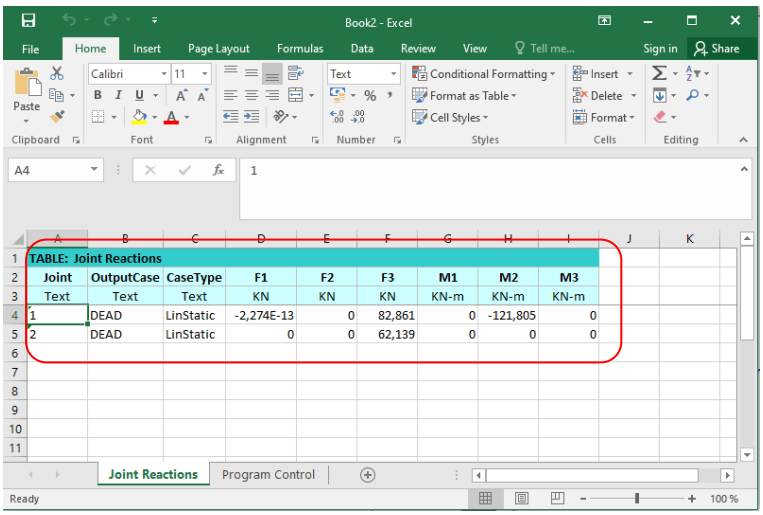
Slika 1.83: Prikaz tabeliranih vrednosti reakcijskih sil in momentov

Vse trenutno prikazane podatke (v našem primeru so to reakcije) je v tabelirani obliki možno zelo enostavno neposredno izvoziti v program Excel tako, da v glavnem meniju kliknemo na *File* in se na stolpčnem meniju pomaknemo na *Export Current Table* ter izberemo *To Excel* (Slika 1.84).



Slika 1.84: Izvoz tabeliranih vrednosti reakcij

Ob kliku se nemudoma zažene program Excel (če je program naložen), kjer so prikazani vsi izvoženi podatki reakcij (Slika 1.85).



Slika 1.85: Izvoženi podatki reakcij v programu Excel

Tabelirane podatke lahko prikažemo tudi v drugih oblikah, tako da se tokrat v visečem meniju pomaknemo na *Display Current Table*, kjer so na razpolago štiri možnosti prikaza:

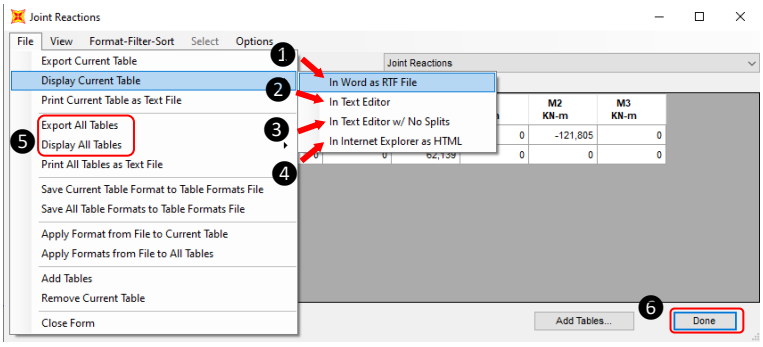
– v Wordu kot datoteka RTF (*Rich Text File)* s klikom na *In Word as RTF File* (Slika 1.86 – ❶);

– v Beležnici z razdelitvijo podatkov (če je v širino po stolpcih seznam količin predolg, se prerazporedijo po višini v nove tabele) s klikom na *In Text Editor* (Slika 1.86 – ❷);

– v Beležnici brez razdelitve podatkov (torej je število količin v širino po stolpcih lahko neomejeno) s klikom na *In Text Editor w/No Splits* (Slika 1.86 – ❸);

– za spletno uporabo v datoteki HTML s klikom na *In Internet Explorer as HTML* (Slika 1.86 – ❹).

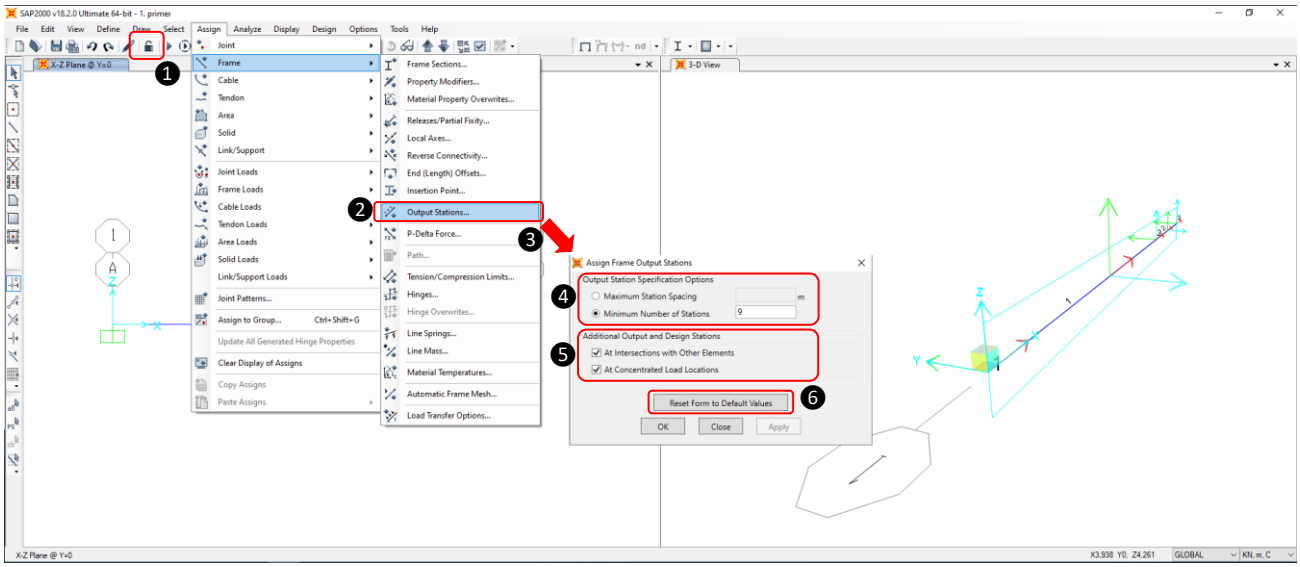
Če želimo hkrati izvoziti podatke vseh označenih količin (glej ❸ Slika 1.78 – ❶, str. 51) in ne samo ene od njih (npr. v tem primeru reakcij), potem na visečem seznamu namesto izbire *Export Current Table* in *Display Current Table* izberemo možnost *Export All Tables* in *Display All Tables* (Slika 1.86 – ❺). Po pregledu rezultatov okno zapremo s klikom na *Done* (Slika 1.86 – ❻).



Slika 1.86: Izvoženi podatki reakcij v programu Excel

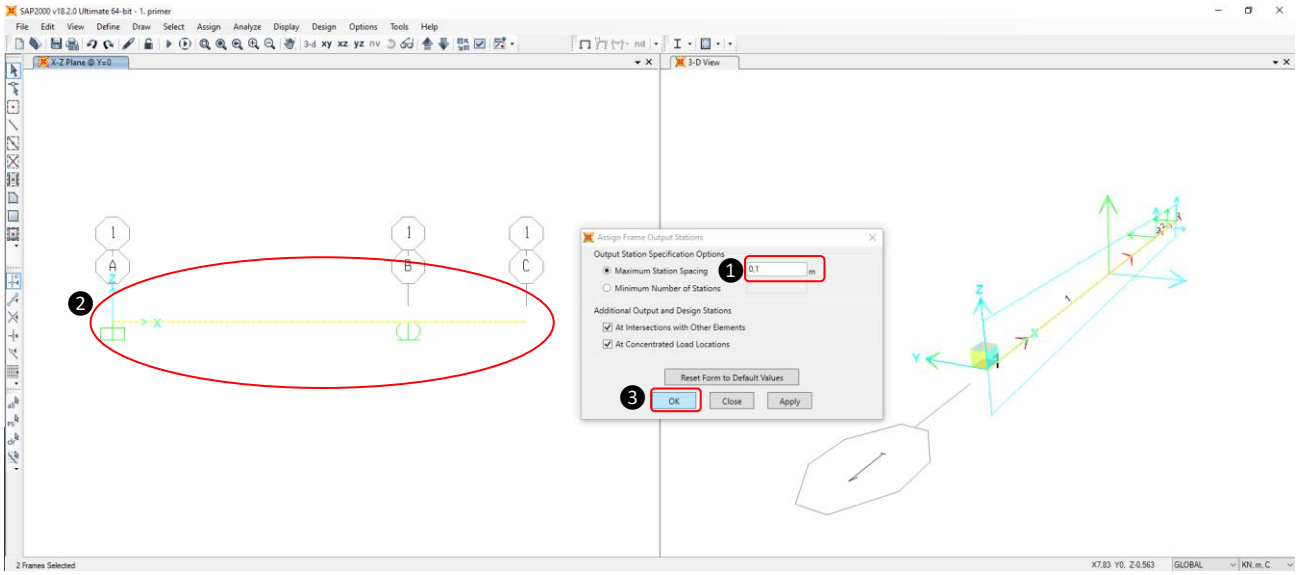
1.5 Spreminjanje števila področij za izpis vrednosti po končnih elementih

Za spreminjanje števila področij na elementu je treba najprej odkleniti model. Namesto ikone zaklenjene ključavnice se prikaže ikona odklenjene ključavnice (Slika 1.87 – ❶). Nato v glavnem meniju kliknemo na *Assign*, se pomaknemo na *Frame* in nato še naprej na *Output Stations* ... ter izbiro potrdimo s klikom (Slika 1.87 – ❷). Nato se odpre okno *Assign Frame Output Stations* (Slika 1.87 – ❸). V razdelku *Output Station Specification Options* (Slika 1.87 – ❹) imamo na izbiro dve načina podajanja področij (za izpise rezultatov). Prva možnost je, da izberemo *Maximum Station Spacing* in podamo poljubno vrednost maksimalne dolžine področja. Druga možnost pa je, da izberemo *Minimum Number of Stations* in podamo minimalno število vseh področij na elementu. Najmanjša možna izbira je torej eno področje. Znotraj vsakega področja so vrednosti količin linearno interpolirane. V razdelku *Additional Output and Design Stations* (Slika 1.87 – ❺) so dodatno na razpolago (če uporabnik želi) še vmesne interno generirane lokacije na stikih z drugimi elementi (tako da označimo *At Intersections with Other Elements*) in na vseh lokacijah pod koncentriranimi silami, ki so aplicirane po elementih izven vozlišč (tako da označimo *At Concetrated Load Locations*). Uporabnik ima možnost, da s klikom na *Reset Form to Default Values* povrne privzete vrednosti (Slika 1.87 – ❻).



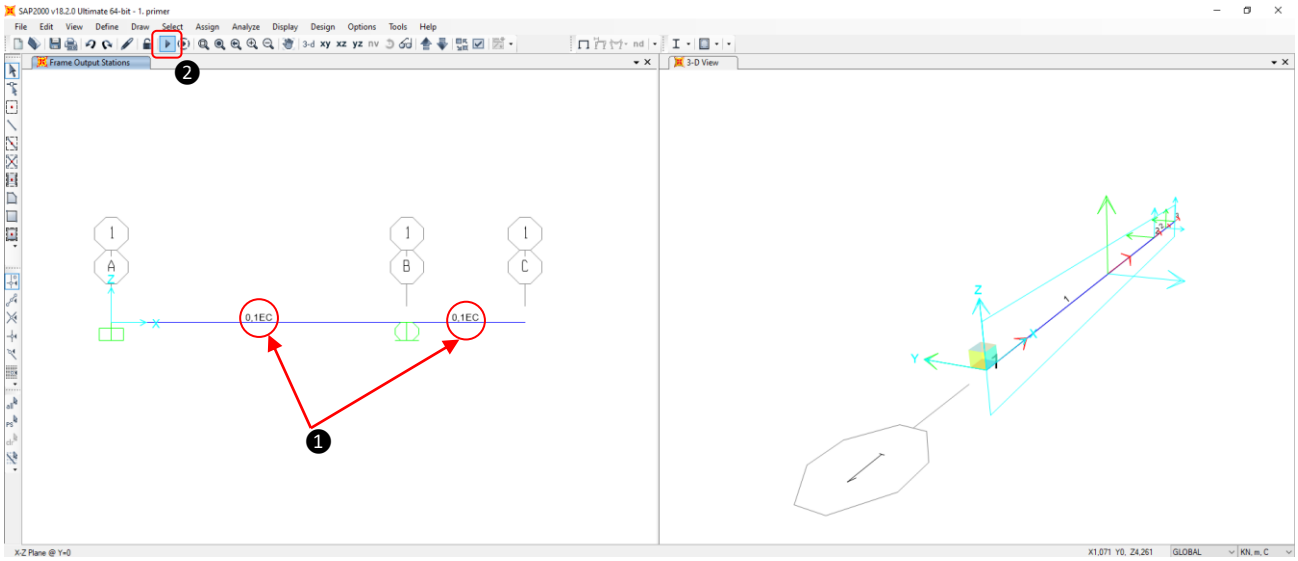
Slika 1.87: Nastavitev števila področij za izpis vrednosti notranjih količin po končnem elementu

Število izhodiščnih lokacij na obeh končnih elementih bomo povečali z zmanjšanjem razdalje med lokacijami. V okence desno od *Maximum Station Spacing* vpišemo (namesto 0,5 m) vrednost 0,1 m (Slika 1.88 – ❶, glej ***Opomba 4***, str. 18). Spremembo želimo izvesti na obeh končnih elementih, zato označimo oba končna elementa, ki se obarvata rumeno (Slika 1.88 – ❷). Vse skupaj potrdimo s klikom na *OK* (Slika 1.88 – ❸).



Slika 1.88: Nastavitev števila lokacij za izpis vrednosti notranjih količin po končnem elementu

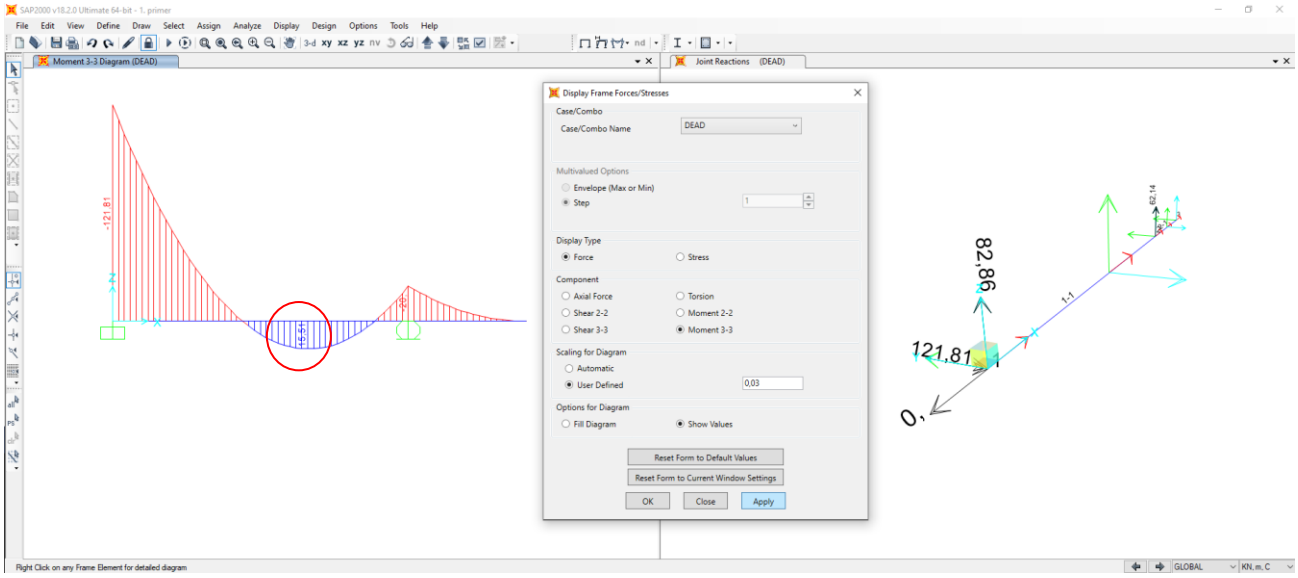
Nad obema končnima elementoma se v aktivnem levem oknu izpišeta vrednosti, ki označujeta maksimalni razmik med lokacijami za prikaz izhodiščnih rezultatov (Slika 1.89 – ❶). Ponovno zaženemo analizo s klikom na ▶ (Slika 1.89 – ❷) in nato še enkrat na *Run Now* (postopek je prikazan v podpoglavju 1.3, str. 38).



Slika 1.89: Izpis razmika med lokacijami za izpis vrednosti notranjih količin po končnem elementu

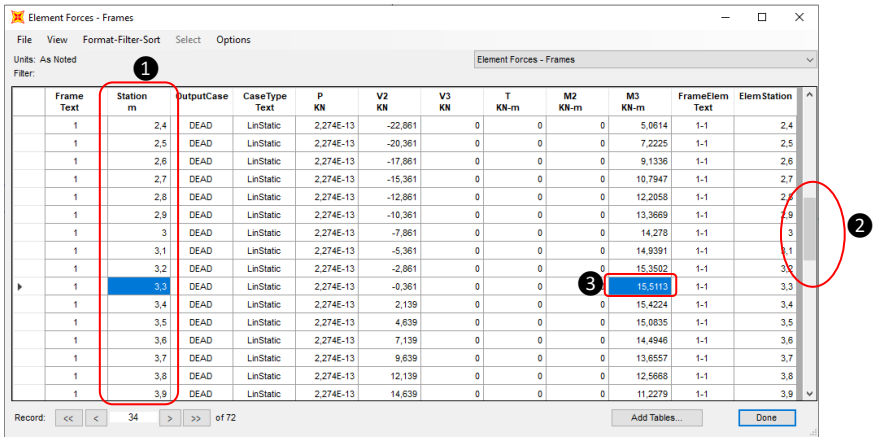
Po zahtevi za izris upogibnih momentov sledi kakovostnejši diagram, izrisan z večjim številom lokacij z medsebojnimi razmiki 0,1 m. Izbira večjega števila lokacij vpliva ugodno tudi na oceno približka ekstremnih momentov, kadar je razporeditev nelinearna. Iz grafa je razvidno, da je

vrednost maksimalnega pozitivnega momenta (obarvanega modro) sedaj 15,51 kNm namesto 15,08 kNm (Slika 1.90).



Slika 1.90: Izris diagrama upogibnih momentov

Če še enkrat preverimo rezultate notranjih statičnih količin v tabelirani obliki, lahko vidimo, da so zdaj (kot smo izbrali) v mnogo večjem številu izpisani z razmikom 0,1 m (Slika 1.91 – ❶). Za prikaz vrednosti in lokacije maksimalnega pozitivnega momenta uporabimo vertikalni drsnik in se pomaknemo nižje (Slika 1.91 – ❷). Iz zapisa lahko vidimo, da je nova lokacija (običajno) kakovostnejšega približka maksimalnega pozitivnega momenta z vrednostjo 15,5113 kNm (Slika 1.91 – ❸) na novi razdalji 3,3 m.



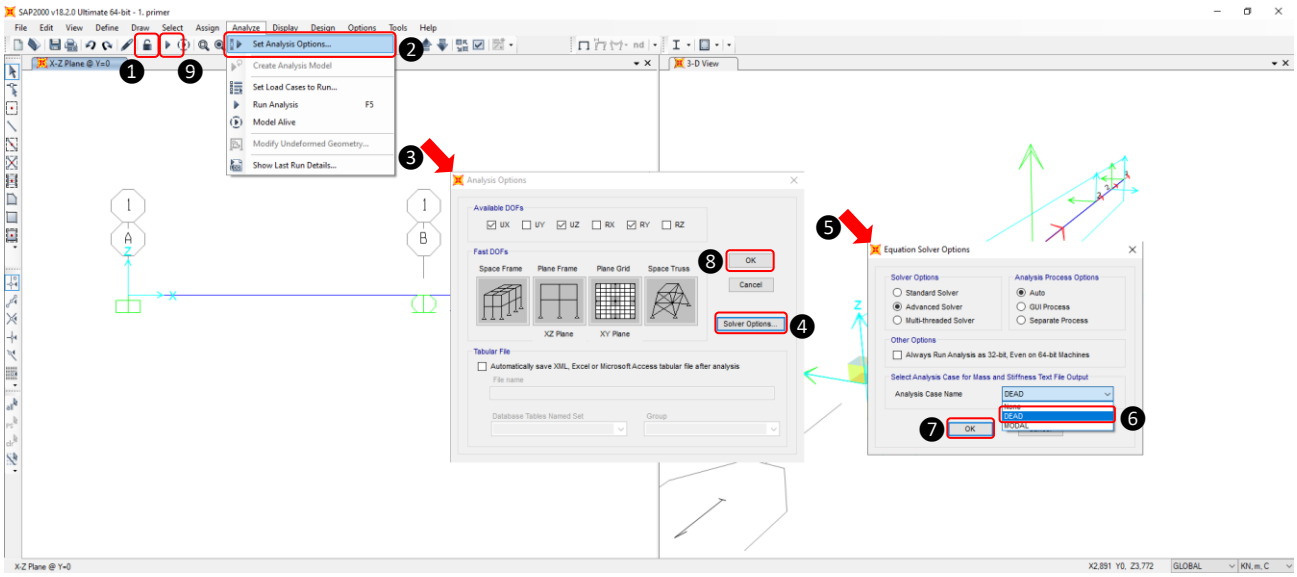
Frame Text	Station m	OutputCase	CaseType Text	P KN	V2 KN	V3 KN	T KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m	FrameElem Text	ElemStation
1	2,4	DEAD	LinStatic	2,274E-13	-22,861	0	0	0	5,0614	1-1	2,4
1	2,5	DEAD	LinStatic	2,274E-13	-20,361	0	0	0	7,2225	1-1	2,5
1	2,6	DEAD	LinStatic	2,274E-13	-17,861	0	0	0	9,1336	1-1	2,6
1	2,7	DEAD	LinStatic	2,274E-13	-15,361	0	0	0	10,7947	1-1	2,7
1	2,8	DEAD	LinStatic	2,274E-13	-12,861	0	0	0	12,2058	1-1	2,8
1	2,9	DEAD	LinStatic	2,274E-13	-10,361	0	0	0	13,3669	1-1	2,9
1	3	DEAD	LinStatic	2,274E-13	-7,861	0	0	0	14,278	1-1	3
1	3,1	DEAD	LinStatic	2,274E-13	-5,361	0	0	0	14,9391	1-1	3,1
1	3,2	DEAD	LinStatic	2,274E-13	-2,861	0	0	0	15,3502	1-1	3,2
1	3,3	DEAD	LinStatic	2,274E-13	-0,361	0	0	0	15,5113	1-1	3,3
1	3,4	DEAD	LinStatic	2,274E-13	2,139	0	0	0	15,4224	1-1	3,4
1	3,5	DEAD	LinStatic	2,274E-13	4,639	0	0	0	15,0835	1-1	3,5
1	3,6	DEAD	LinStatic	2,274E-13	7,139	0	0	0	14,4946	1-1	3,6
1	3,7	DEAD	LinStatic	2,274E-13	9,639	0	0	0	13,6557	1-1	3,7
1	3,8	DEAD	LinStatic	2,274E-13	12,139	0	0	0	12,5668	1-1	3,8
1	3,9	DEAD	LinStatic	2,274E-13	14,639	0	0	0	11,2279	1-1	3,9

Slika 1.91: Prikaz tabeliranih vrednosti vozliščnih sil in momentov

1.6 Izpis reducirane togostne matrike konstrukcije

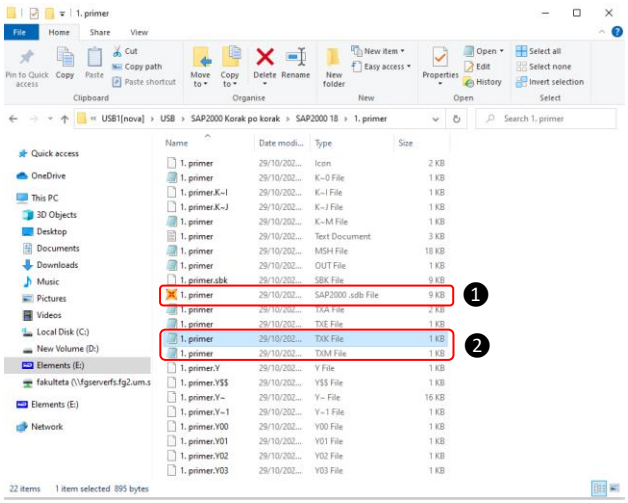
Po opravljeni analizi program omogoča izpis reducirane togostne in masne matrike konstrukcije, kar je zelo priročno za kontrolo obeh matrik pri »peš« analizi metode končnih elementov. Najprej moramo model odkleniti s klikom na ikono zaklenjene ključavnice (Slika 1.92 – ❶). Nato v glavnem meniju kliknemo na *Analyse* in izberemo *Set Analysis Options* ... (Slika 1.92 – ❷). Odpre se okno *Analysis Options* (Slika 1.92 – ❸). Kliknemo na ikono *Solver Options* ... (Slika 1.92 – ❹).

Odpre se dodatno okno *Equation Solver Options* (Slika 1.92 – ❺). Za izpis dveh novih datatotek s togostno in masno matriko ob ponovljeni analizi v razdelku *Select Analysis Case for Mass and Stiffness Text File Output* na seznamu (namesto *None*) izberemo obravnavani obtežni primer *DEAD* (Slika 1.92 – ❻). Izbiro potrdimo s klikom na *OK* (Slika 1.92 – ❼). Za dokončno potrditev kliknemo na ikono *OK* še v oknu *Analysis Options* (Slika 1.92 – ❽) in ponovno zaženemo analizo s klikom na ikono ▶ (Slika 1.92 – ❾). V oknu *Set Load Cases to Run* začetek analize ponovno potrdimo še s klikom na ikono *Run Now*.



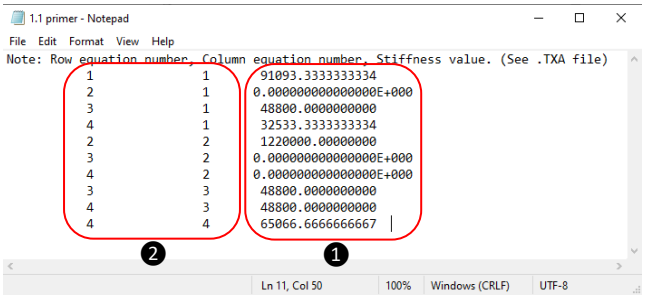
Slika 1.92: Nastavitve analize za izpis togostne in masne matrike konstrukcije

Po končani analizi odpremo lokacijo, kjer se nahaja osnovna datoteka vrste .sdb (Slika 1.93 – ❶), ki nastane ob shranitvi računskega modela konstrukcije. Ta vrsta (.sdb) datoteke je ključna, saj vsebuje vse podatke (vozlišča, elementi, podpore, obtežbe itd.) o konstrukciji za izvedbo analize. Z izbrisom ali izgubo te datoteke izgubimo podatke in ne moremo več dostopati do matematičnega modela konstrukcije. Po izvedenem procesu analiz se na shranjeni lokaciji datoteke .sdb tvorijo še ostale različne vrste datotek, med katerimi sta (na novo) izpisani tudi datoteki s končnicama TXK in TXM, v katerih sta zapisani reducirana togostna in masna matrika (Slika 1.93 – ❷).



Slika 1.93: Nastavitve analize za izpis togostne in masne matrike konstrukcije

Za izpis togostne matrike odpremo datoteko TXK v aplikaciji Beležnica ali Notepad, kjer so v tretjem stolpcu prikazani vsi členi reducirane togostne matrike konstrukcije za izračun neznanih prostostnih stopenj (Slika 1.94 – ❶). V prvem in drugem stolpcu pa so za pripadajoče člene togostne matrike predstavljeni indeksi, ki definirajo njihov položaj (vrstico in stolpec) v matriki (Slika 1.94 – ❷). Pri izpisu členov je upoštevana simetrija togostne matrike.



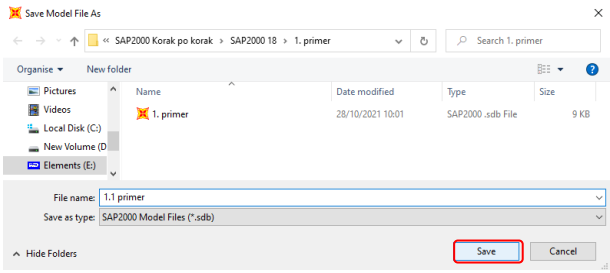
Slika 1.94: Izpisani členi spodnjega trikotnika reducirane togostne matrike konstrukcije

1.7 Spreminjanje podatkov na konstrukciji

Podatkov na konstrukciji ni možno spreminjati, dokler model ni odklenjen, kar prikazuje ikona odklenjene ključavnice v orodni vrstici. Šele nato lahko ponovno po običajnem postopku dodamo (ali odstranimo) obtežbe, vozlišča, končne elemente, podpore itd.

Kadar želimo izvesti analizo z različnimi obtežbami, lahko te določimo v različnih obtežnih primerih istega dokumenta in jih ni treba ločeno shranjevati. Če želimo za morebitno kasnejšo ponovno analizo ohraniti različne različice konstrukcije, je te treba posebej shraniti. V visečem meniju jo s klikom na *Save As ...* (*Ctrl* + *Shift* + *S*) lahko shranimo v isti mapi z drugačnim imenom ali pa z istim imenom v drugi mapi. V nasprotnem primeru izgubimo vse rezultate prejšnje analize.

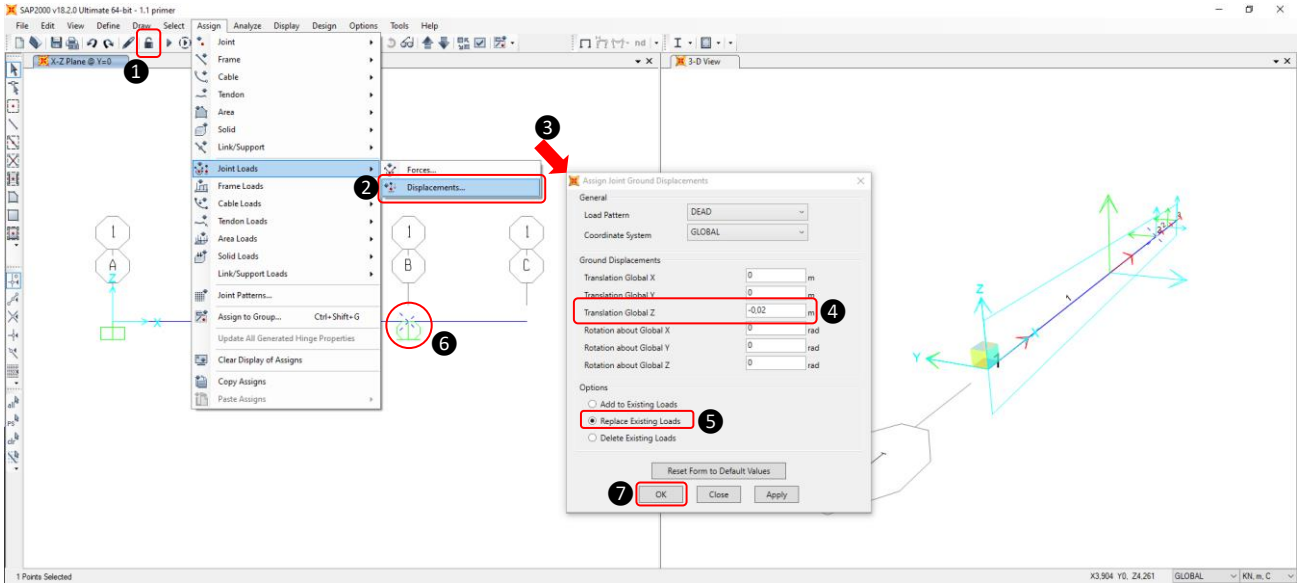
V obravnavanem primeru imamo poleg povečanega posedka desne podpore, ki je sedaj 2 cm, še spremenjen način podpiranja v desni podpori, in sicer iz pomične v nepomično. Če ne želimo izgubiti rezultatov prejšnje analize (s hkratnim pritiskom na vse gumbe *Ctrl* + *Shift* + *S*), potem najprej shranimo obstoječo (.sdb) datoteko z novim imenom, na primer *primer 1.1* (Slika 1.95).



Slika 1.95: Shranjevanje datoteke na disk z novim imenom

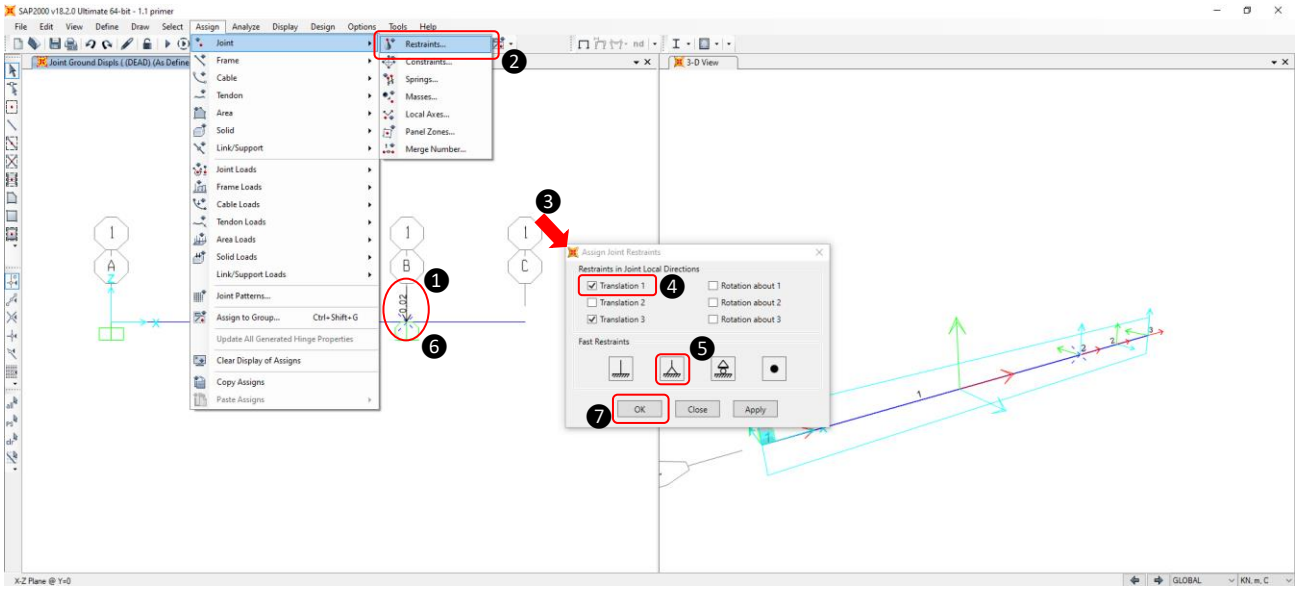
Ob kliku na ikono *Save* se na novo shranjen model avtomatsko odklene (Slika 1.96 – ❶). Za nadomestitev obstoječega pomika podpore v glavnem meniju ponovno kliknemo na *Assign*, se s kazalcem pomaknemo na *Joint Loads* in nato še na *Displacements ...* ter izbiro potrdimo s klikom (Slika 1.96 – ❷). Odpre se okno *Assign Joint Ground Displacements* (Slika 1.96 – ❸). V razdelku *Ground Displacements* se na seznamu pomaknemo na *Translation Global Z* in vpišemo vrednost – 0,02 (Slika 1.96 – ❹, glej ***Opomba 4***, str. 18). V razdelku *Options* označimo *Replace Existing*

Loads (Slika 1.96 – ❺). Označimo še vozlišče (Slika 1.96 – ❻) in izbiro potrdimo s klikom na ikono *OK* (Slika 1.96 – ❼).



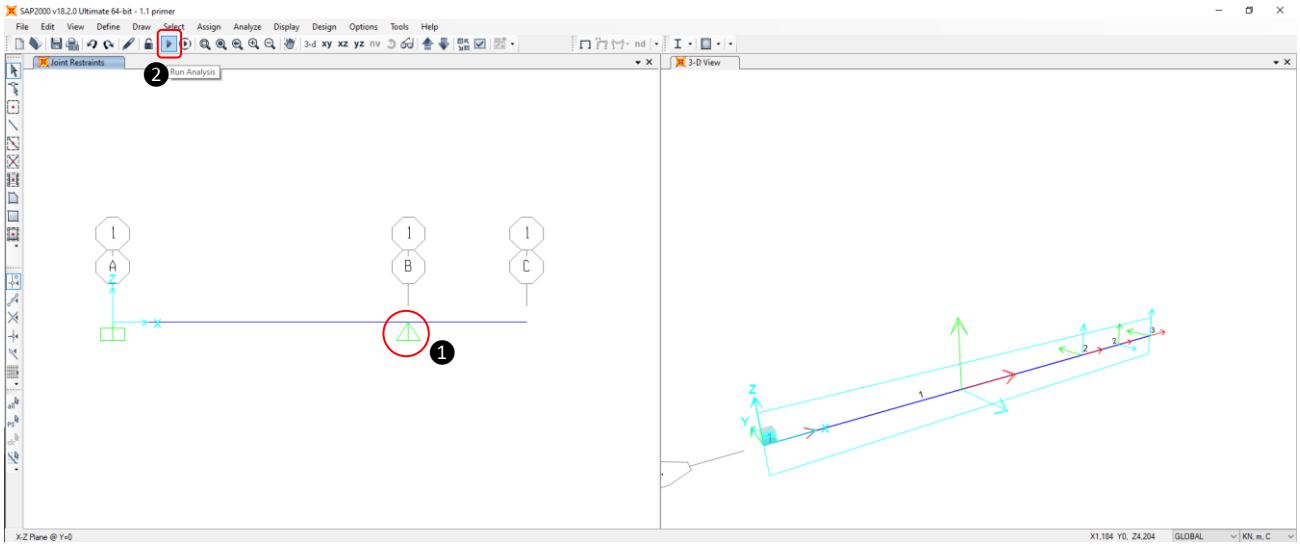
Slika 1.96: Definiranje vertikalnega pomika podpore

V aktivnem oknu se v vozlišču izrišeta velikost in smer apliciranega pomika (Slika 1.97 – ❶). Pomično podporo nadomestimo z nepomično tako, da v glavnem meniju ponovno kliknemo na *Assign*, se pomaknemo na *Joint* in izberemo *Restraints* ... (Slika 1.97 – ❷). Odpre se okno *Assign Joint Restraints* (Slika 1.97 – ❸). Nepomična podpora v ravnini *X–Z* je definirana s preprečenima pomikoma v smereh lokalnih osi 1 (→) in 3 (→). Torej je v razdelku *Restraints in Joint Local Directions* poleg *Translation 3* treba označiti še *Translation 1* (Slika 1.97 – ❹). Druga možnost je, da v razdelku *Fast Restrain* kliknemo kar na ikono nepomične podpore (Slika 1.97 – ❺). Označimo še vozlišče na lokaciji pomične podpore (Slika 1.97 – ❻) in izbiro potrdimo s klikom na *OK* (Slika 1.97 – ❼).



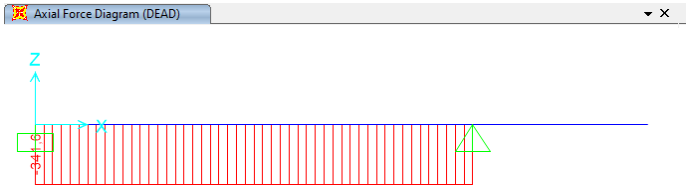
Slika 1.97: Definiranje nepomične podpore

Namesto pomične podpore se zdaj v aktivnem levem oknu (v pogledu ravnine *X*–*Z*) izriše nepomična podpora (Slika 1.98 – ❶). Ko končamo z vsemi spremembami, lahko ponovno zaženemo analizo s klikom na ikono ▶ (Slika 1.98 – ❷).



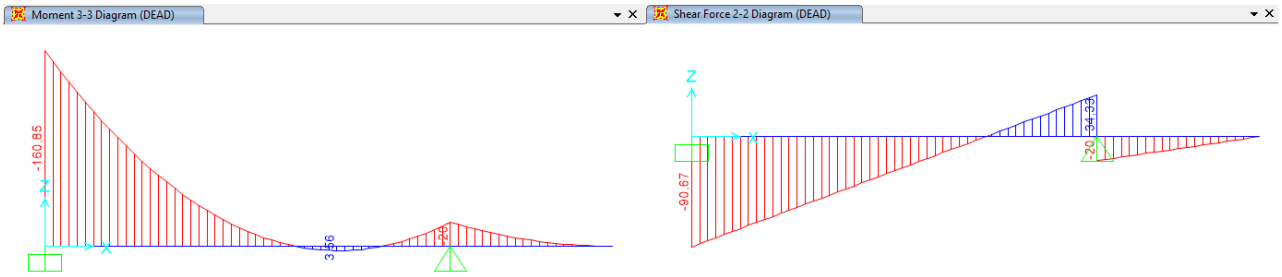
Slika 1.98: Izris nepomične podpore

Ker so osni pomiki (kot posledica spremembe povprečne temperature prereza) v prvem končnem elementu zaradi nepomične podpore sedaj preprečeni, nastopijo tudi osne sile, ki so (v enotah kN) razvidne iz diagrama (Slika 1.99).



Slika 1.99: Diagram osnih sil (v kN)

Predvsem zaradi povečanega posedka se spremenijo tudi diagrami upogibnih momentov in prečnih sil (Slika 1.100).

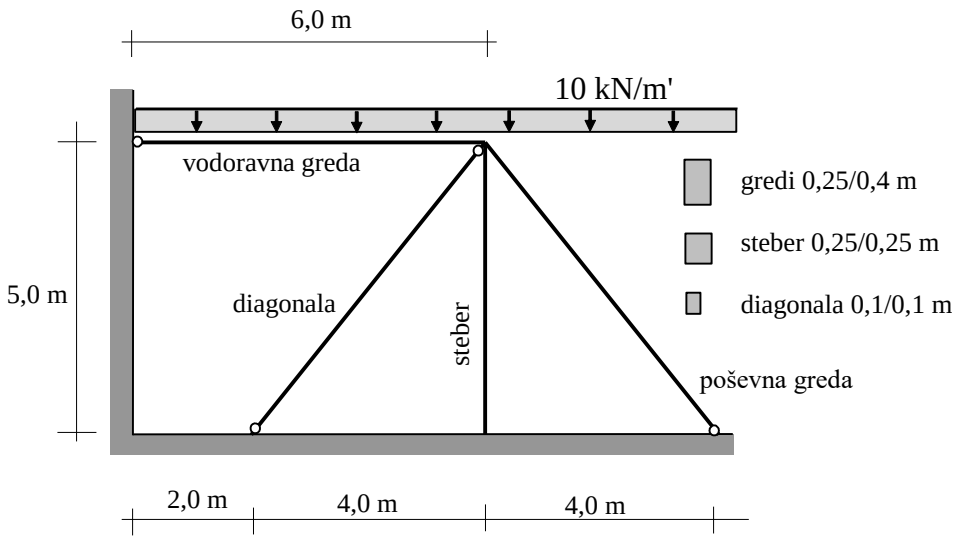


Slika 1.100: Diagram upogibnih momentov (v kNm)

Primer 2 – ravninska okvirna konstrukcija

2.1 Podatki o analizirani konstrukciji

Izračunaj vozliščne pomike, reakcije in razporeditve notranjih statičnih količin za ravninsko konstrukcijo na sliki:

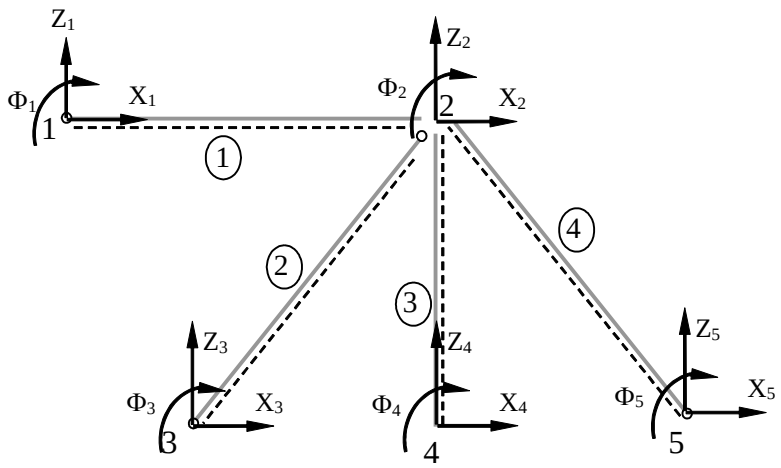


Slika 2.1: Predstavitev primera 2

Prerez stebra je b/h = 0,25/0,25 m, prerez vodoravne in poševne grede je b/h = 0,25/0,4 m, prerez členkasto priključene diagonale pa b/h = 0,1/0,1 m. Vsi elementi so iz betona, ki ima modul elastičnosti E = 30 GPa.

Analizo ponovi še za konstrukcijo brez desnega elementa (poševne grede).

Uporabili bomo minimalni računski model s štirimi končnimi elementi v ravnini *X*–*Z*:

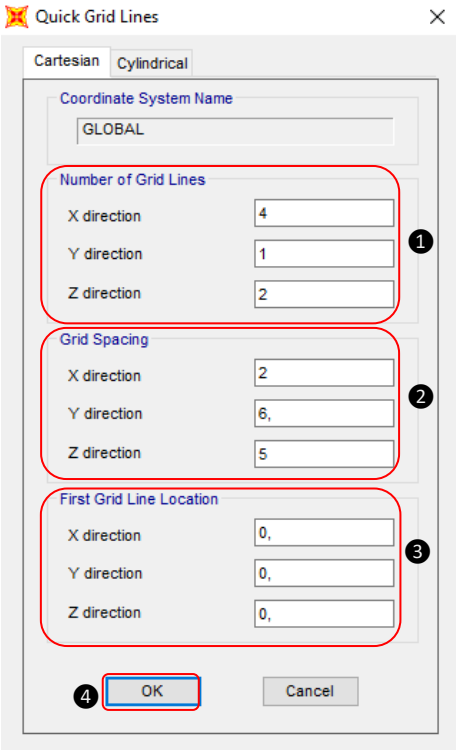


Slika 2.2: Označbe vozlišč, elementov in prostostnih stopenj

2.2 Podajanje podatkov v programu SAP2000

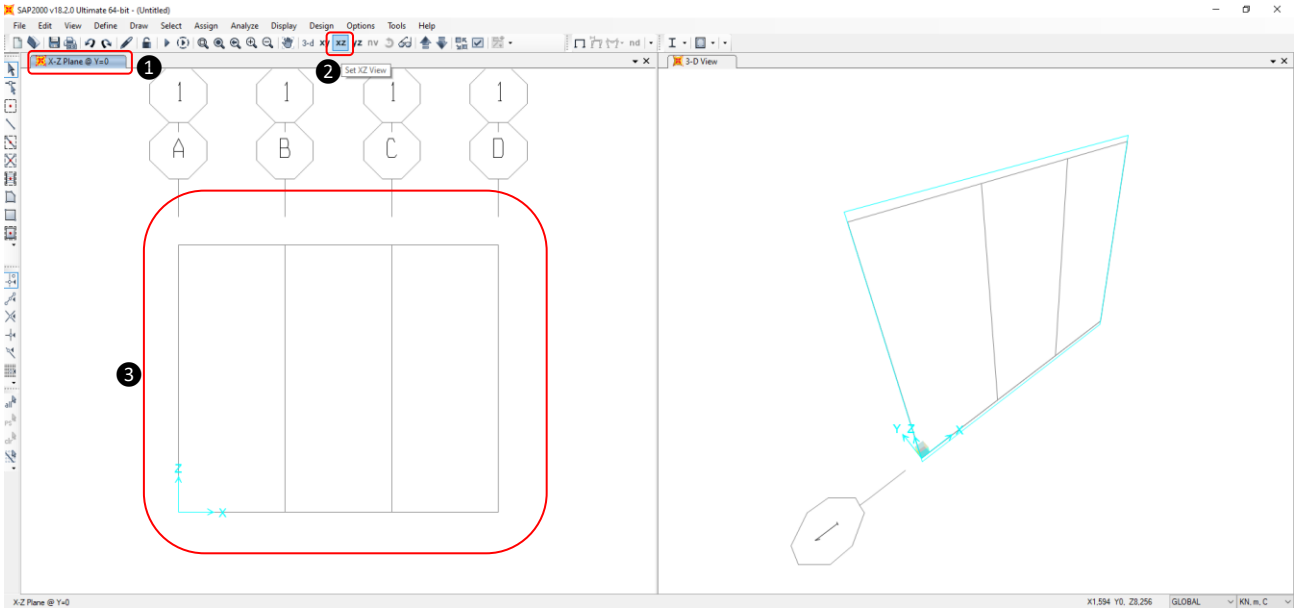
– Diskretizacija konstrukcije: definiranje mrežnih črt

Po zagonu programa najprej kliknemo na ikono praznega lista, in ko se odpre okno *New Model*, v razdelku *Select Template* ponovno (kot v primeru 1) izberemo predlog *Grid Only*. Ker smo se za ravninsko okvirno konstrukcijo odločili, da bo ležala v ravnini *X–Z* globalnega koordinatnega sistema z imenom *GLOBAL*, lahko v novem oknu *Quick Grid Lines* v razdelku *Number of Grid Lines* za število mrežnih črt v smereh *X* (*X direction*), *Y* (*Y direction*) in *Z* (*Z direction*) po vrsti izberemo 4, 1 in 2 (Slika 2.3 – ❶). Za opis konstrukcije potrebujemo štiri različne koordinate *X*, eno samo koordinato *Y* in dve koordinati *Z*. V razdelku *Grid Spacing* za smer *X* izberemo 2, ki predstavlja razdaljo v metrih med vozliščema 1 in 3, za razdaljo v smeri *Z* pa izberemo 5 (višina okvirja v metrih). Koordinatno smer *Y* lahko preskočimo, saj v tej smeri nastopa samo ena mrežna črta (Slika 2.3 – ❷). V zadnjem razdelku *First Grid Line Location* pustimo, da mrežne črte potekajo iz koordinatnega izhodišča za vse tri smeri *X*, *Y* in *Z* (Slika 2.3 – ❸). Na koncu vse skupaj potrdimo s klikom na *OK* (Slika 2.3 – ❹).



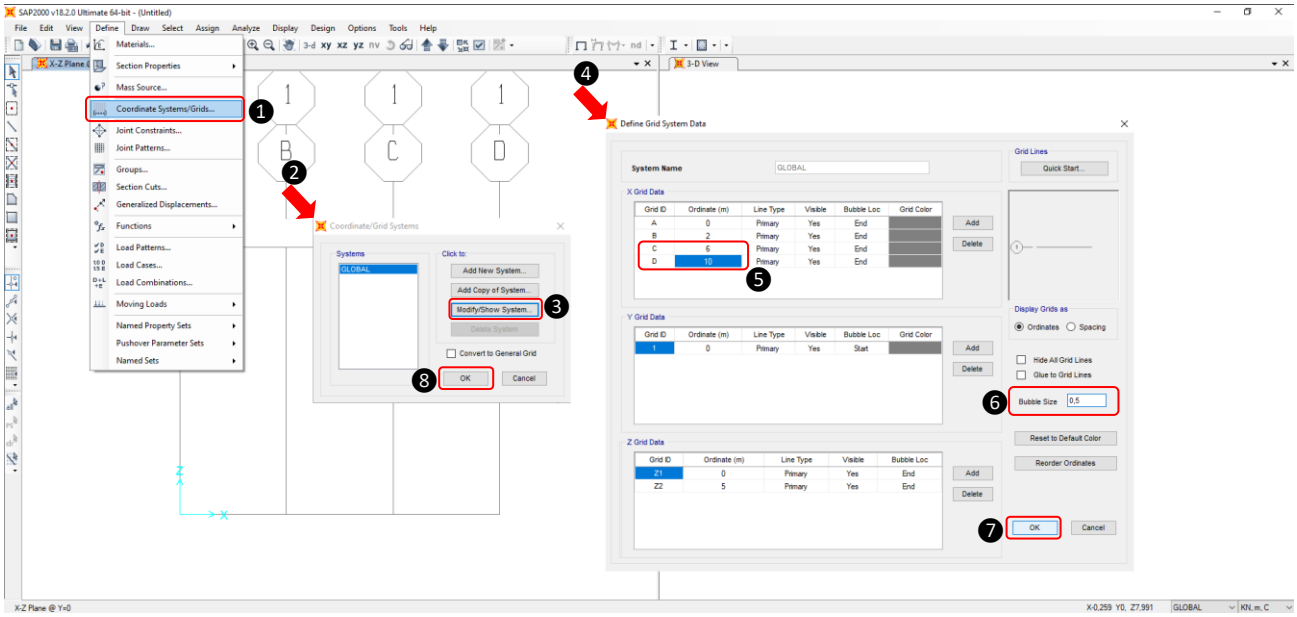
Slika 2.3: Definiranje mrežnih črt

V dveh prikaznih oknih (levo in desno) se pojavita dva predefinirana pogleda, ki zasedata vsak polovico zaslona. V aktivnem levem oknu (Slika 2.4 – ❶), ki je v predefiniranem pogledu v ravnini *X–Y*, s klikom na ikono XZ v orodni vrstici (Slika 2.4 – ❷) spremenimo pogled v ravnino *X–Z* (Slika 2.4 – ❸).



Slika 2.4: Prilagoditev pogleda v ravnino *X–Z* z izrisanimi mrežnimi črtami

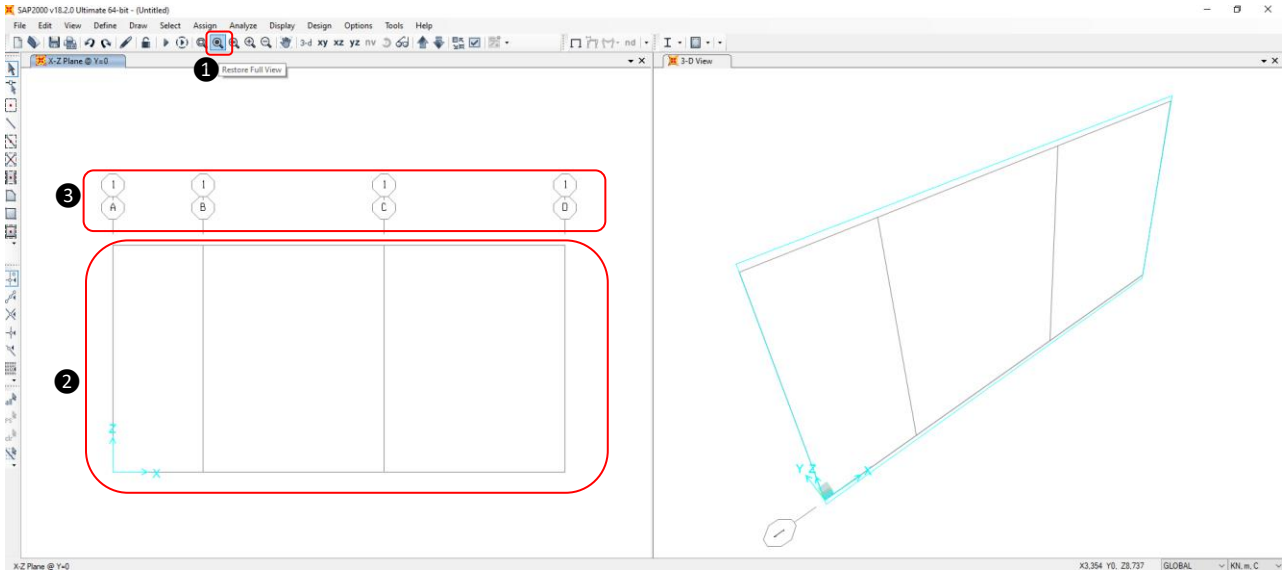
Treba je popraviti še lokaciji tretje in četrte mrežne črte v smeri *X*, ki ne ustrezata lokacijama vozlišč 4 in 5. Zato v visečem meniju *Define* izberemo *Coordinate Systems/Grids…* (Slika 2.5 – ❶). Odpre se okno *Coordinate/Grid Systems* (Slika 2.5 – ❷) in kliknemo na ikono *Modify/Show System* … (Slika 2.5 – ❸). Nadalje se odpre novo okno *Define Grid System Data* (Slika 2.5 – ❹). V razdelku *X Grid Data* popravimo lokaciji mrežnih črt C (iz 4 m na 6 m) in D (iz 6 m na 10 m) (Slika 2.5 – ❺). Hkrati lahko v razdelku *Bubble Size* po potrebi zmanjšamo velikost mehurčkov iz 1,0625 na 0,5 (Slika 2.5 – ❻). Na koncu vse skupaj potrdimo z ukazom *OK* (Slika 2.5 – ❼), najprej v oknu *Define Grid System Data* in nato še enkrat v oknu *Coordinate/Grid Systems* (Slika 2.5 – ❽).



Slika 2.5: Nastavitve mrežnih črt

Če želimo, lahko s klikom na ikono (Slika 2.6 – ❶) avtomatsko prilagodimo velikost objekta na celotno prikazno okno, ki je v tistem trenutku aktivno. Takoj lahko opazimo, da se je (v našem primeru aktivnem levem prikaznem oknu v ravnini *X–Z*) razdalja med mrežnimi črtami B–1 in C–1

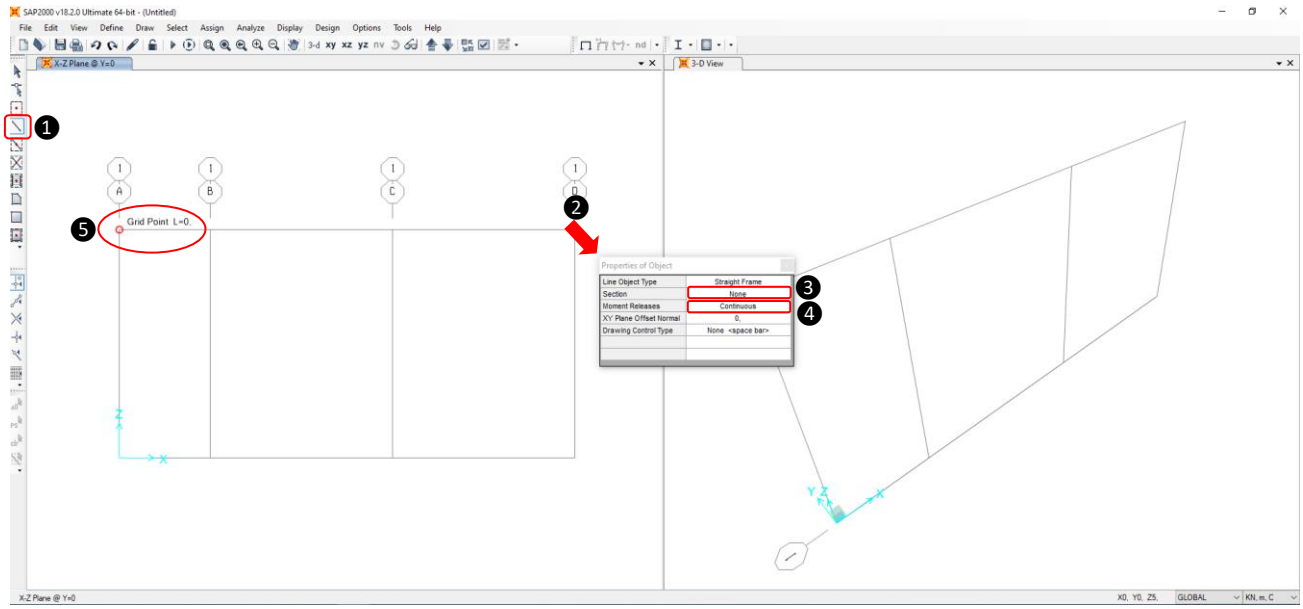
ter C–1 in D–1 povečala (Slika 2.6 – ❷). Prav tako lahko vidimo, da so se pomanjšali tudi mehurčki nad mrežnimi črtami (Slika 2.6 – ❸).



Slika 2.6: Izris popravljenih mrežnih črt

– *Diskretizacija konstrukcije: definiranje končnih elementov (topologije)*

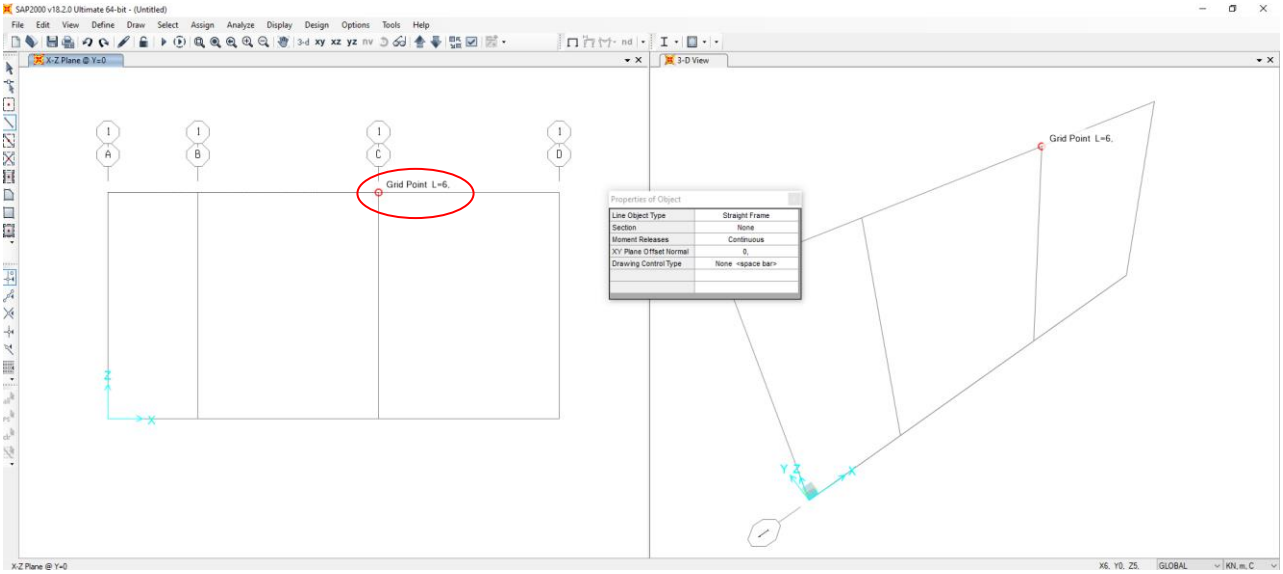
Za ta primer smo nekoliko spremenili vrstni red podajanja podatkov in smo (za razliko od prvega primera, kjer smo najprej definirali material) tokrat najprej definirali končne elemente s klikom na ikono v orodni vrstici (Slika 2.7 – ❶). Odpre se okno *Properties of Object* (Slika 2.7 – ❷). V drugi vrstici *Section* (za nedoločen prerez elementa) izberemo *None* (Slika 2.7 – ❸) namesto že predefiniranega prereza *FSEC1*, ki ga imamo na izbiro. Ker imamo v tretji vrstici *Moment Releases* na izbiro le dve možnosti (to sta *Pinned* in *Continuous*), bomo prvi končni element tipa členek–vpeto začasno definirali kot polno vpetega, tako da pustimo označeno *Continuous* (Slika 2.7 – ❹).



Slika 2.7: Izris prvega končnega elementa

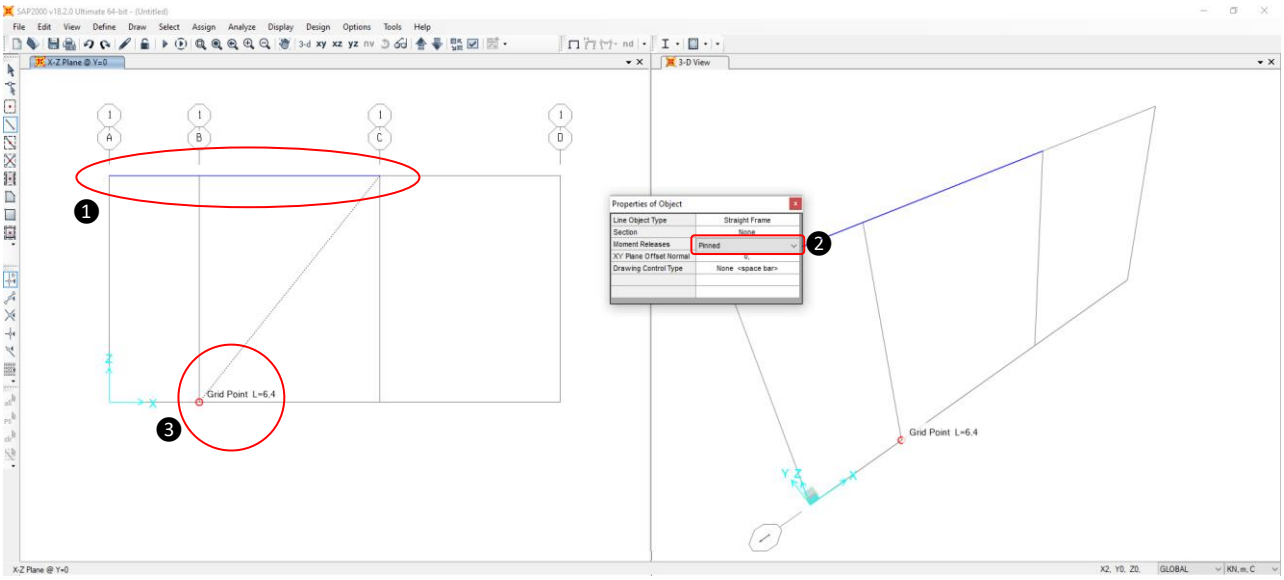
Tudi ostale nastavitve pustimo, kot so že bile predefinirane ob odprtju okna. Sledi izris prvega končnega elementa tipa vpeto–vpeto, tako da se s kazalcem postavimo v začetno vozlišče 1 in izbiro potrdimo s klikom. V izbranem vozlišču se poleg rdečega krogca izpiše *Grid Point L = 0.* (Slika 2.7 – ❺).

Nato kazalec vodimo do končnega vozlišča prvega končnega elementa (vozlišča 2), ki ga želimo najprej definirati. Ko s kazalcem dosežemo končno vozlišče, se ponovno izriše rdeči krogec, tokrat z napisom *Grid Point L = 6*, ki predstavlja dolžino končnega elementa (Slika 2.8).



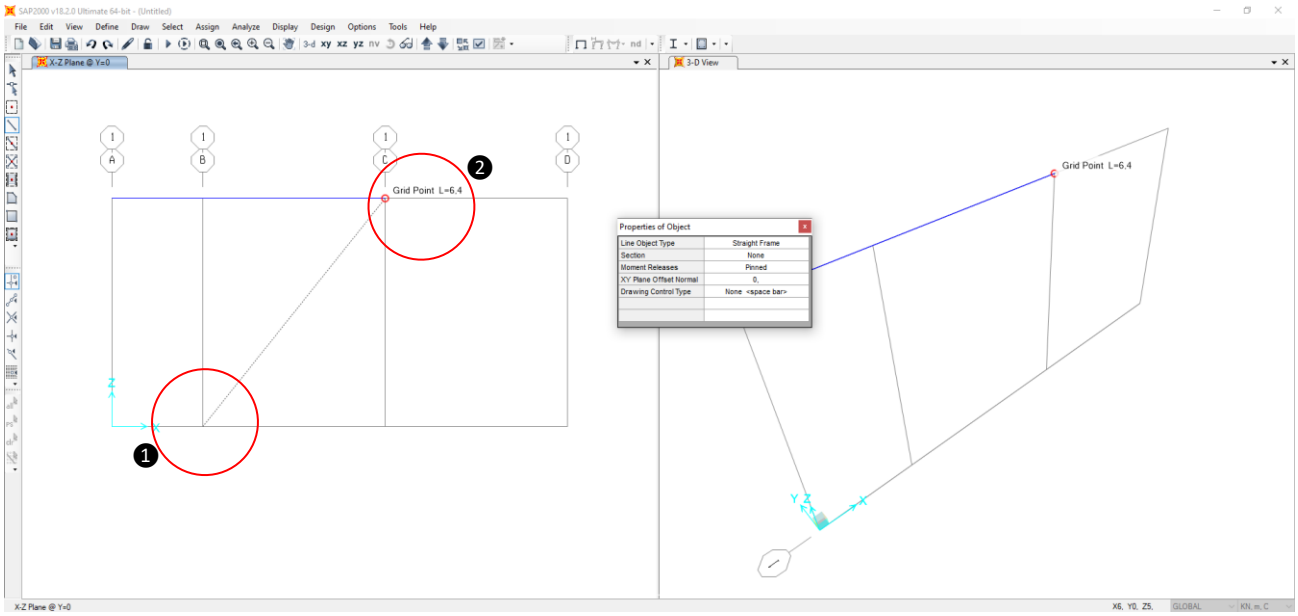
Slika 2.8: Izris prvega končnega elementa

S potrditvijo (s klikom na končno vozlišče) se izriše prvi končni element (Slika 2.9 – ❶). Za drugi končni element, ki ima na obeh straneh sproščene momente, v oknu *Properties of Object* v tretji vrstici *Moment Releases* izberemo *Pinned* namesto *Continuous* (Slika 2.9 – ❷). Uporabnik ima možnost, da kazalec brez prekinitve linije vodi dalje iz začetnega vozlišča 2 do končnega vozlišča 3 (Slika 2.9 – ❸). S klikom na levi gumb miške lahko potrdi izris drugega končnega elementa.



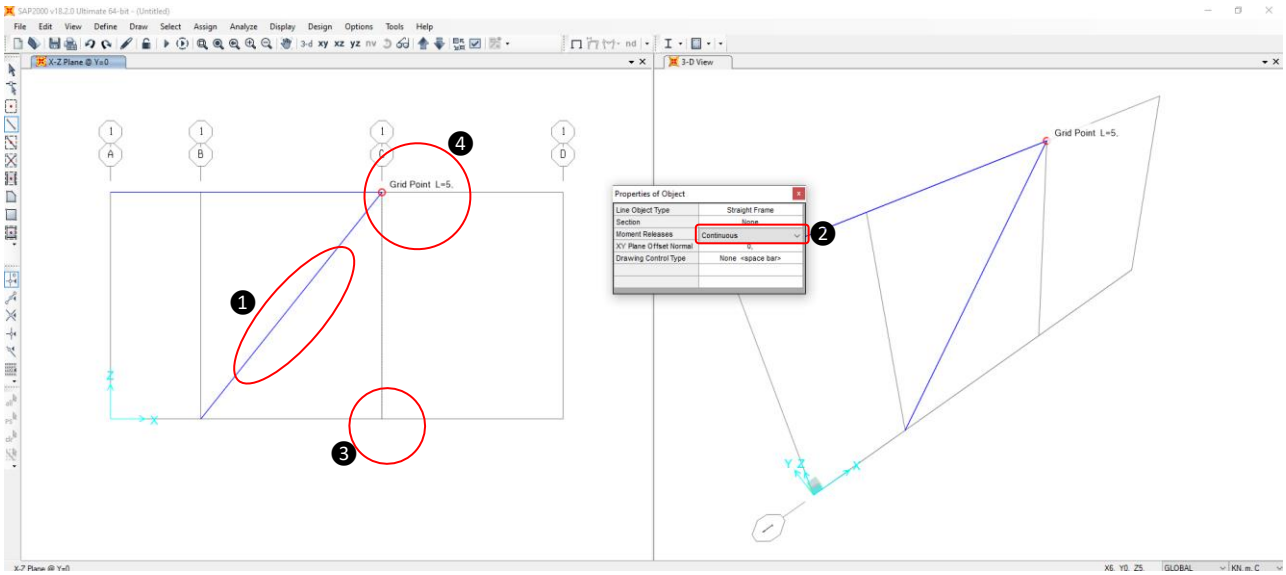
Slika 2.9: Definiran in izrisan prvi končni element

Pri izbrani diskretizaciji računskega modela konstrukcije (glej Slika 2.2, str 62) je končni element 2 usmerjen v nasprotno smer, torej z začetnega volišča 3 proti končnemu vozlišču 2. Zato izris linije, ki trenutno poteka z vozlišča 2, s klikom na desni gumb miške prekinemo. S kazalcem se premaknemo v vozlišče 3 in ponovno z levim klikom potrdimo začetno vozlišče drugega končnega elementa (Slika 2.10 – ❶). Nato kazalec vodimo dalje do končnega vozlišča 2 (Slika 2.10 – ❷).



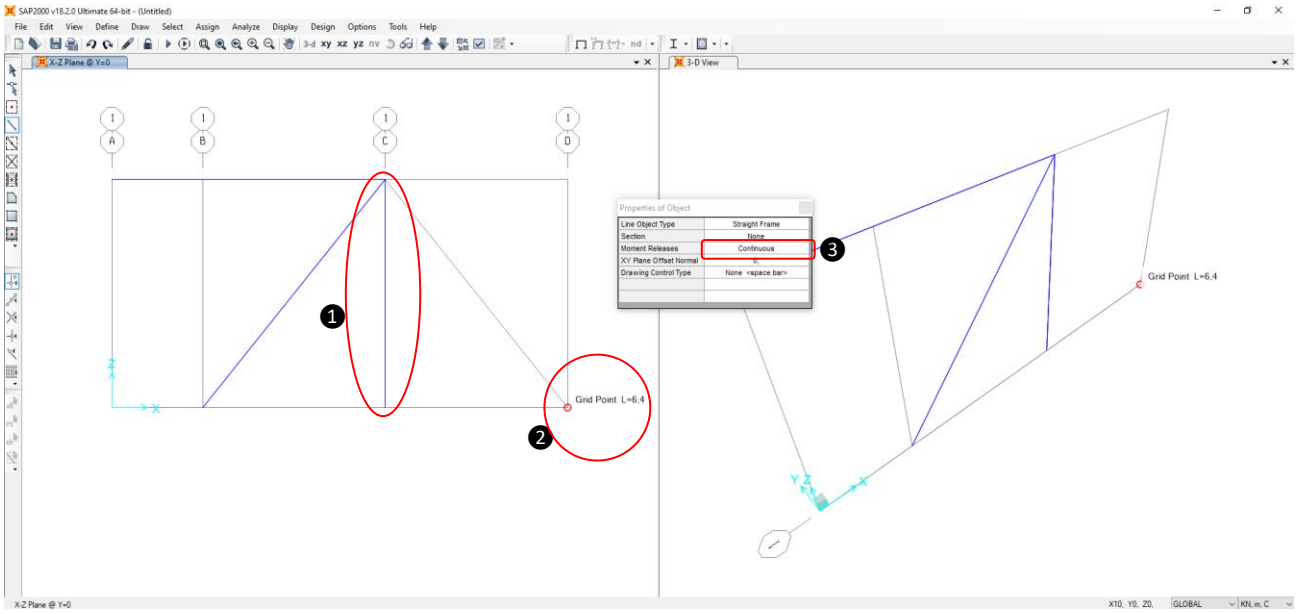
Slika 2.10: Definiranje in izris drugega končnega elementa

Ko se s kazalcem nahajamo v vozlišču 2, lahko potrdimo končno vozlišče in izriše se drugi končni element (Slika 2.11 – ❶). S klikom na desni gumb miške prekinemo nadaljnji izris linije z vozlišča 2. Za izris tretjega (polnovpetega) končnega elementa v oknu *Properties of Object* v tretji vrstici *Moment Releases* ponovno izberemo *Continuous* namesto *Pinned* (Slika 2.11 – ❷). S kazalcem se nato pomaknemo na vozlišče 4 in s klikom na levi gumb miške potrdimo začetno vozlišče elementa (Slika 2.11 – ❸) ter vodimo kazalec do končnega vozlišča 2, kjer se izpiše dolžina elementa (Slika 2.11 – ❹).



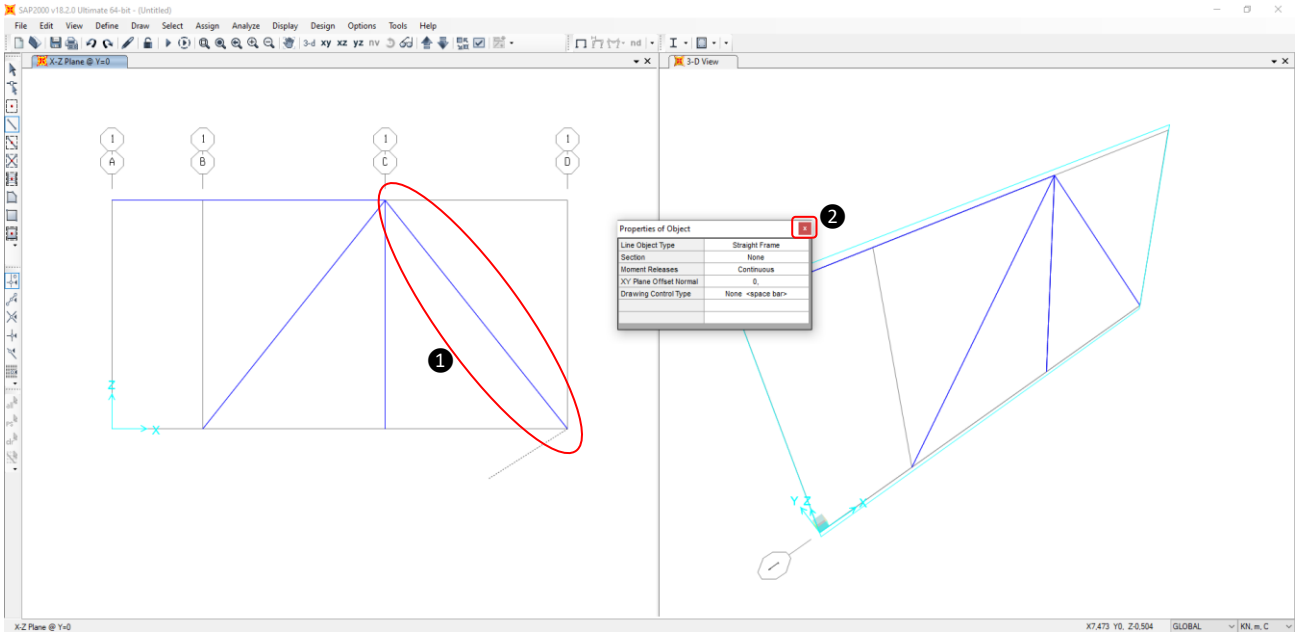
Slika 2.11: Definiranje in izris tretjega končnega elementa

Ponovno s klikom (na levi gumb miške) potrdimo in izriše se tretji končni element (Slika 2.12 – ❶). Kazalec nato vlečemo dalje do končnega vozlišča četrtega elementa, ki je v vozlišču 5 (Slika 2.12 – ❷). Čeprav je četrti končni element v računskem modelu označen kot tip vpeto–členek (glej Slika 2.2, str. 62), ga bomo začasno (iz istega razloga kot prvi končni element) modelirali kot polno vpetega, zato v oknu *Properties of Object* v tretji vrstici *Moment Releases* pustimo označeno *Continuous* (Slika 2.12 – ❸).



Slika 2.12: Definiranje in izris četrtega končnega elementa

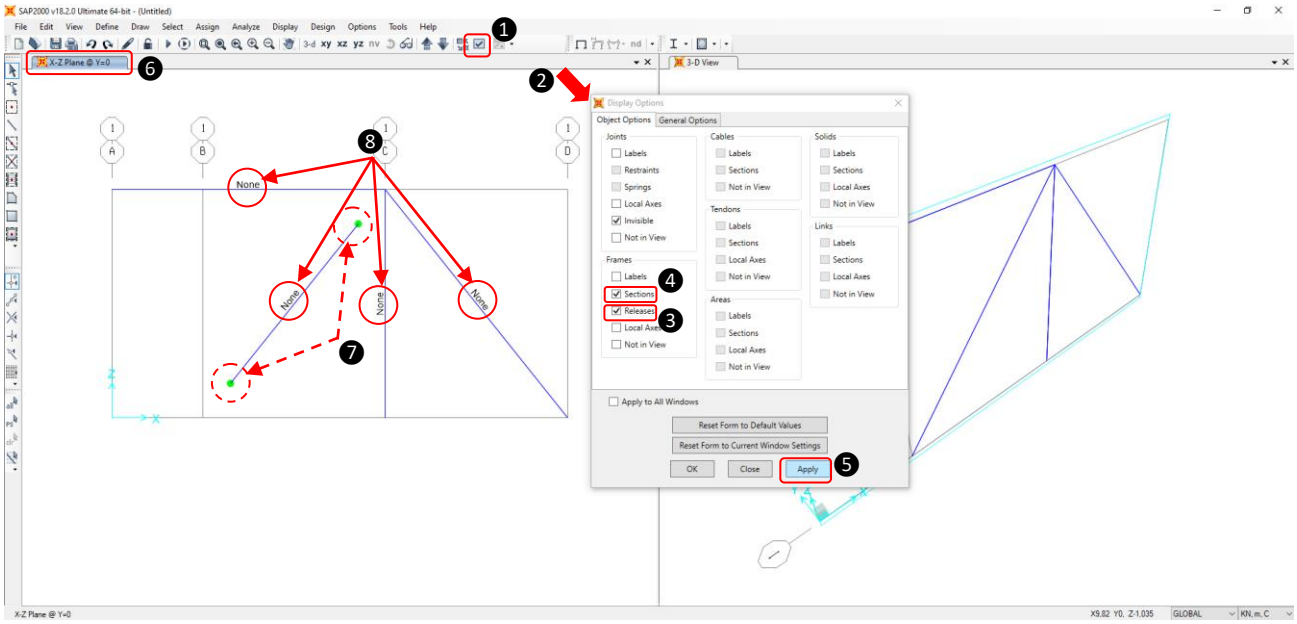
S klikom na levi gumb miške samo še potrdimo in izriše se zadnji (četrti) končni element (Slika 2.13 – ❶). Ko končamo z izrisom elementov, okno *Properties of Object* zapremo s klikom na križec (Slika 2.13 – ❷) ali najhitreje s pritiskom na tipko <Esc> na tipkovnici.



Slika 2.13: Definiran in izrisan četrti končni element

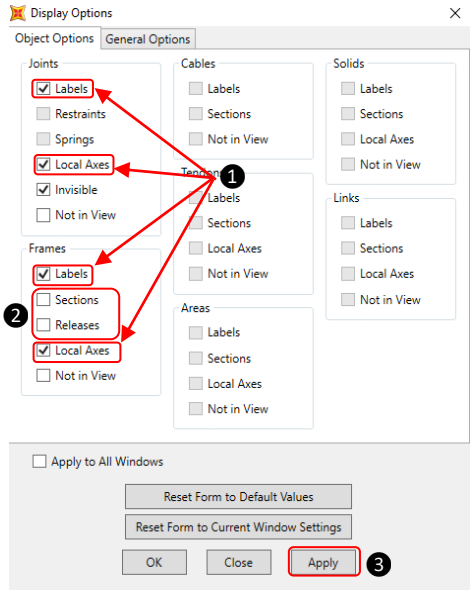
Sprostitve elementov niso grafično prikazane v nobenem izmed obeh pogledov (*X–Z* in *3D*). Če se želimo vizualno prepričati o korektnosti vseh izbranih sprostitev elementov, jih je mogoče grafično

prikazati. S klikom na ikono ☑ (Slika 2.14 – ❶) se odpre okno *Display Options* (Slika 2.14 – ❷) in v razdelku *Frames* označimo *Releases* (Slika 2.14 – ❸). Poleg sprostitev končnih elementov želimo prikazati tudi označbe definiranih prerezov elementov, zato označimo še *Sections* (Slika 2.14 – ❹). Vse skupaj potrdimo s klikom na *Apply* (Slika 2.14 – ❺). V aktivnem pogledu *X–Z* (Slika 2.14 – ❻) so zdaj (z zeleno obarvanimi krogci) prikazane vse sprostitve notranjih statičnih količin v vozliščih elementov (Slika 2.14 – ❼). Prav tako je nad vsakim elementom, ker prerez še ni definiran, izpisano ime *None* (Slika 2.14 – ❽).



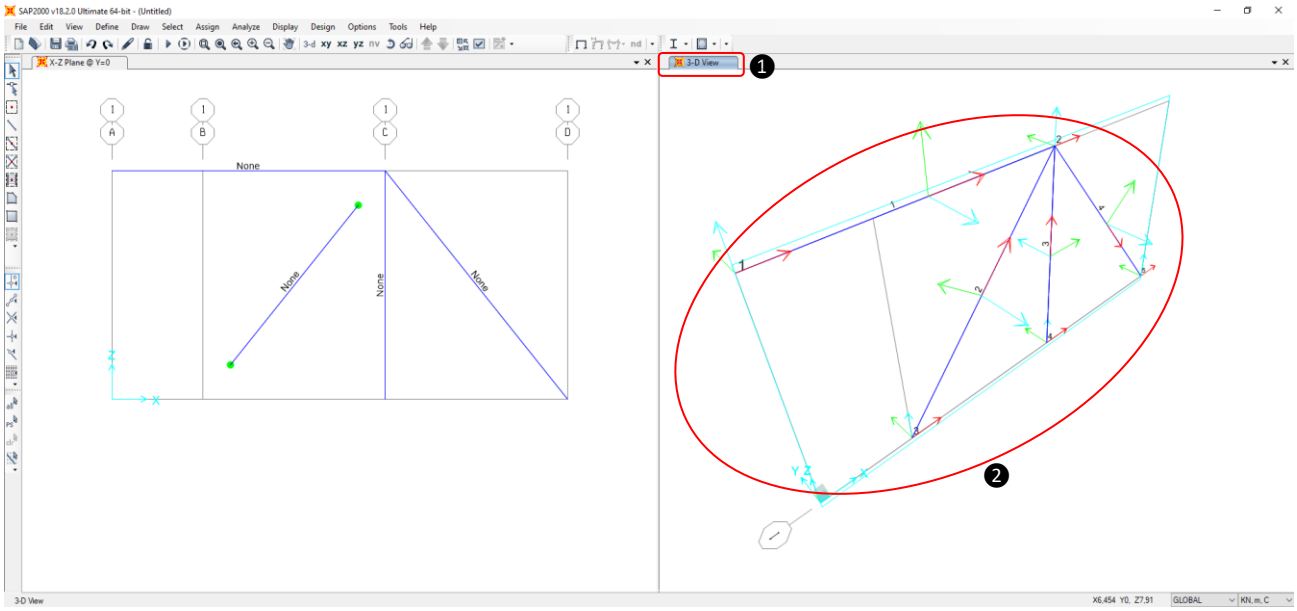
Slika 2.14: Nastavitve prikaza sprostitev in označb prerezov elementov

V 3D-pogledu lahko prikažemo še oznake in lokalne koordinatne sisteme vozlišč ter elementov tako, da v oknu *Display Options* v razdelkih *Joints* in *Frames* označimo *Labels* in *Local Axes* (Slika 2.15 – ❶). V razdelku *Frames* še odznačimo prej označena *Sections* in *Releases* (Slika 2.15 – ❷). Aktiviramo 3D-pogled (Slika 2.16 – ❶) in vse skupaj potrdimo s klikom na *OK* (Slika 2.15 – ❸).



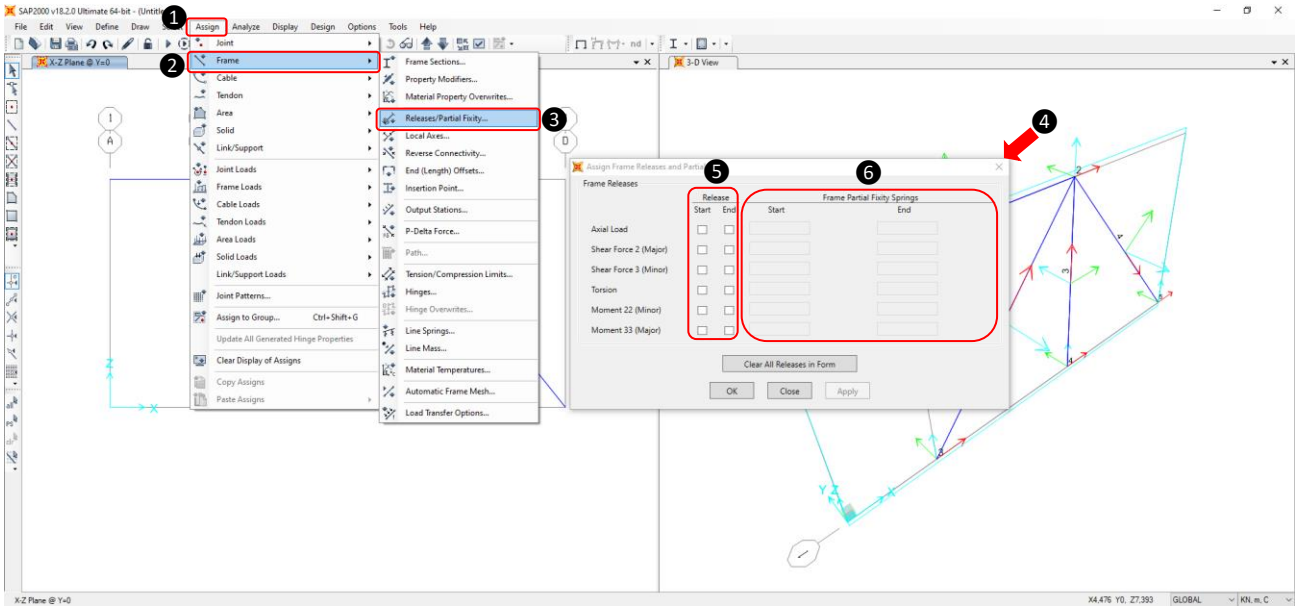
Slika 2.15: Nastavitve prikaza označb prerezov in lokalnih koordinatnih sistemov elementov in vozlišč

Okno *Diplay Options* se zapre, hkrati pa se v označenem desnem oknu (*3-D View*) prikažejo oznake vozlišč in končnih elementov, ki so oštevilčeni v takšnem zaporedju, kot so bili vneseni (Slika 2.16 – ❷).



Slika 2.16: Prikaz označb prerezov in lokalnih koordinatnih sistemov elementov in vozlišč v 3D-pogledu

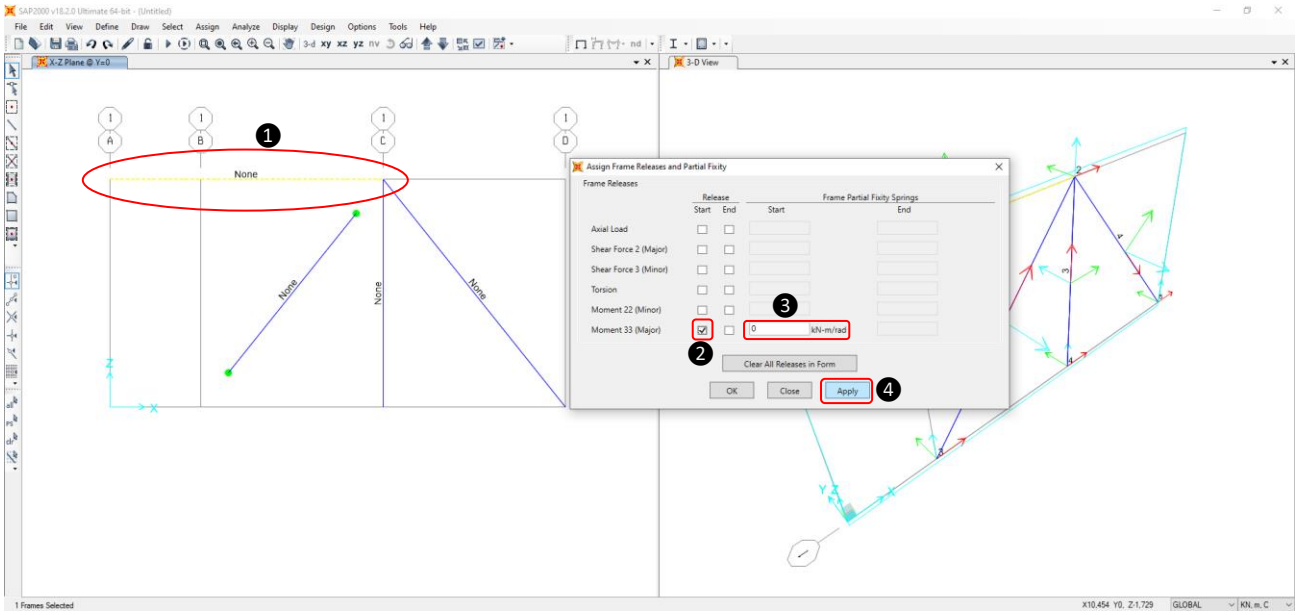
Sprostitev momenta, ki nastopi v vozliščih 1 in 5, lahko izvedemo na dva načina. Prva možnost je, da sprostitev momentov v obeh vozliščih definiramo z nepomično členkasto podporo. Druga (v tem primeru obravnavana) možnost je, da v vozliščih 1 in 5 sprostimo moment v vozliščih končnih elementov 1 in 4 ter nato obe vozlišči definiramo še z vpeto podporo. V tem primeru v glavnem meniju kliknemo na *Assign* (Slika 2.17 – ❶), nato se v visečem meniju pomaknemo na *Frame* (Slika 2.17 – ❷) in zopet z levim klikom dokončno izberemo *Releases/Partial Fixity ...* (Slika 2.17 – ❸).



Slika 2.17: Nastavitev sprostitev notranjih statičnih količin v vozliščih elementov

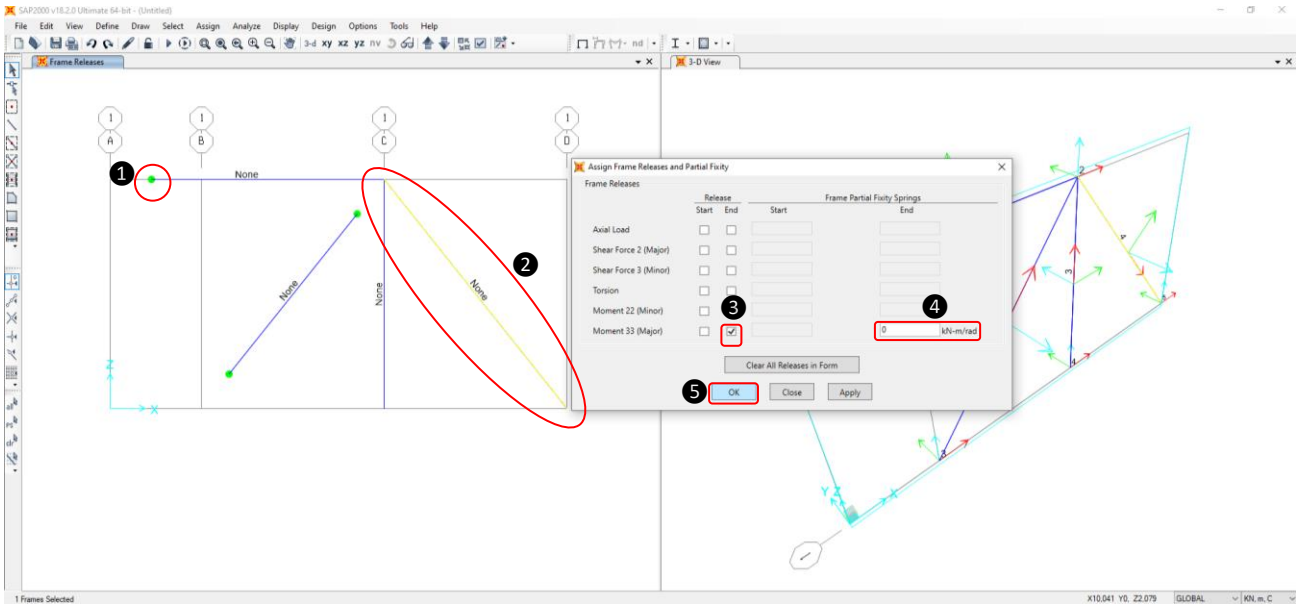
Odpre se okno *Assign Frame Releases and Partial Fixity* (Slika 2.17 – ❹), kjer lahko v razdelku *Release* definiramo poljubne sprostitve (izmed šestih statičnih količin) začetnega in končnega vozlišča izbranega končnega elementa (Slika 2.17 – ❺). Razdelek *Frame Partial Fixity Springs* pa omogoča, da statične količine, ki so sproščene v vozliščih, nadomestimo z ustrezno rotacijsko ali translacijsko togostjo (Slika 2.17 – ❻).

Za sprostitev momentov v začetnem vozlišču 1 prvega končnega elementa najprej s klikom označimo element, ki se obarva se rumeno (Slika 2.18 – ❶). Glede na lokalni koordinatni sistem elementa, ki je razviden iz 3D-pogleda v desnem oknu, v razdelku *Frame Releases* pri *Moment 33 (Major)* izberemo *Start* (Slika 2.18 – ❷), ki predstavlja začetno vozlišče končnega elementa. Hkrati se v razdelku *Frame Partial Fixity Springs* odpre možnost definiranja togosti rotacijske vzmeti začetnega vozlišča (*Start*). Razdelek pustimo s predefinirano vrednostjo 0 (Slika 2.18 – ❸). Vse skupaj potrdimo s klikom na *Apply* (Slika 2.18 – ❹).



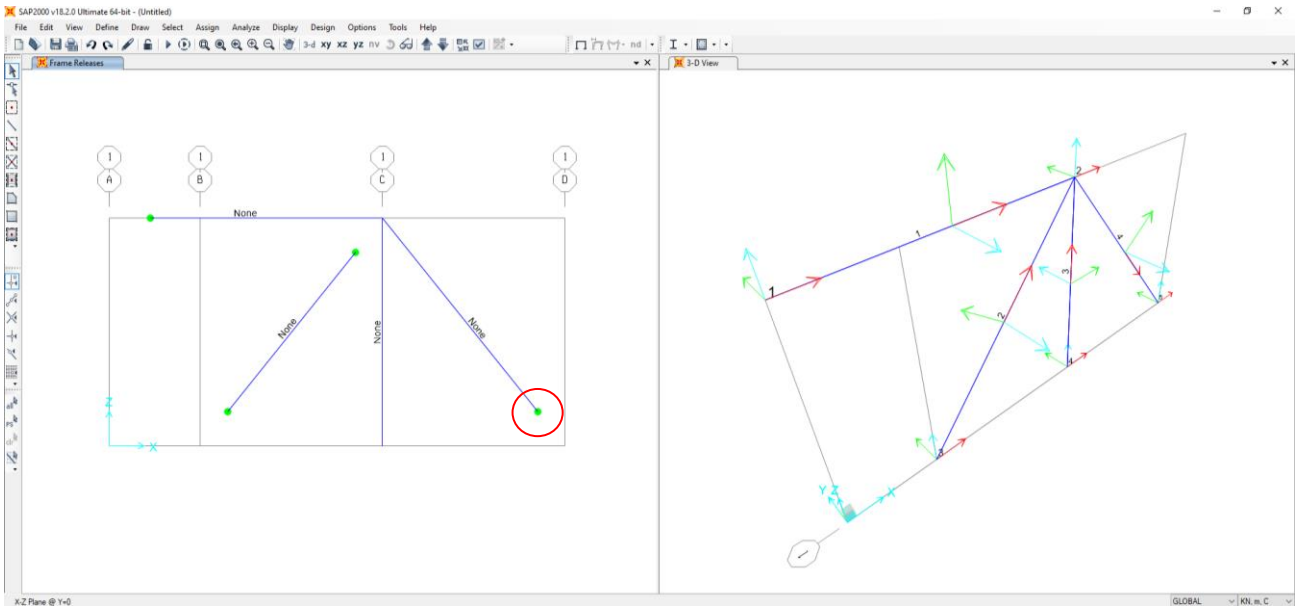
Slika 2.18: Sprostitev upogibnega momenta v prvem končnem elementu

S potrditvijo se v obeh pogledih grafično prikaže sprostitev upogibnega momenta v vozlišču 1 (Slika 2.19 – ❶). Analogno ponovimo postopek še za četrti končni element, ki ga najprej označimo (Slika 2.19 – ❷). Nato izvedemo sprostitev momentov v končnem vozlišču 5 četrtega končnega elementa, tako da v razdelku *Frame Releases* pri *Moment 33 (Major)* izberemo *End* (Slika 2.19 – ❸). Hkrati se v razdelku *Frame Partial Fixity Springs* odpre možnost definiranja togosti rotacijske vzmeti končnega vozlišča (*End*). Razdelek ponovno pustimo s predefinirano vrednostjo 0 (Slika 2.19 – ❹). Vse skupaj potrdimo s klikom na ikono *OK* (Slika 2.19 – ❺).



Slika 2.19: Sprostitev upogibnega momenta v četrtem končnem elementu

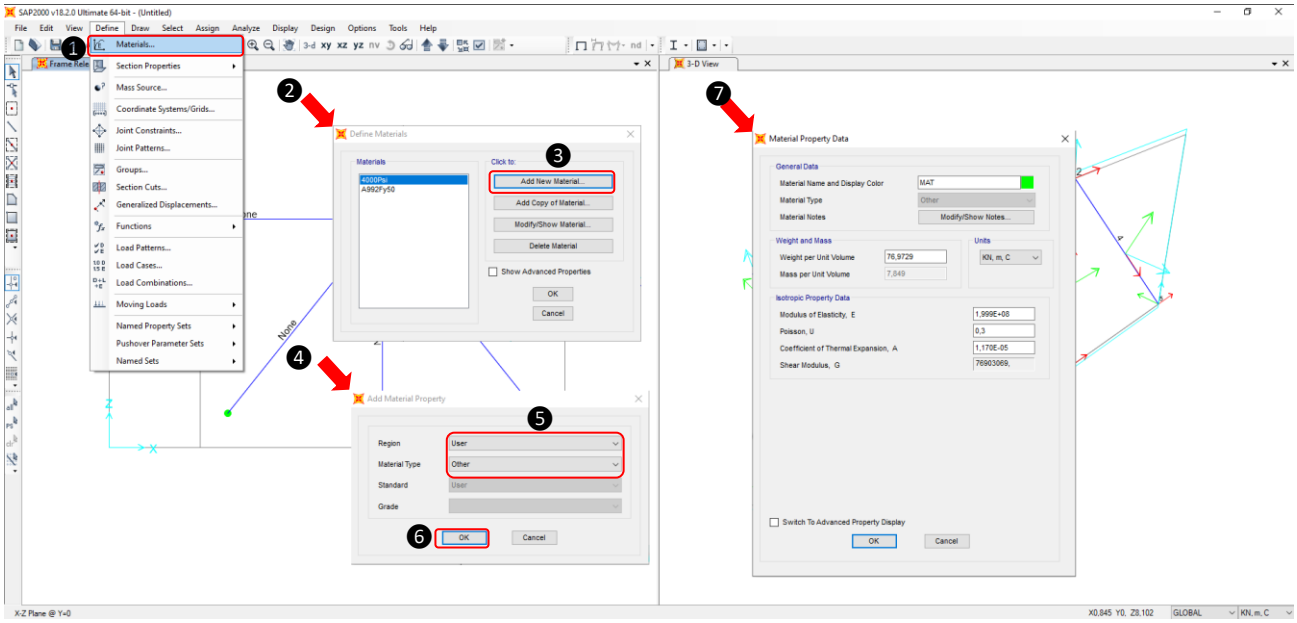
S potrditvijo se okno zapre in se hkrati v pogledu *X–Z* grafično prikaže še sprostitev upogibnega momenta v vozlišču 5 (Slika 2.20).



Slika 2.20: Sprostitve elementov na konstrukciji v pogledu *X–Z*

– Diskretizacija konstrukcije: definiranje lastnosti parametrov materiala

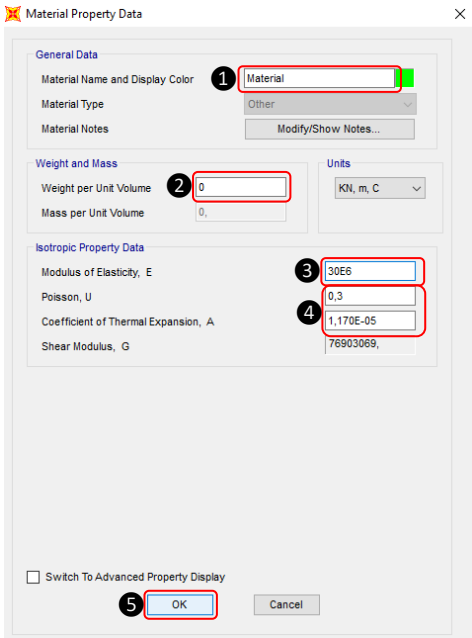
Material definiramo tako, da v visečem meniju *Define* izberemo *Materials* … (Slika 2.21 – ❶). Ko se odpre okno *Define Materials* (Slika 2.21 – ❷) v razdelku *Click to:* izberemo *Add New Material* …(Slika 2.21 – ❸). Odpre se okno *Add Material Property* (Slika 2.21 – ❹). Ker je edini znani podatek za material vrednost elastičnega modula, izberemo *User* za regijo (*Region*), za tip materiala (*Material Type*) pa izberemo *Other* (Slika 2.21 – ❺). Nato izbiro potrdimo z *OK* (Slika 2.21 – ❻). Odpre se okno *Material Property Data* (Slika 2.21 – ❼).



Slika 2.21 Definiranje materiala

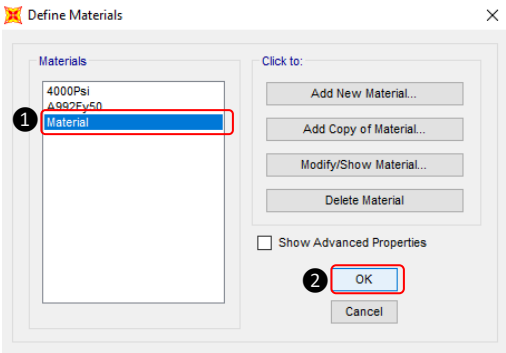
V razdelku *General Data* čisto na vrhu okna za ime materiala izberemo na primer *Material* (Slika 2.22 – ❶). V razdelku *Weight and Mass* v okencu poleg *Weight per Unit Volume* določimo

specifično težo. Ker v izračunu lastne teže konstrukcije ne upoštevamo, bomo namesto predefinirane vrednosti izbrali vrednost nič (Slika 2.22 – ❷). V spodnjem razdelku *Isotropic Property Data* v okence *Modulus of Elasticity, E* za elastični modul, ki znaša E = $30 \cdot 10^6$ kPa, vpišemo vrednost 30E6 (Slika 2.22 – ❸). Ker v navodilih naloge ni podan Poissonov količnik, v izračunu ne bomo upoštevali vpliva strižnih sil. Prav tako konstrukcija ni temperaturno obremenjena. Torej bomo okenca *Poisson, U* in *Coefficient of Thermal Expansion, A* pustili z že predefiniranimi vrednostmi Poissonovega količnika in koeficienta termalnega raztezanja (Slika 2.22 – ❹). Vse skupaj dokončno potrdimo z *OK* (Slika 2.22 – ❺).



Slika 2.22: Definiranje materiala

V oknu *Define Materials* se v razdelku *Materials* izpiše na novo definiran material z izbranim imenom *Material* (Slika 2.23 – ❶), Material dokončno definiramo z levim klikom na *OK* (Slika 2.23 – ❷).

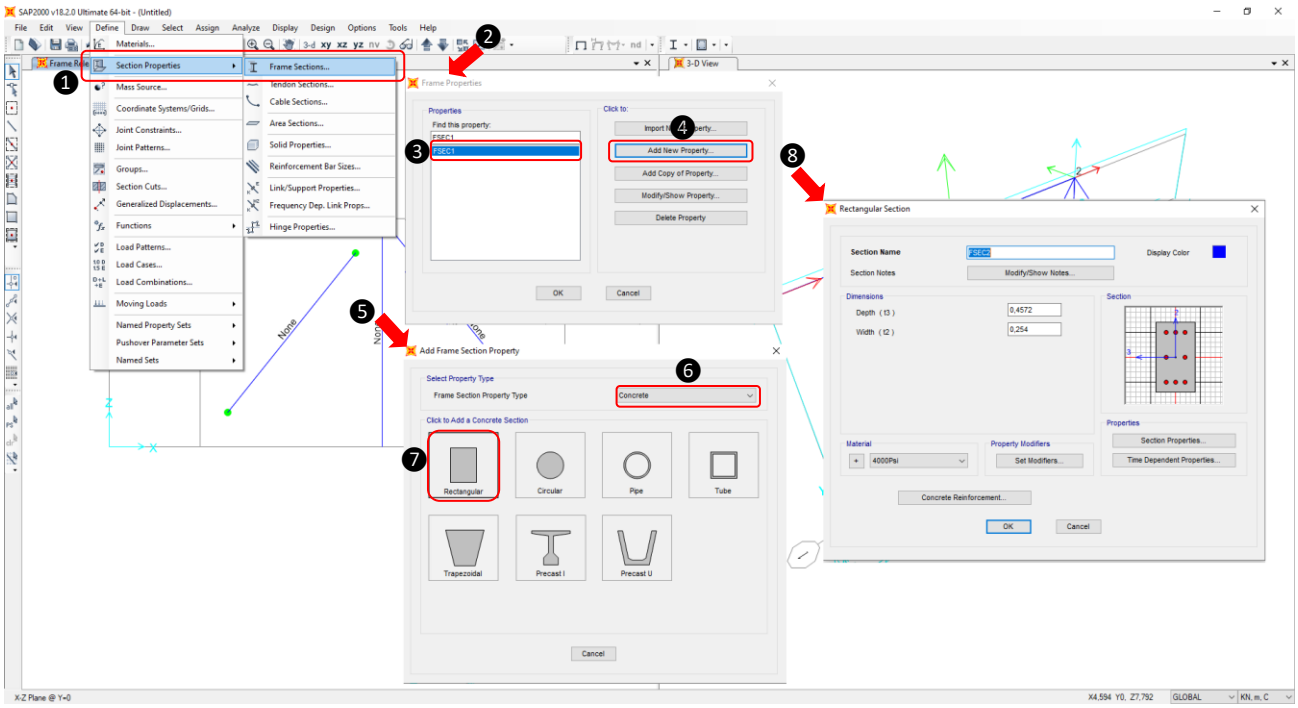


Slika 2.23: Definiranje materiala

– *Diskretizacija konstrukcije: definiranje prereza*

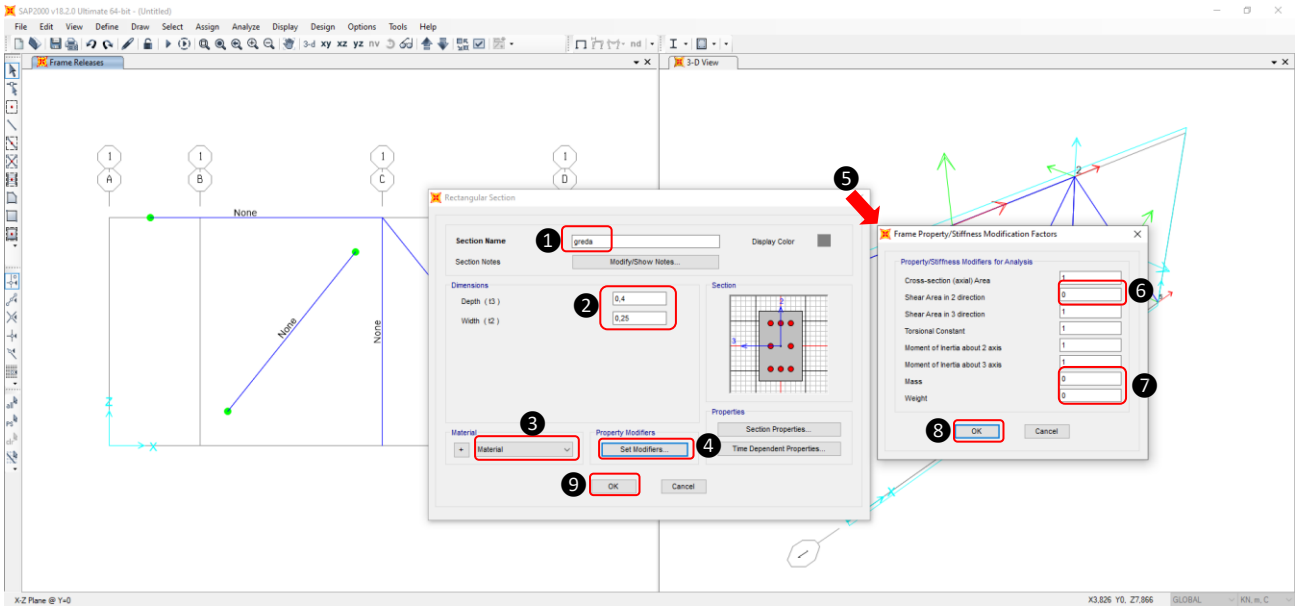
Za definiranje prereza se v visečem meniju *Define* pomaknemo na *Section Properties* in izberemo *Frame Sections* ...(Slika 2.24 – ❶). Odpre se novo okno *Frame Properties* (Slika 2.24 – ❷). V razdelku *Properties* že obstaja predefiniran prerez z imenom *FSEC1* (Slika 2.24 – ❸). Program ga

je samodejno definiral, ker smo namesto prereza najprej definirali končne elemente. Za definiranje novega prereza v razdelku *Click to:* kliknemo na ikono *Add New Property* (Slika 2.24 – ❹). Odpre se okno *Add Frame Section Property* (Slika 2.24 – ❺). V razdelku *Select Property Type* lahko namesto izbire *Steel* (kot smo to storili pri prvem primeru) na seznamu izberemo *Concrete* (Slika 2.24 – ❻), saj prav tako vsebuje geometrijo pravokotnega prereza. V razdelku *Click to Add a Concrete Section* izberemo pravokotni prerez (*Rectangular*), ki ga s klikom na ikono pravokotnika potrdimo (Slika 2.24 – ❼). Odpre se okno *Rectangular Section* (Slika 2.24 – ❽).



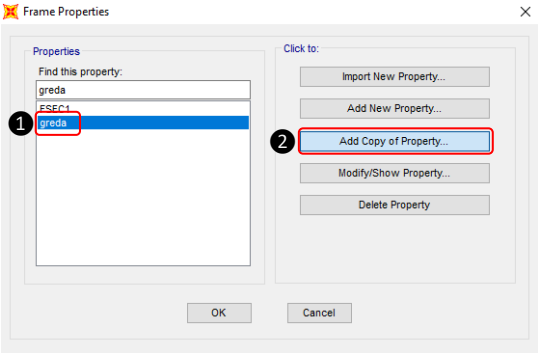
Slika 2.24: Definiranje pravokotnega prereza

Najprej definiramo vodoravno in poševno gredo oziroma končna elementa 1 in 4 z istim imenom (ker imata enak prerez). V razdelku *Section Name* namesto podanega imena *FSEC2* izberemo na primer *greda* (Slika 2.25 – ❶). V razdelku *Dimensions* za globino prereza (*Depth*), ki poteka v smeri 2 lokalnega koordinatnega sistema končnega elementa, izberemo 0,4 m in za širino (*Width*), ki poteka v smeri 3, izberemo 0,25 m (Slika 2.25 – ❷, glej ***Opomba 4***, str. 18). V razdelku *Material* izberemo definirani material z imenom Material (Slika 2.25 – ❸). V razdelku *Property Modifiers* kliknemo na ikono *Set Modifiers* ... (Slika 2.25 – ❹). Odpre se okno *Frame Property/Stiffness Modification Factors* (Slika 2.25 – ❺). Vpliv strižnih deformacij v smeri *Z* globalnega koordinatnega sistema (torej v smeri 2 lokalnega koordinatnega sistema elementa) smo zanemarili tako, da smo v okencu poleg *Shear Area in 2 direction* vpisali vrednost nič (Slika 2.25 – ❻). Izbrali smo tudi, da sta modifikatorja za maso in težo nič (Slika 2.25 – ❼). Ostale količine smo pustili, kot so bile predefinirane. Na koncu vse skupaj še potrdimo z *OK* (Slika 2.25 – ❽). Izbrane nastavitve še enkrat s klikom na *OK* potrdimo v oknu *Rectangular Section* (Slika 2.25 – ❾).



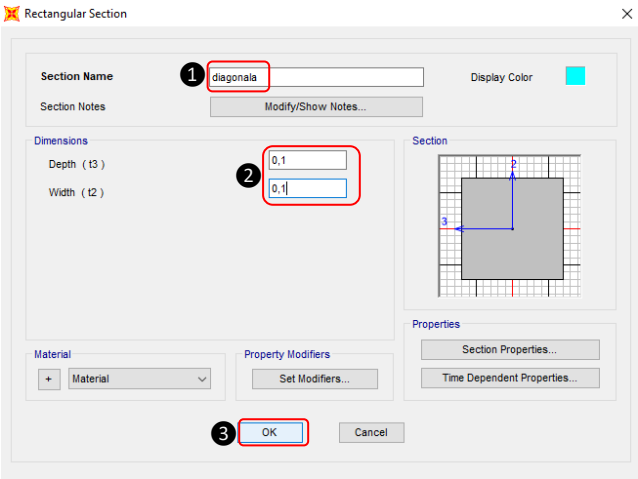
Slika 2.25: Definiranje pravokotnega prereza grede

V oknu *Frame Properties* se na seznamu pojavi pravkar definiran in hkrati z modro označen prerez z izbranim imenom *greda* (Slika 2.26 – ❶). Ostala še nedefinirana prereza (diagonala in steber) se od grede razlikujeta samo po dimenzijah, zato ju najhitreje definiramo tako, da ustvarimo kopijo prereza grede, tako da v razdelku *Click to:* izberemo ikono *Add Copy of Property* ... (Slika 2.26 – ❷) in hkrati pazimo, da je na seznamu označen prerez z imenom *greda*.



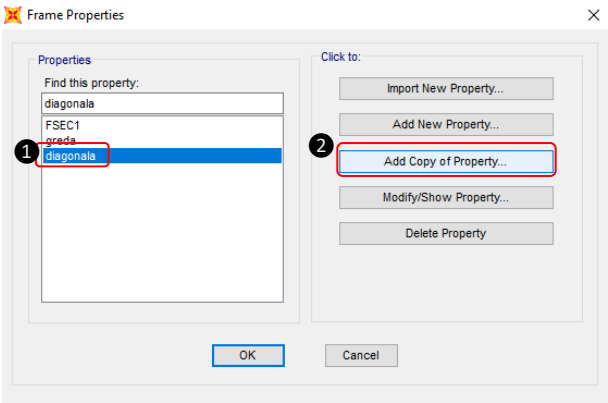
Slika 2.26: Definiranje pravokotnega prereza grede

Ponovno se odpre okno *Rectangular Section* z enakimi podatki že definiranega prereza *greda*. Predefinirano ime prereza *FSEC2* v razdelku *Section Name* spremenimo na primer v ime *diagonala* (Slika 2.27 – ❶). V razdelku *Dimensions* vpišemo dimenziji prereza diagonale (Slika 2.27 – ❷, glej ***Opomba 4***, str. 18). Vse skupaj samo še potrdimo z *OK* (Slika 2.27 – ❸).



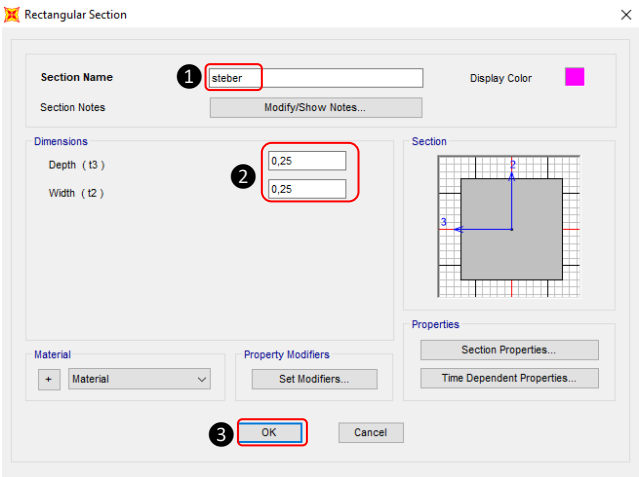
Slika 2.27: Definiranje pravokotnega prereza diagonale

V oknu *Frame Properties* se na seznamu definiranih prerezov prikaže *diagonala* (Slika 2.28 – ❶). Na enak način, kot smo definirali diagonalo, lahko s klikom na ikono *Add Copy of Property ...* (Slika 2.28 – ❷) definiramo še prerez stebra. Hkrati pazimo, da je na seznamu označen ustrezen prerez. V tem primeru je označena *diagonala* (lahko bi bila označena tudi *greda*), ker ima podobne materialne in geometrijske karakteristike kot steber.



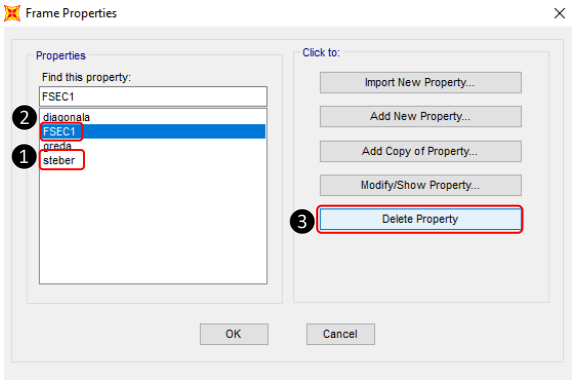
Slika 2.28: Definiranje pravokotnega prereza diagonale

Odpre se okno *Rectangular Section* z enakimi podatki že definiranega prereza *diagonala*. Predefinirano ime prereza *FSEC2* v razdelku *Section Name* spremenimo v ime *steber* (Slika 2.29 – ❶). V razdelku *Dimensions* vpišemo dimenziji prereza stebra (Slika 2.29 – ❷, glej ***Opomba 4***, str. 18). Vse skupaj samo še potrdimo z izborom *OK* (Slika 2.29 – ❸).



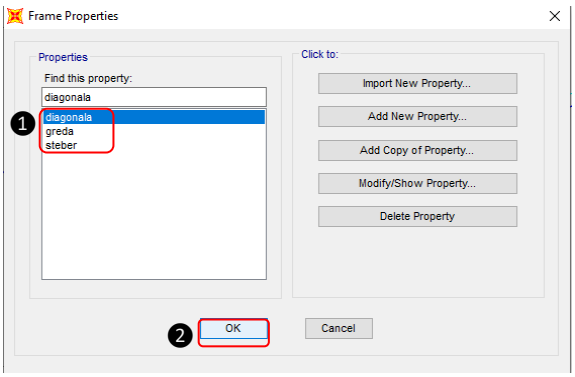
Slika 2.29: Definiranje pravokotnega prereza stebra

V oknu *Frame Properties* se na seznamu vseh definiranih prerezov pojavi še prerez *steber* (Slika 2.30 – ❶). Za nadaljnjo analizo nepotreben predefiniran prerez *FSEC1* lahko uporabnik, potem ko ga označi (Slika 2.30 – ❷), po želji odstrani s klikom na ikono *Delete Property* (Slika 2.30 – ❸).



Slika 2.30: Odstranjevanje odvečnega predefiniranega prereza

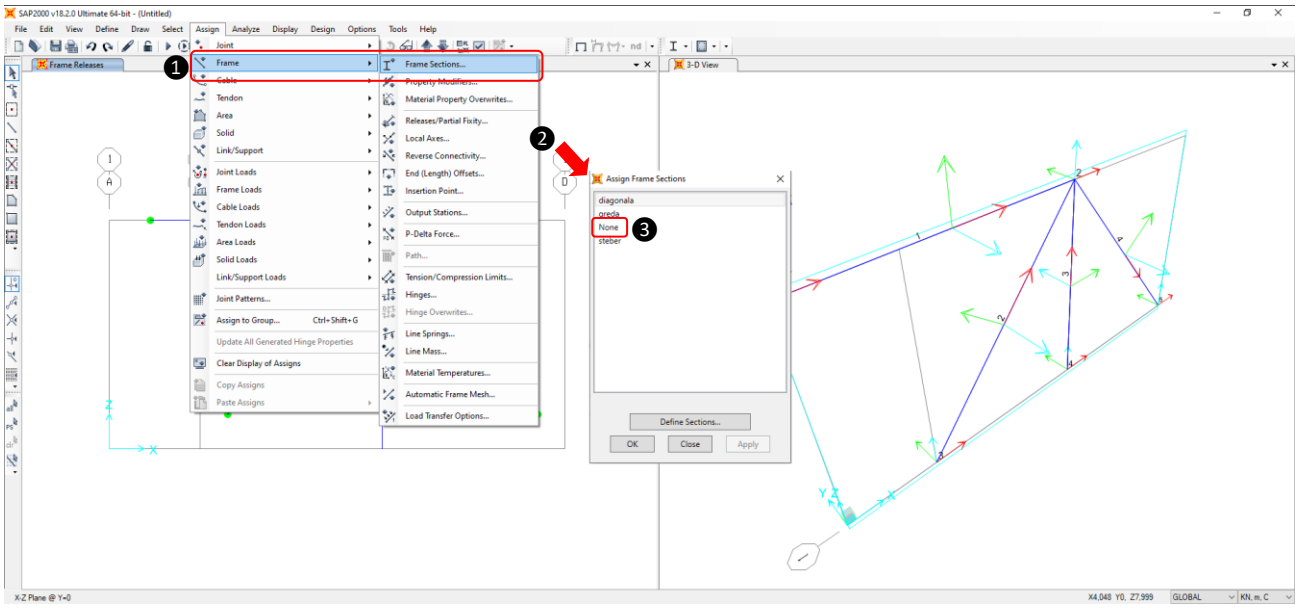
Iz seznama prerez *FSEC1* izgine in ostanejo samo vsi na novo definirani prerezi (Slika 2.31 – ❶). Ker so vsi potrebni prerezi definirani, lahko okno *Frame Properties* zapremo s klikom na ikono *OK* (Slika 2.31 – ❷).



Slika 2.31: Definiranje pravokotnega prereza stebra

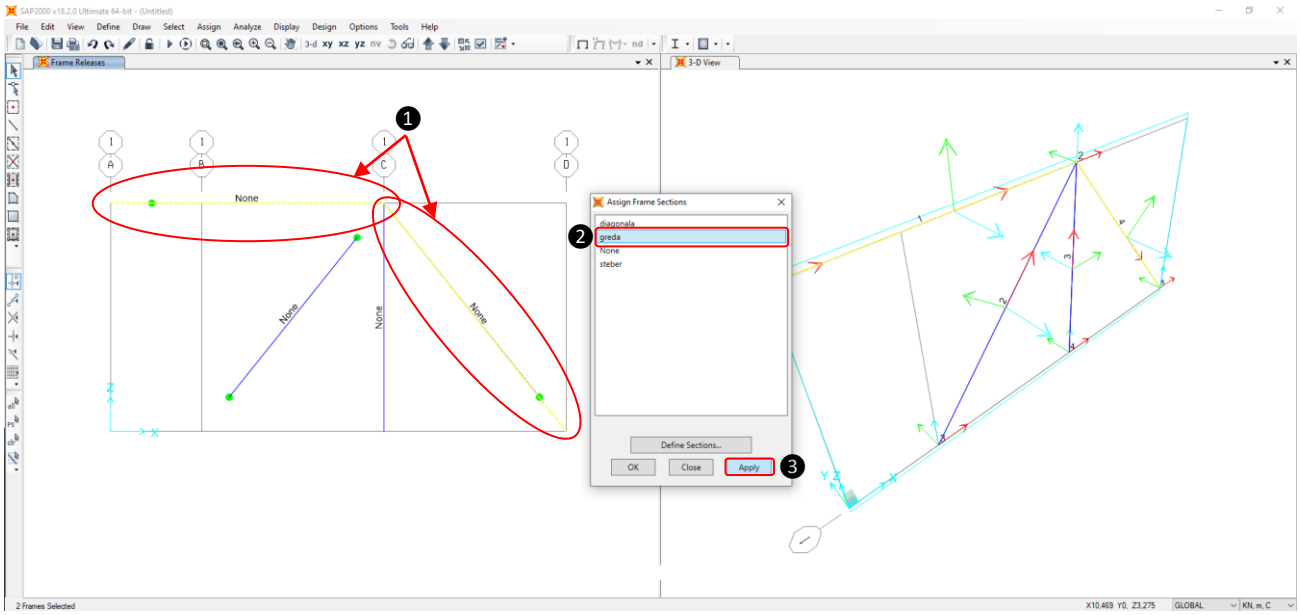
– *Diskretizacija konstrukcije: definiranje lastnosti posameznih končnih elementov*

Definirane lastnosti prerezov dodelimo končnim elementom tako, da se v visečem meniju *Assign* pomaknemo na *Frame* in nato izberemo *Frame Sections* ... (Slika 2.32 – ❶). Odpre se okno *Assign Frame Sections*, kjer so na seznamu na razpolago vsi definirani prerezi, ki jih lahko zdaj po poljubnem vrstnem redu podamo h končnim elementom (Slika 2.32 – ❷). Za morebitni še nedefiniran končni element je na seznamu tudi možnost *None* (Slika 2.32 – ❸).



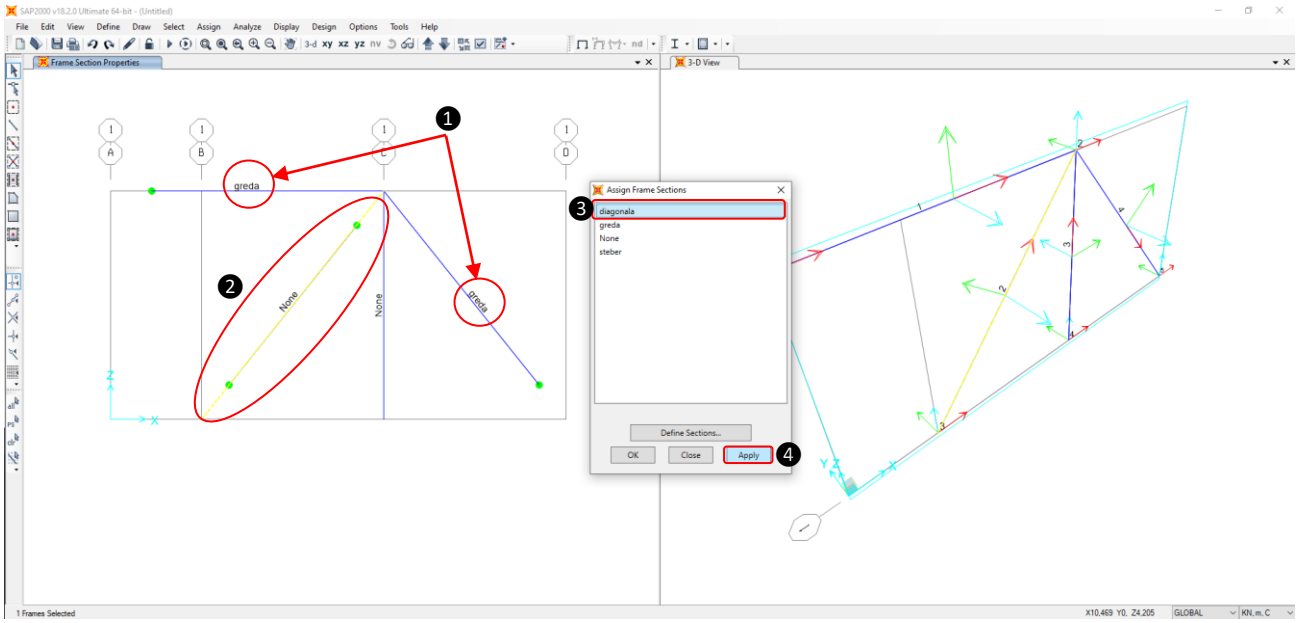
Slika 2.32: Dodelitev prereza končnim elementom

Povsem poljubno lahko najprej označimo prvi in četrti končni element, ki imata enak prerez (Slika 2.33 – ❶). Nato na seznamu izberemo prerez *greda*, ki pripada obema končnima elementoma (Slika 2.33 – ❷). Izbiro še samo dokončno potrdimo s klikom na *Apply* (Slika 2.33 – ❸).



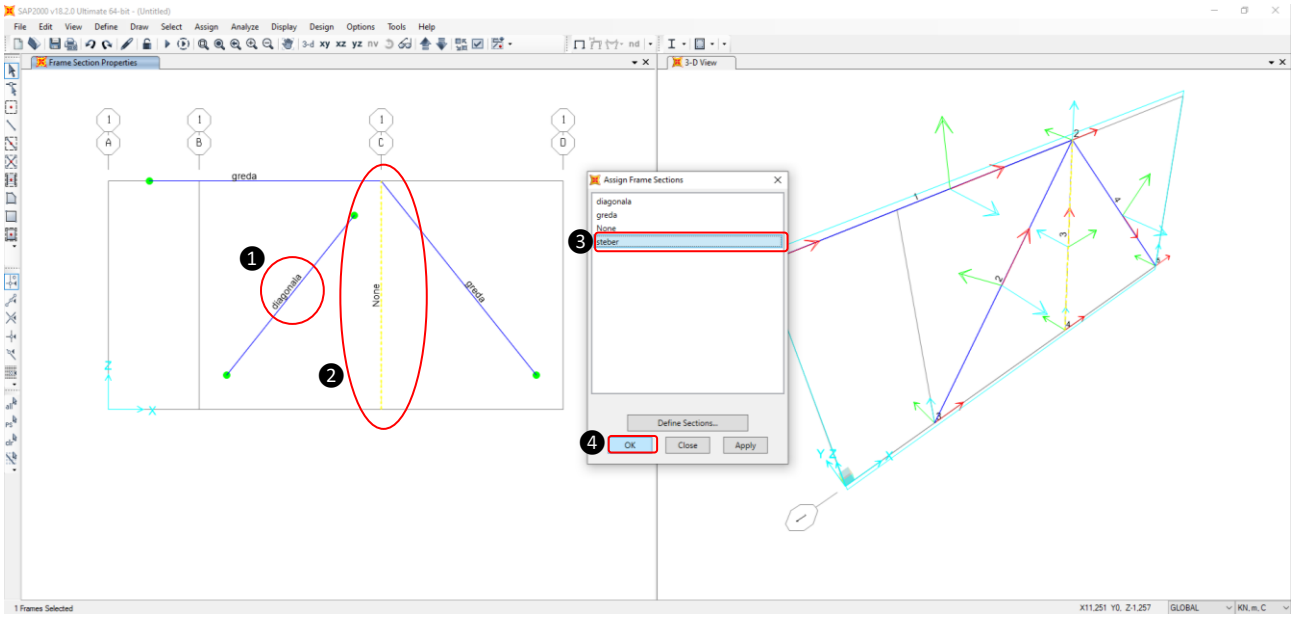
Slika 2.33: Dodelitev prereza prvemu in četrtemu končnem elementu

V označenem pogledu *X–Z* se nad obema elementoma izpiše podan prerez *greda* (Slika 2.34 – ❶). Nato označimo drugi končni element (Slika 2.34 – ❷). Na seznamu izberemo pripadajoči prerez *diagonala* (Slika 2.34 – ❸) in izbor ponovno potrdimo z *Apply* (Slika 2.34 – ❹).



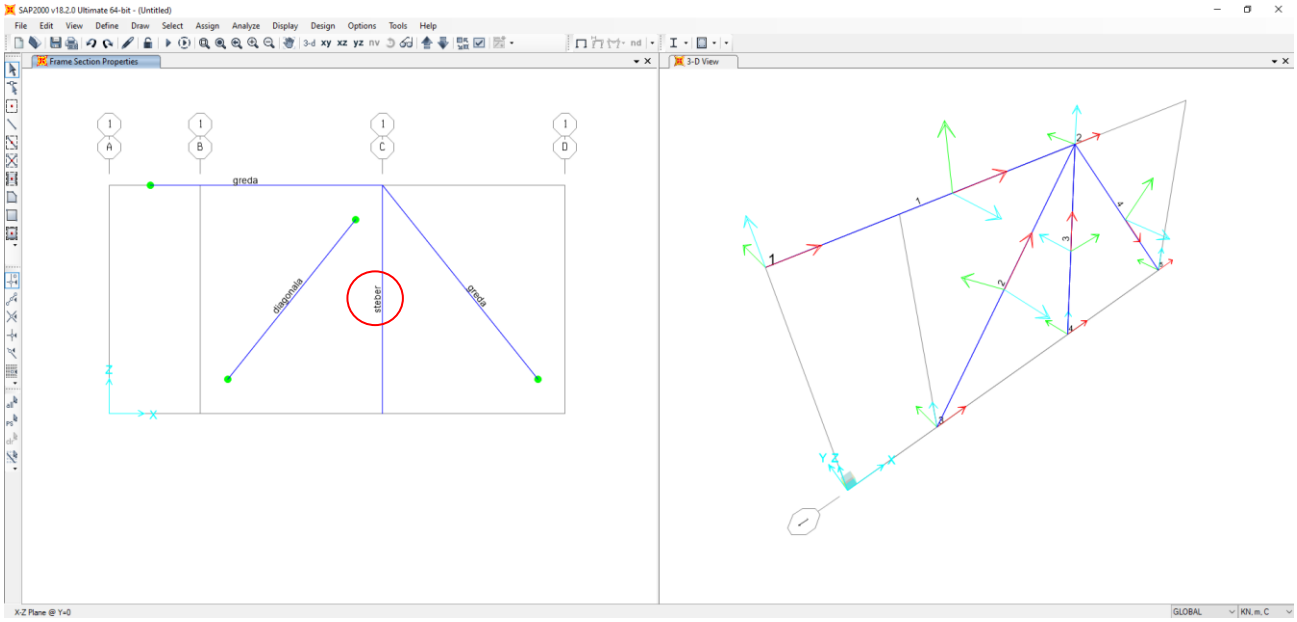
Slika 2.34: Dodelitev prereza drugemu končnemu elementu

V označenem pogledu *X–Z* se nad drugim končnim elementom izpiše *diagonala* (Slika 2.35 – ❶). Postopek ponovimo še za zadnji nedefiniran tretji končni element, ki ga najprej označimo (Slika 2.35 – ❷). Na seznamu izberemo pripadajoči prerez *steber* (Slika 2.35 – ❸) in izbor potrdimo z *OK* (Slika 2.35 – ❹).



Slika 2.35: Dodelitev prereza drugemu končnemu elementu

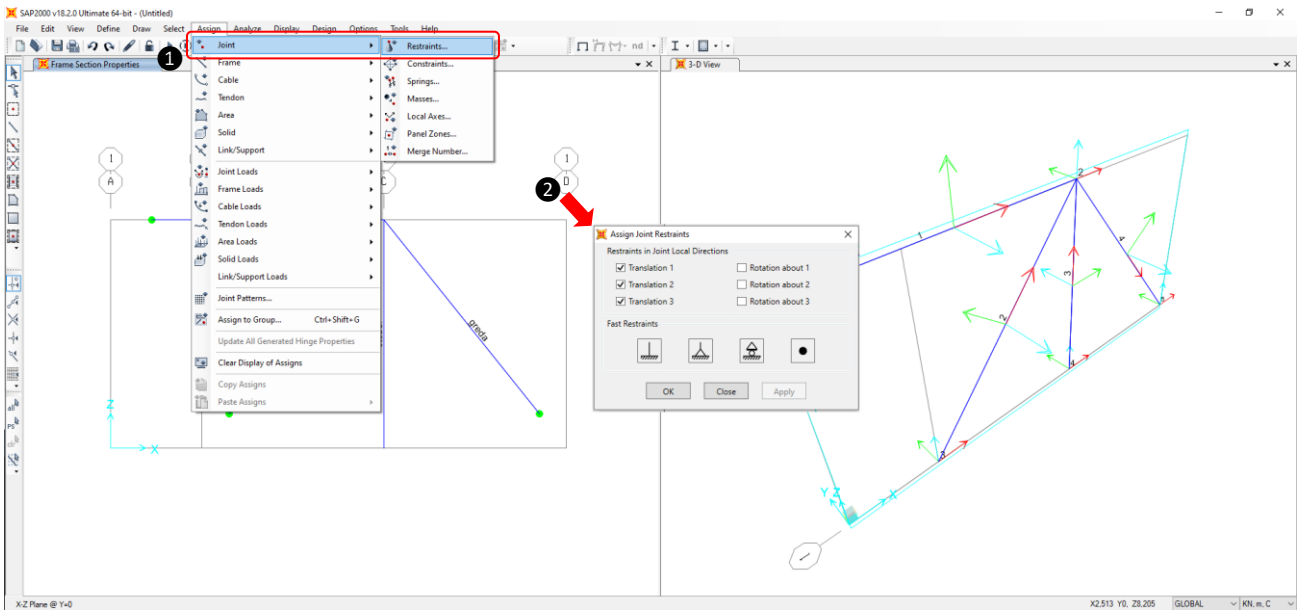
S klikom na *OK* se okno *Assign Frame Sections* zapre. Hkrati pa se ob tretjem končnem elementu izpiše *steber* (Slika 2.36).



Slika 2.36: Dodelitev prereza tretjemu končnemu elementu

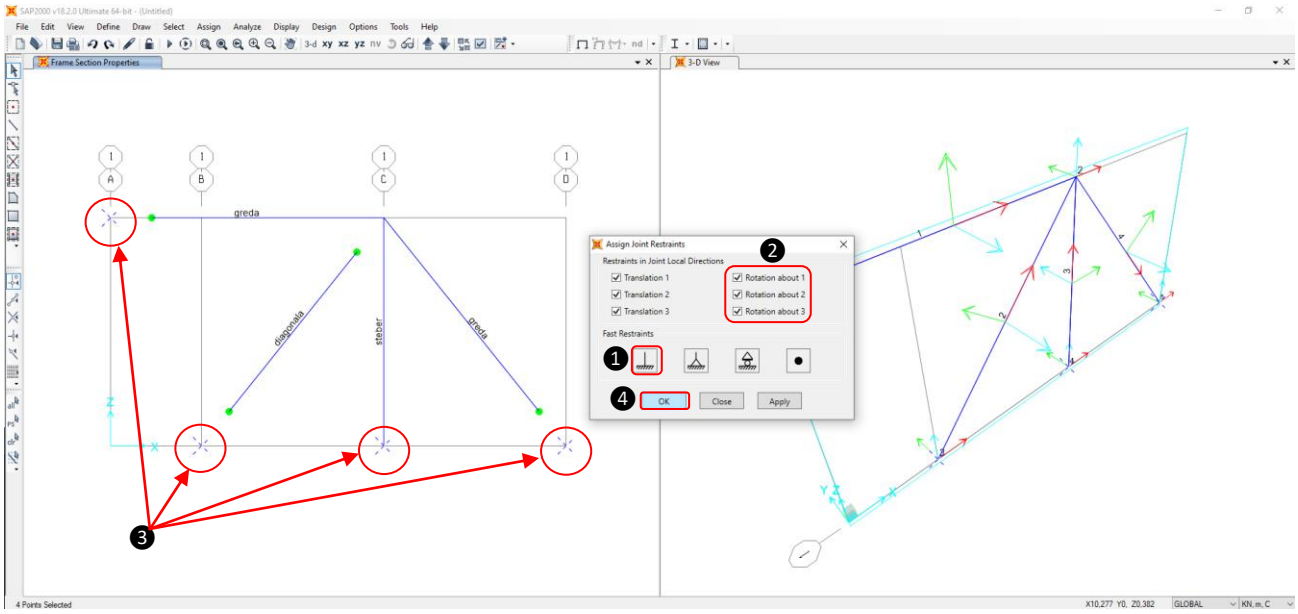
– *Diskretizacija konstrukcije: definiranje kinematičnih robnih pogojev*

Ker smo že prej v končnih elementih sprostili momente tudi na lokacijah, kjer ni podpor, bomo vsa podprta vozlišča v konstrukciji definirali z vpeto podporo. Za določitev podpor na konstrukciji v visečem meniju *Assign* izberemo *Joint* in nato *Restraints* ... (Slika 2.37 – ❶). Odpre se okno *Assign Join Restraints* (Slika 2.37 – ❷).



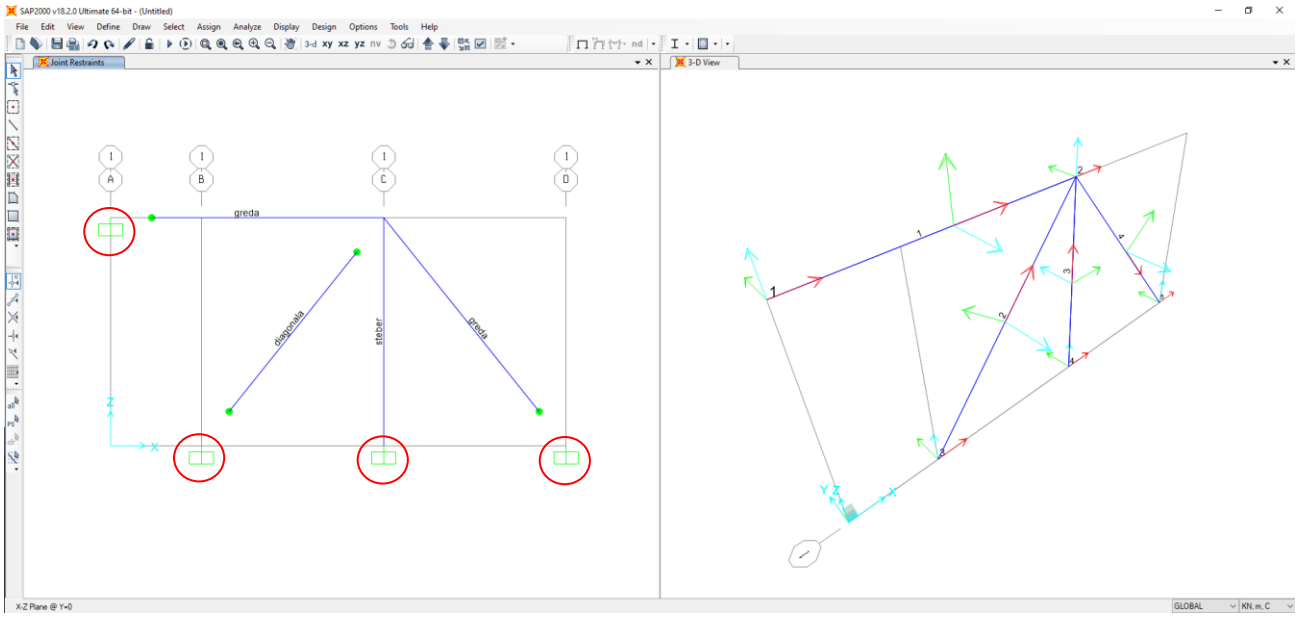
Slika 2.37: Definiranje podpor

V razdelku *Fast Restraints* kliknemo na ikono vpete podpore (Slika 2.38 – ❶). V razdelku *Restraints in Joint Local Directions* se samodejno označijo še ostale količine, ki niso bile predhodno označene (Slika 2.38 – ❷). Nato označimo še vsa štiri zunanja vozlišča (Slika 2.38 – ❸) in izbor potrdimo z *OK* (Slika 2.38 – ❹).



Slika 2.38: Definiranje podpor

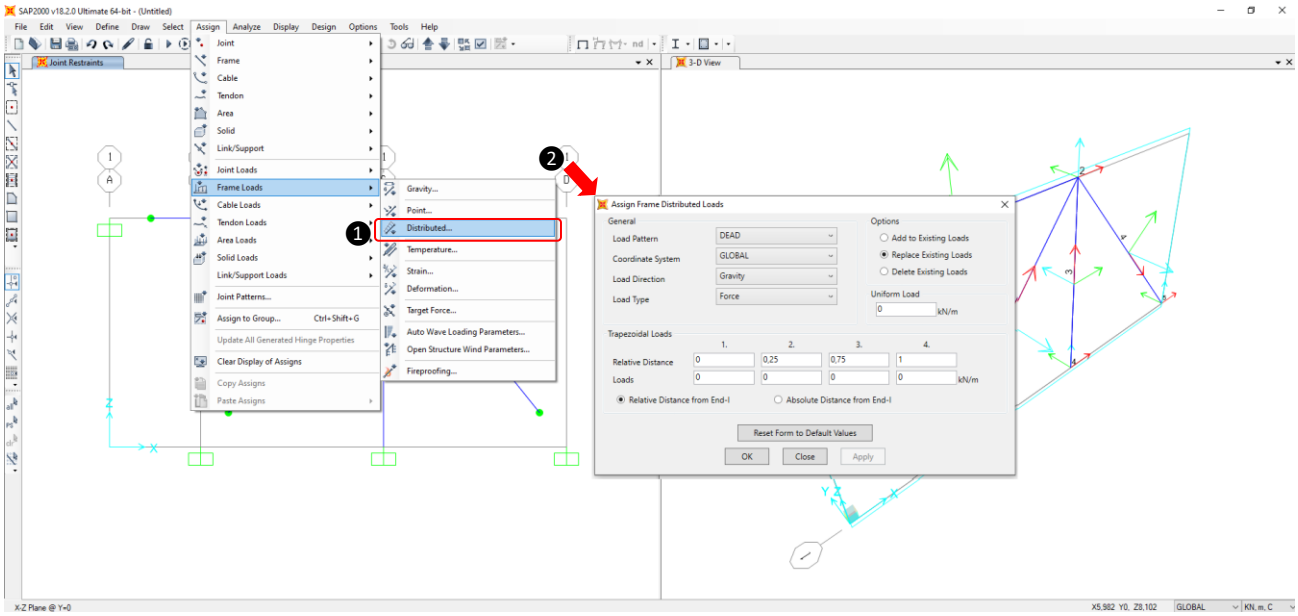
Po potrditvi se v označenem pogledu *X–Z* izrišejo vse štiri (vpete) podpore (Slika 2.39).



Slika 2.39: Izris polnovpetih podpor

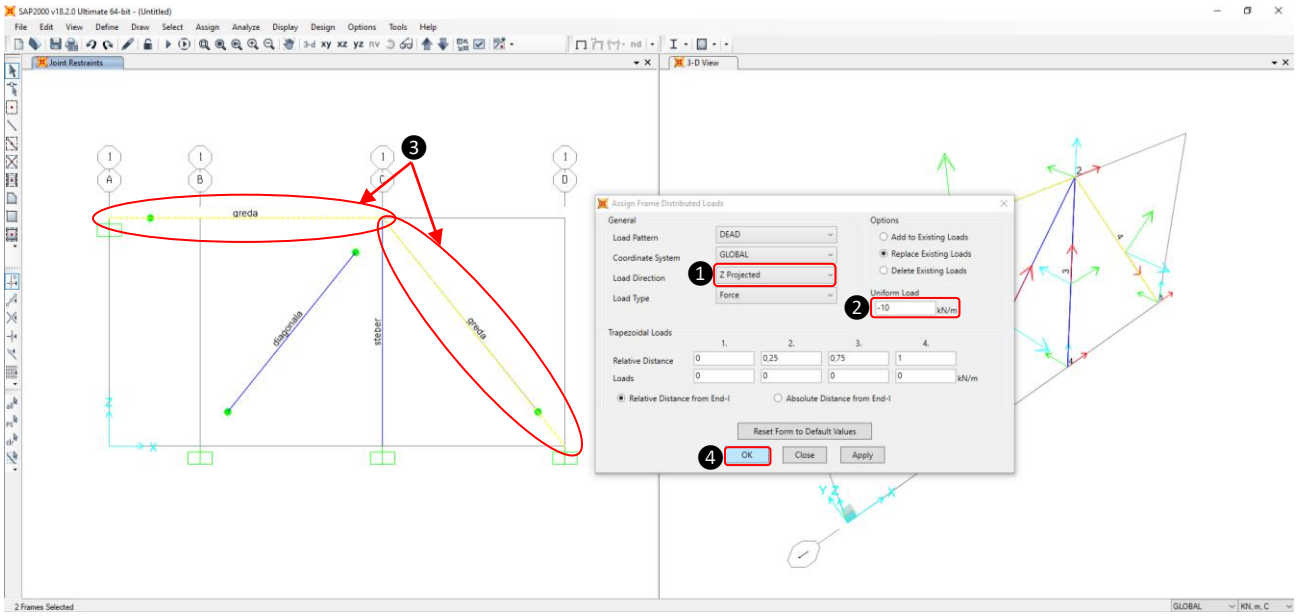
– Določitev obtežb

Za določitev enakomerne zvezne obtežbe v visečem meniju *Assign* izberemo *Frame Loads* in nato še *Distributed …* (Slika 2.40 – ❶). Odpre se okno *Assign Frame Distributed Loads* (Slika 2.40 – ❷).



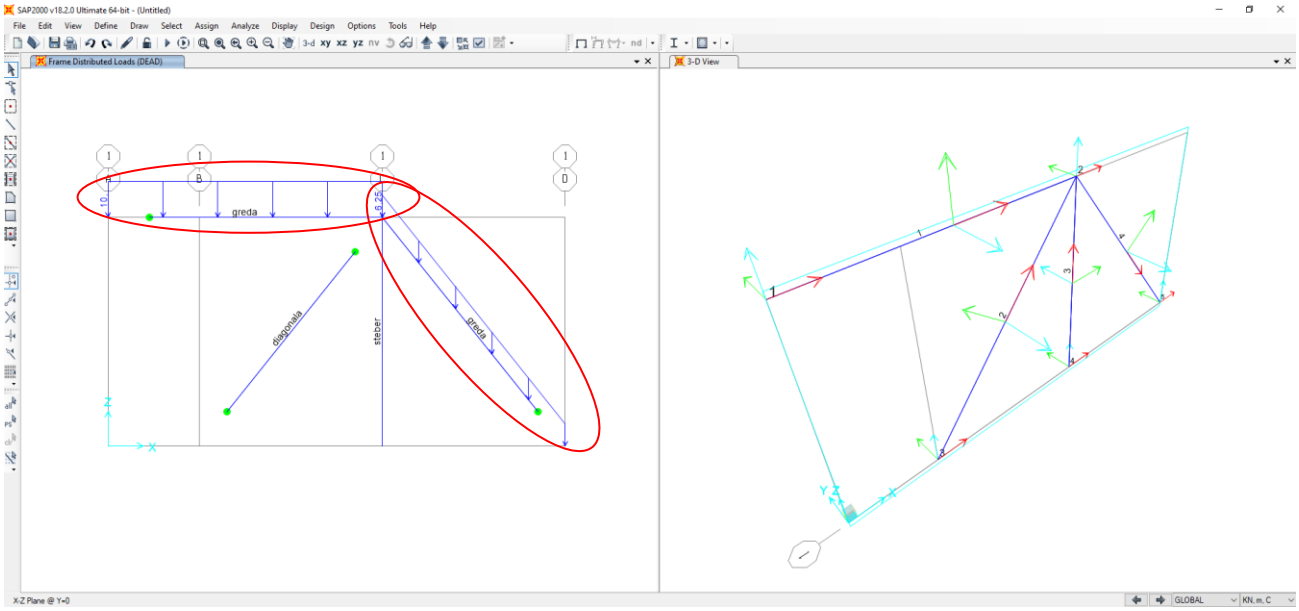
Slika 2.40: Definiranje zvezne obtežbe

Ker je vsa obtežba na elemente projicirana v smeri globalne osi *Z*, v razdelku *General* (v tretji vrstici *Load Direction*) izberemo *Z Projected* (Slika 2.41 – ❶). V razdelek *Uniform Load* vpišemo vrednost enakomerne obtežbe –10 (kN/m) (Slika 2.41 – ❷). Označimo oba obtežena končna elementa 1 in 4 (Slika 2.41 – ❸) ter izbor potrdimo z *OK* (Slika 2.41 – ❹).



Slika 2.41: Definiranje zvezne obtežbe

Okno *Assign Frame Distributed Loads* se zapre in se hkrati na obeh elementih izrišeta obtežbi z ustreznima vrednostma (Slika 2.42).

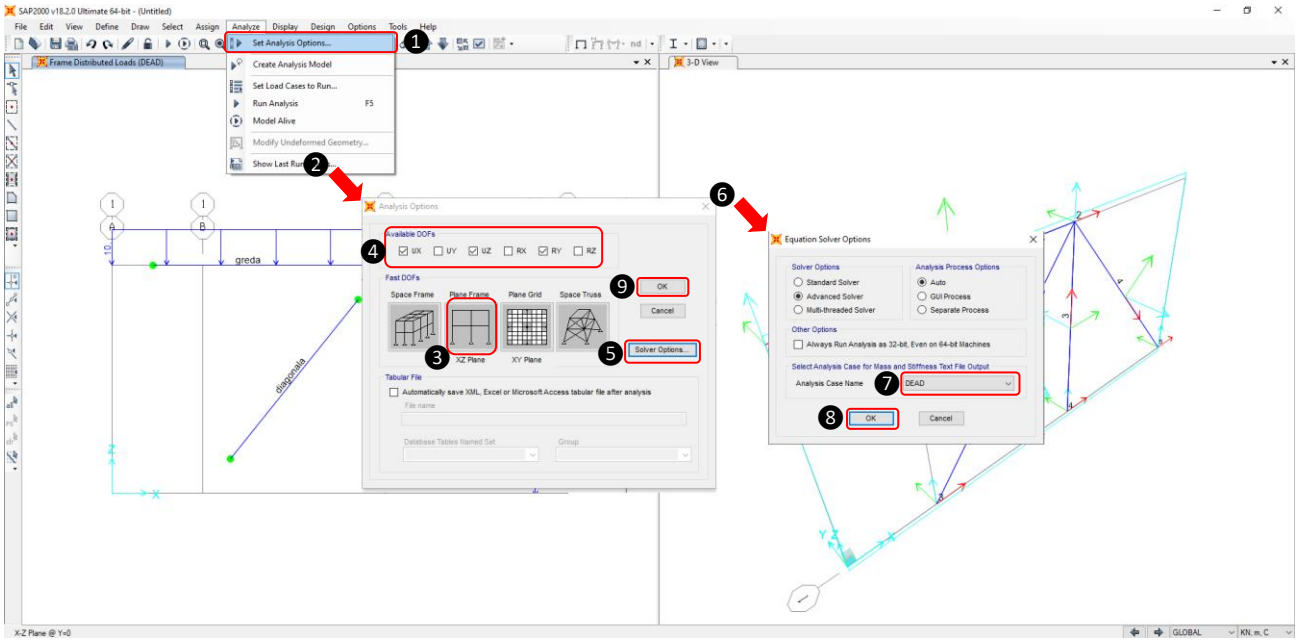


Slika 2.42: Izris enakomerne zvezne obtežbe na konstrukciji

Projicirano obtežbo z vrednostjo 6,25 kN/m na končnem elementu 4 bi lahko enakovredno podali tudi v lokalnem koordinatnem sistemu četrtega končnega elementa tako, da bi jo razdelili na prečno komponento z vrednostjo –3,90 kN/m v nasprotni smeri osi 2 (→) in vzdolžno komponento z vrednostjo 4,88 kN/m v smeri osi 1 (→).

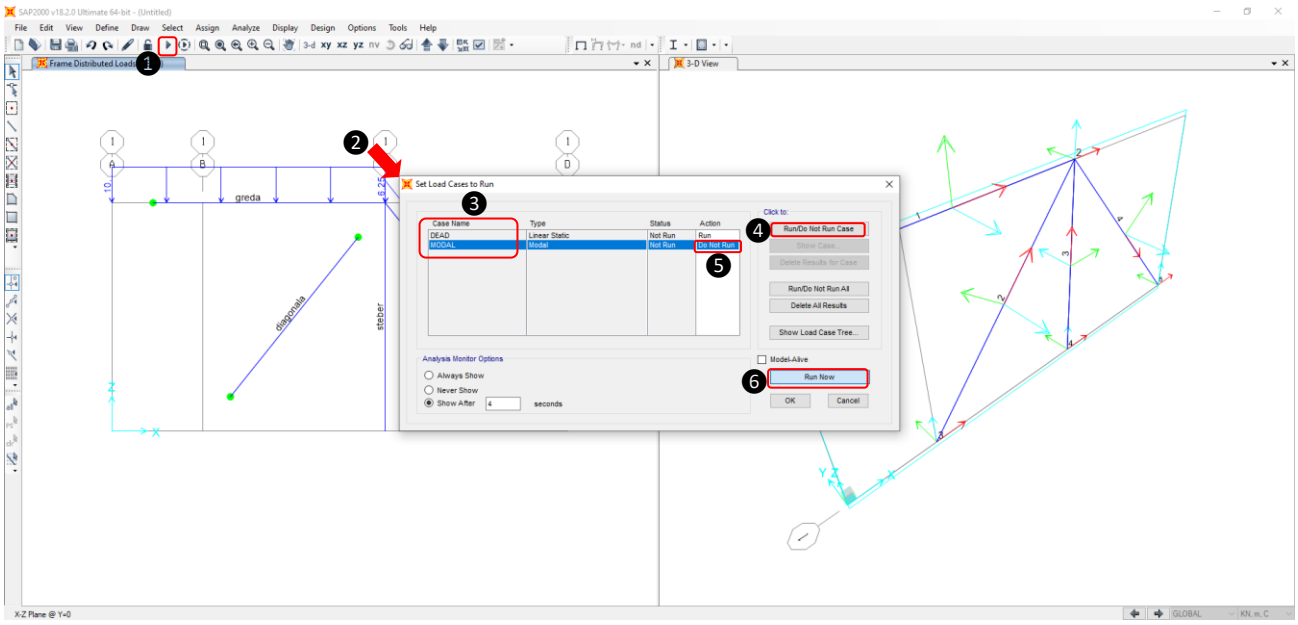
2.3 Analiza podanih podatkov

Namesto prostorske bomo izvedli ravninsko analizo samo z bistvenimi prostostnimi stopnjami, ki so zadostne za to vrsto analize. Za nastavitve analize v glavnem meniju kliknemo na *Analyse* in izberemo *Set Analysis Options* ... (Slika 2.43 – ❶). Odpre se okno *Analysis Options* (Slika 2.43 – ❷). Za ravninsko analizo konstrukcije v ravnini *X–Z* v razdelku *Fast DOFs* označimo ikono ravninskega okvirja (Slika 2.43 – ❸). Program nato v razdelku *Available DOFs* sam označi bistvene prostostne stopnje – pomika *UX* in *UY* in zasuk *RY* (Slika 2.43 – ❹). Če želimo pri analizi shraniti datoteki s togostno in masno matriko, kliknemo na ikono *Solver Options* (Slika 2.43 – ❺). Odpre se novo okno *Equation Solver Options* (Slika 2.43 – ❻). V razdelku *Select Analysis Case for Mass and Stiffness Text File Output* na seznamu (namesto *None*) izberemo obravnavani obtežni primer *DEAD* (Slika 2.43 – ❼) in izbor potrdimo s klikom na *OK* (Slika 2.43 – ❽). Vse skupaj dokončno potrdimo s klikom na *OK* še v oknu *Analysis Options* (Slika 2.43 – ❾).



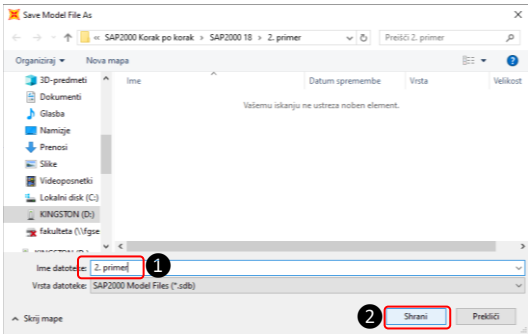
Slika 2.43: Nastavitev ravninske analize

Konstrukcija je v celoti definirana (vozlišča, končni elementi, robni pogoji in obtežbe), zato lahko izvedemo analizo na primer s klikom na ikono ▶ v orodni vrstici (Slika 2.44 – ❶). Odpre se okno *Set Load Cases to Run* (Slika 2.44 – ❷) z dvema na seznamu predefiniranima obtežnima primeroma *DEAD* in *MODAL* (Slika 2.44 – ❸). Slednjega (MODAL), ki ga ne bomo obravnavali, preprosto označimo in deaktiviramo s klikom na *Run/Do Not Run Case* (Slika 2.44 – ❹). Pri obtežnem primeru z imenom *MODAL* se v četrtem stolpcu (*Action*) tako namesto *Run* izpiše *Do Not Run* (Slika 2.44 – ❺), kar pomeni, da program te analize ne bo izvedel. Za nadaljevanje linearne statične analize edinega obtežnega primera z imenom *DEAD* kliknemo še na *Run Now* (Slika 2.44 – ❻).



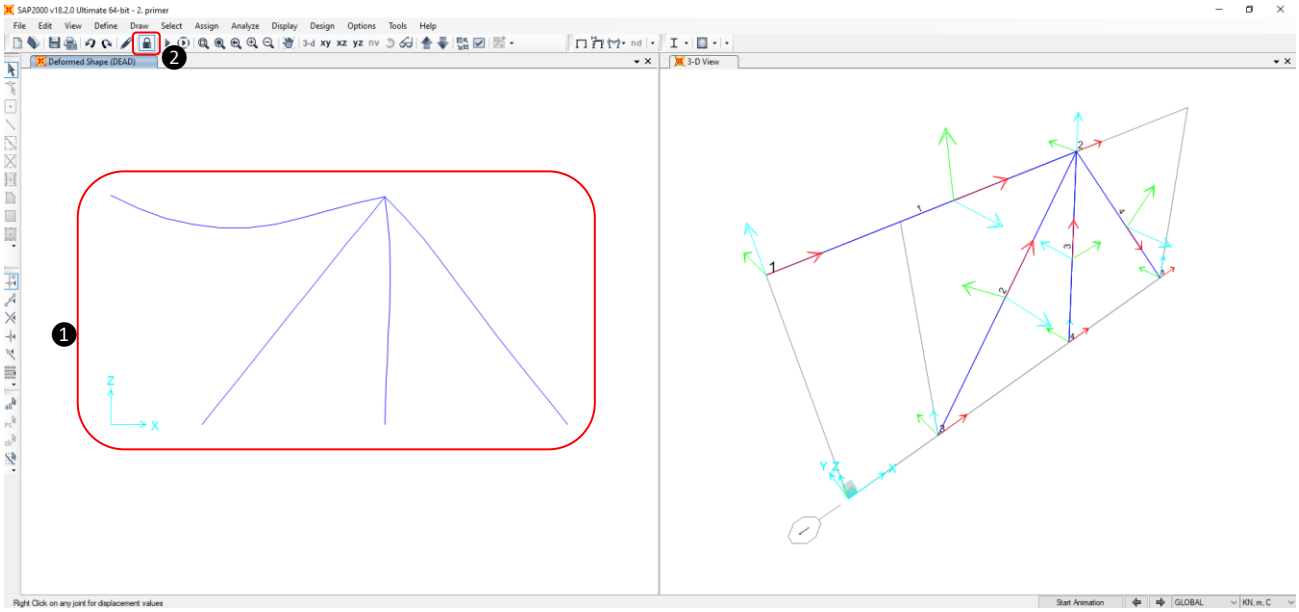
Slika 2.44: Izbira obtežnih primerov za izvedbo analize

Ker dokument doslej še ni nikjer shranjen, se najprej pojavi okno *Save Model File As*. Izberemo lokacijo za shranitev dokumenta in določimo ime primera, to je *primer 2* (Slika 2.45 – ❶, glej ***Opomba 7***, str. 39), ter izbor shranimo s klikom na *Shrani* (Slika 2.45 – ❷).



Slika 2.45: Shranjevanje dokumenta na disk

Nato se zažene analiza in po nekaj sekundah se v levem oknu izriše konstrukcija v deformirani legi (Slika 2.46 – ❶). Hkrati se model zaklene (v orodni vrstici se namesto odklenjene ključavnice 🔓 pojavi ikona zaklenjene ključavnice 🔒) in podatkov o konstrukciji ni več možno spreminjati (Slika 2.46 – ❷).

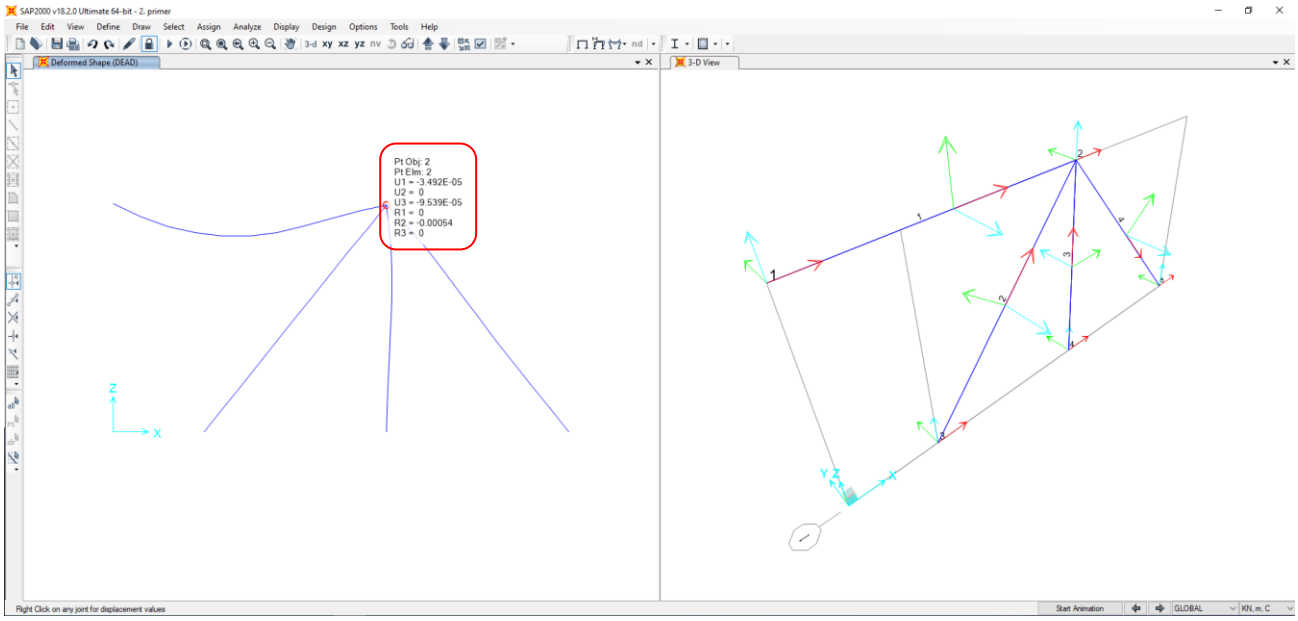


Slika 2.46: Deformirana lega konstrukcije

2.4 Poprocesiranje

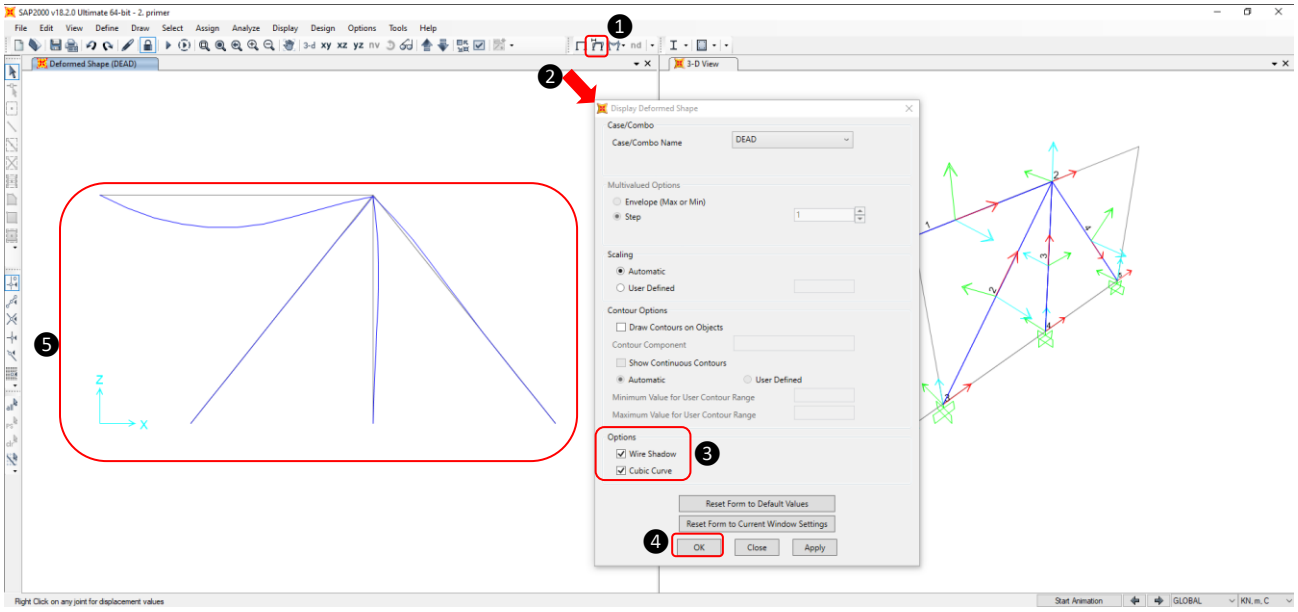
– Grafični prikaz deformirane lege konstrukcije

Če se s kazalcem v levem oknu na deformirani konstrukciji pomaknemo na vozlišče 2, ki je edino vozlišče z neničelnimi pomiki in zasuki, se v izbranih enotah izpišejo vrednosti vseh pomikov in zasukov (Slika 2.47). Zasuki se v realni konstrukciji pojavijo še v vozliščih 1, 3 in 5, ki pa v izbranem računskem modelu (z izbranimi kondenziranimi končnimi elemeniti tipa vpeto–členek) ne nastopijo.



Slika 2.47: Izpis pomikov in zasukov v vozlišču 2

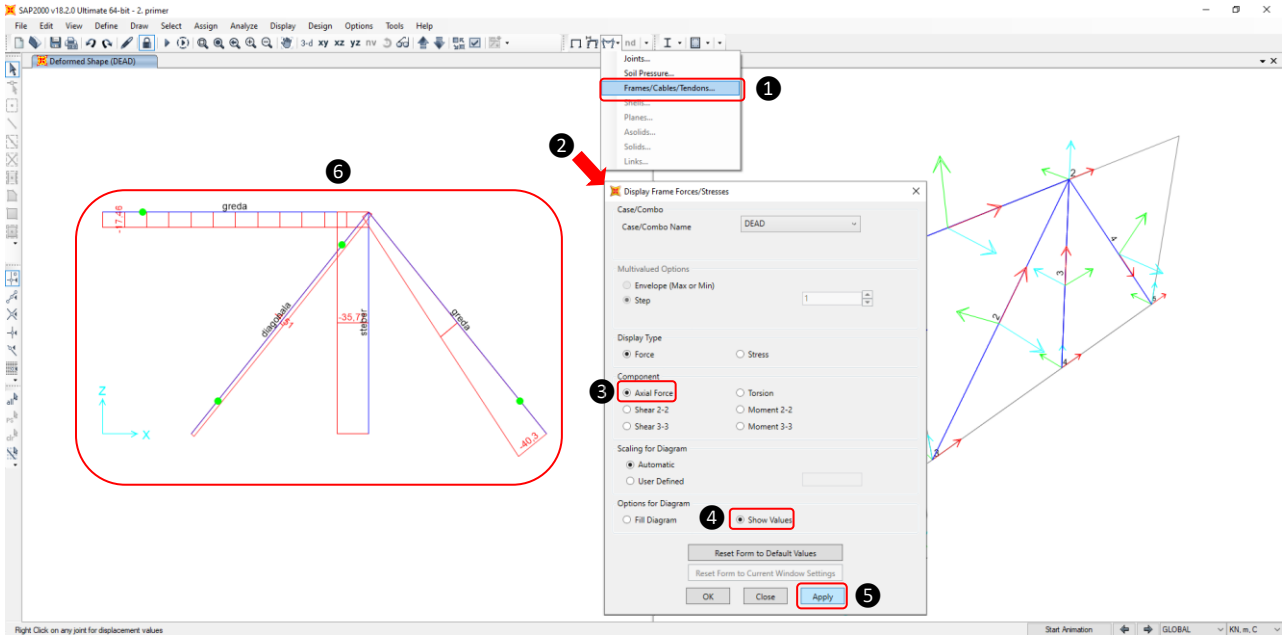
Ker je prikazana le deformirana lega konstrukcije, je hkrati smiselno za primerjavo prikazati tudi začetno pozicijo. To najhitreje prikažemo s klikom na ikono v orodni vrstici (Slika 2.48 – ❶). Nato se odpre okno *Display Deformed Shape* (Slika 2.48 – ❷). V spodnjem razdelku *Options* poleg možnosti *Cubic Curve*, ki je že predefinirano označena, označimo še *Wire Shadow* (Slika 2.48 – ❸). Vse skupaj potrdimo s klikom na *OK* (Slika 2.48 – ❹). V aktivnem levem oknu se ponovno prikaže deformirana lega konstrukcije, vendar tokrat še z izrisano začetno lego (Slika 2.48 – ❺).



Slika 2.48: Prikaz začetne lege in deformirane lege konstrukcije

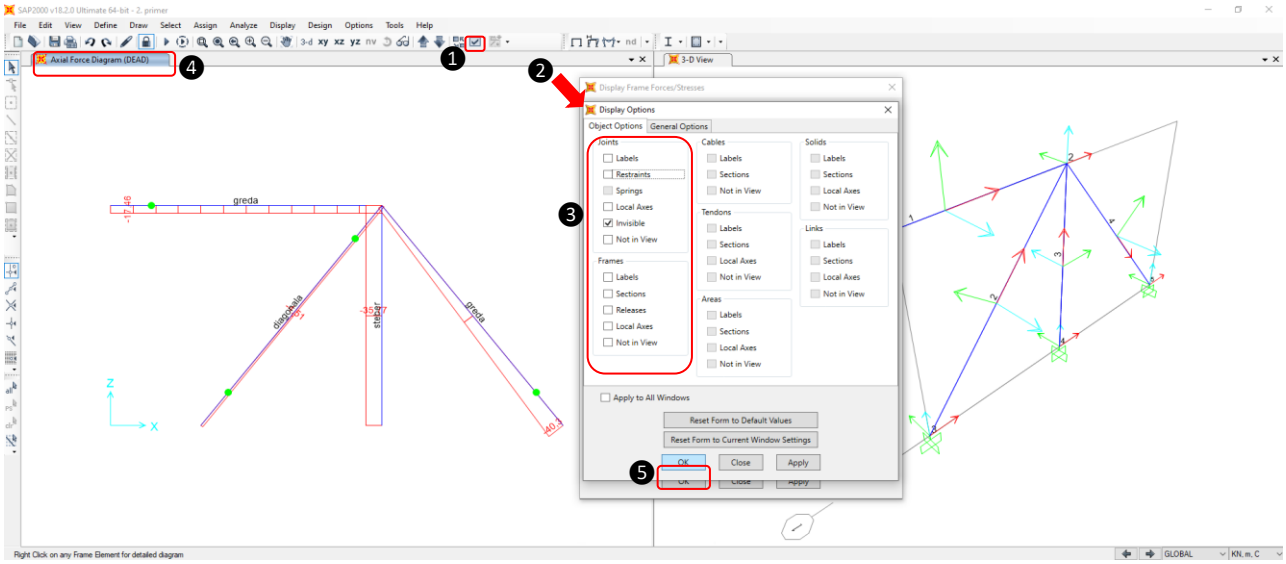
– Grafični prikaz notranjih statičnih količin

Za izris diagramov notranjih statičnih količin v orodni vrstici kliknemo na ikono in na seznamu izberemo *Frames/Cables/Tendons* ... (Slika 2.49 – ❶). Odpre se okno *Display Frame Forces/Stresses* (Slika 2.49 – ❷). Diagrame osnih sil prikažemo tako, da v razdelku *Component* izberemo *Axial Force* (Slika 2.49 – ❸). Za prikaz ekstremnih vrednosti je smiselno, da v razdelku *Options for diagram* označimo še *Show Values* (Slika 2.49 – ❹). Nato vse skupaj potrdimo z *Apply* (Slika 2.49 – ❺). V aktivnem levem oknu se izrišejo diagrami osnih sil (Slika 2.49 – ❻).



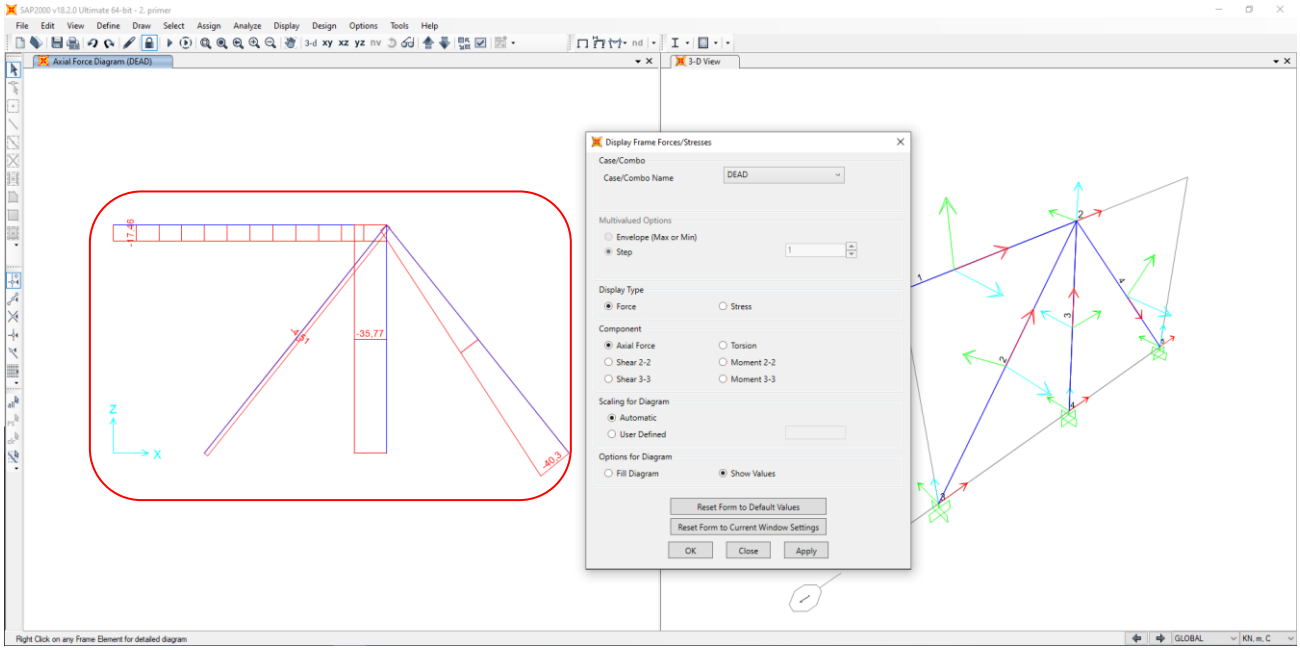
Slika 2.49: Izris osnih sil

Če so oznake prerezov in sprostitev elementov moteče, jih lahko odstranimo, tako da v orodni vrstici najprej kliknemo na ikono ☑ (Slika 2.50 – ❶). Odpre se okno *Display Options* (Slika 2.50 – ❷). V razdelkih *Joints* in *Frames* odznačimo vse količine, ki jih ne želimo prikazati (Slika 2.50 – ❸). Aktiviramo levo okno v pogledu *X–Z* (Slika 2.50 – ❹) in kliknemo na *OK* (Slika 2.50 – ❺).



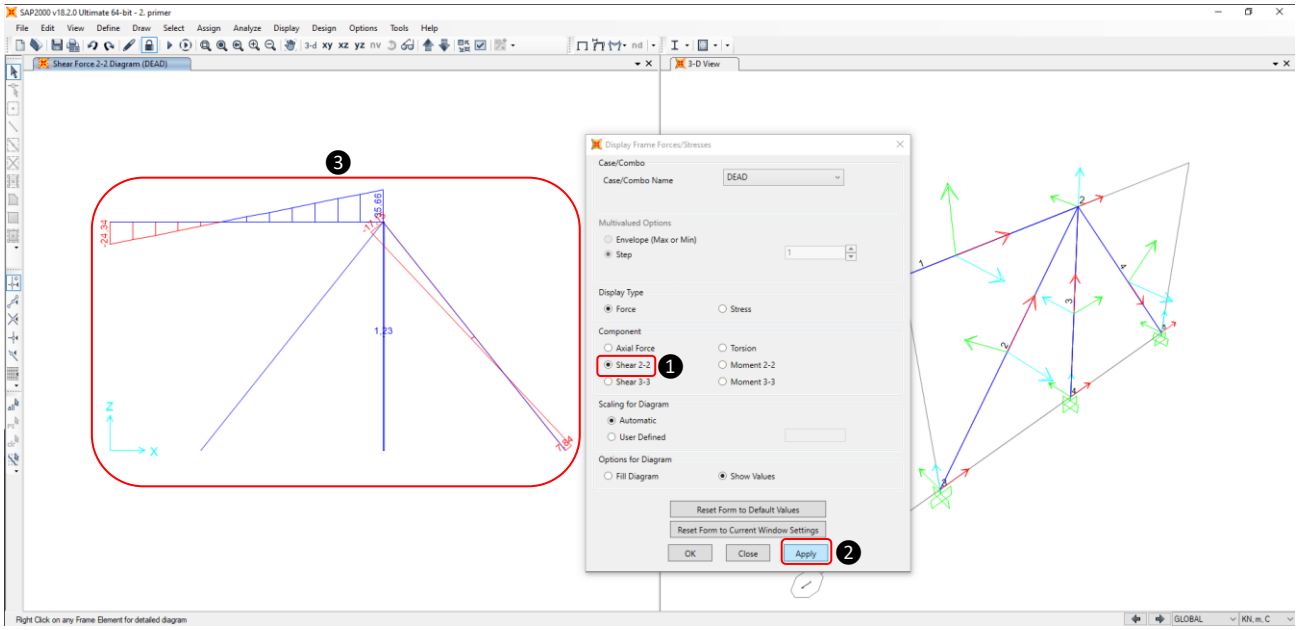
Slika 2.50: Nastavitve prikaza količin

V aktivnem levem oknu se osne sile tokrat izrišejo v preglednejši obliki brez oznak prerezov in sprostitev elementov (Slika 2.51).



Slika 2.51: Izris osnih sil brez oznak prerezov in sprostitev elementov

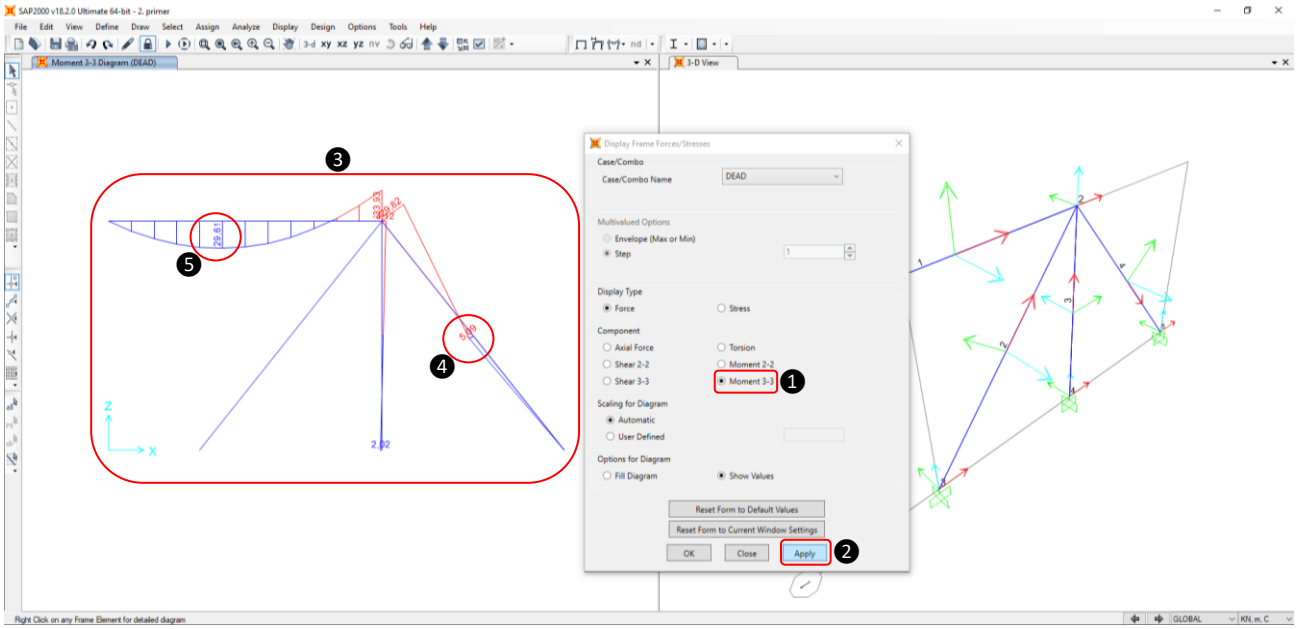
Za prikaz strižnih sil v razdelku *Component* označimo *Shear 2-2* (Slika 2.52 – ❶) in izbiro potrdimo z *Apply* (Slika 2.52 – ❷). V aktivnem levem oknu se izrišejo diagrami strižnih sil (Slika 2.52 – ❸).



Slika 2.52 Izris strižnih sil

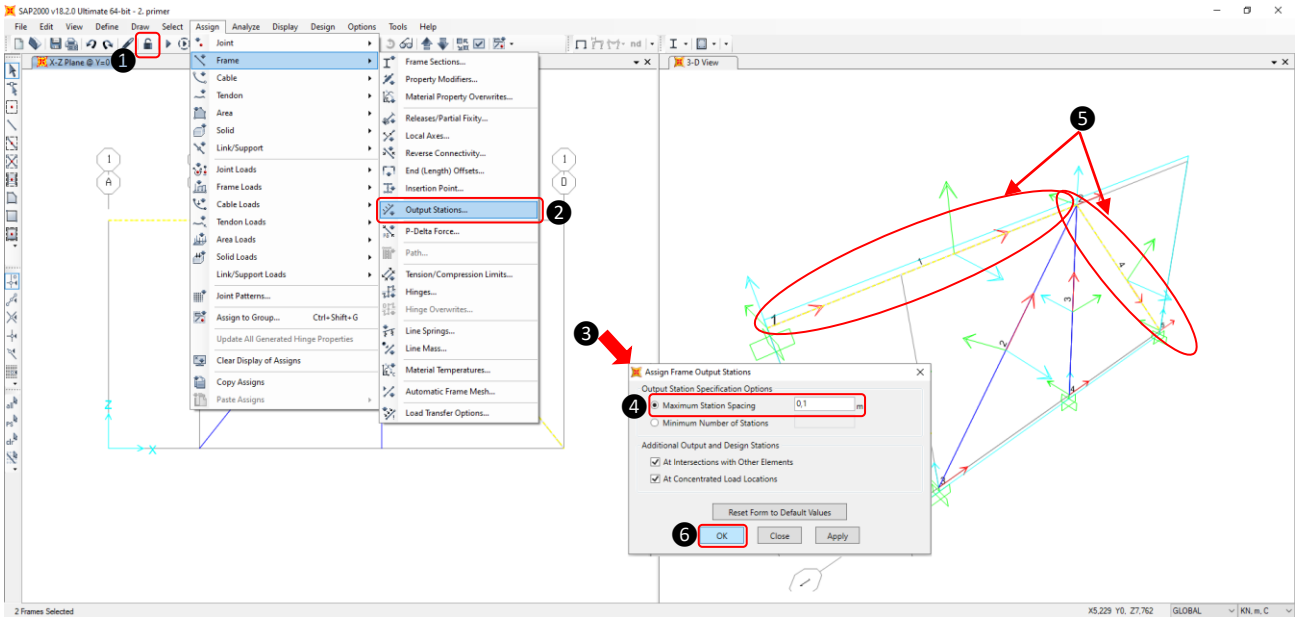
Za prikaz upogibnih momentov v razdelku *Component* označimo *Moment 3-3* (Slika 2.53 – ❶) in izbiro potrdimo s klikom na *Apply* (Slika 2.53 – ❷). V aktivnem levem oknu se izrišejo diagrami upogibnih momentov (Slika 2.53 – ❸). Na četrtem elementu lahko opazimo, da je točna vrednost momenta po elementu med obema krajnima vozliščema prikazana samo v eni točki na sredini.

Poleg je izpisana ekstremna vrednost momenta, ki znaša 5,09 kNm (Slika 2.53 – ❹). V prvem elementu je razporeditev momentov veliki natančneje izrisana kot v četrtem, saj so točne vrednosti izrisane v kar 11 vmesnih točkah, ki jih program samodejno določi za vsak element posebej. Izpisana ekstremna vrednost momenta pa znaša 29,61 kNm (Slika 2.53 – ❺).



Slika 2.53: Izris upogibnih momentov

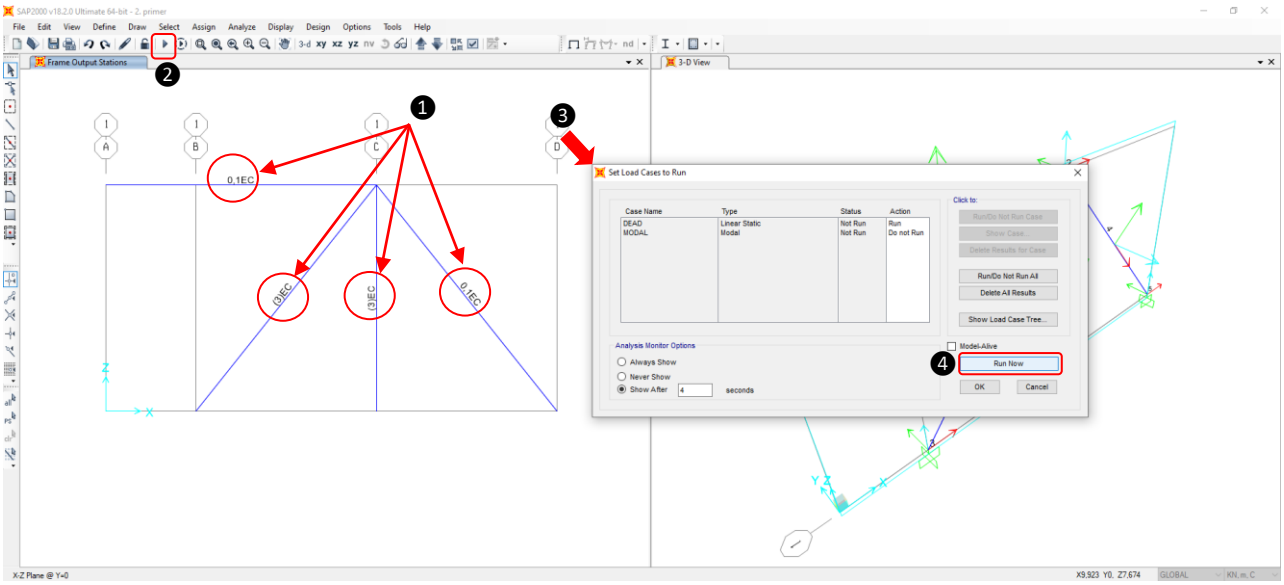
Za natančnejši izris razporeditve momentov v obeh grednih elementih (in s tem tudi lokacije obeh pripadajočih približkov ekstremnih vrednosti momenta) je treba dokument najprej odkleniti s klikom na ikono zaklenjene ključavnice v orodni vrstici. Namesto ikone zaklenjene ključavnice se prikaže ikona odklenjene ključavnice (Slika 2.54 – ❶). Nato v glavnem meniju kliknemo na *Assign*, se pomaknemo na *Frame* in nato še naprej na *Output Stations* ... ter izbiro potrdimo s klikom (Slika 2.54 – ❷).



Slika 2.54: Nastavitev števila področij za izpis izhodiščnih vrednosti notranjih količin po končnem elementu

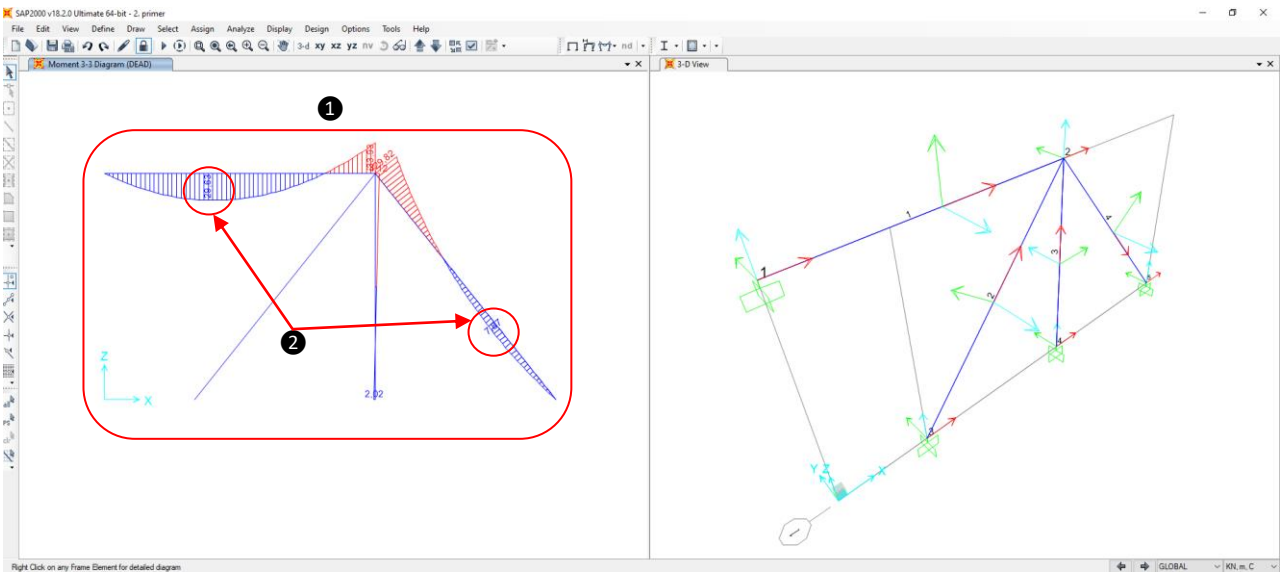
Odpre okno *Assign Frame Output Stations* (Slika 2.54 – ❸). Označimo *Maximum Station Spacing* in v okno poleg namesto predefinirane razdalje 0,5 m vpišemo manjšo razdaljo, na primer 0,1 m (Slika 2.54 – ❹). Označimo oba gredna elementa (Slika 2.54 – ❺) in vse skupaj potrdimo s klikom na *OK* (Slika 2.54 – ❻).

V označenem pogledu *X–Z* se ob vsakem elementu izpišejo oznake izhodiščnih lokacij (Slika 2.55 – ❶). Ponovno zaženemo analizo tako, da v orodni vrstici kliknemo na ikono (Slika 2.55 – ❷). Odpre se okno *Set Load Cases to Run* (Slika 2.55 – ❸) in kliknemo na *Run Now* (Slika 2.55 – ❹).



Slika 2.55 Izpis oznak izhodiščnih lokacij in ponovni zagon linearne statične analize

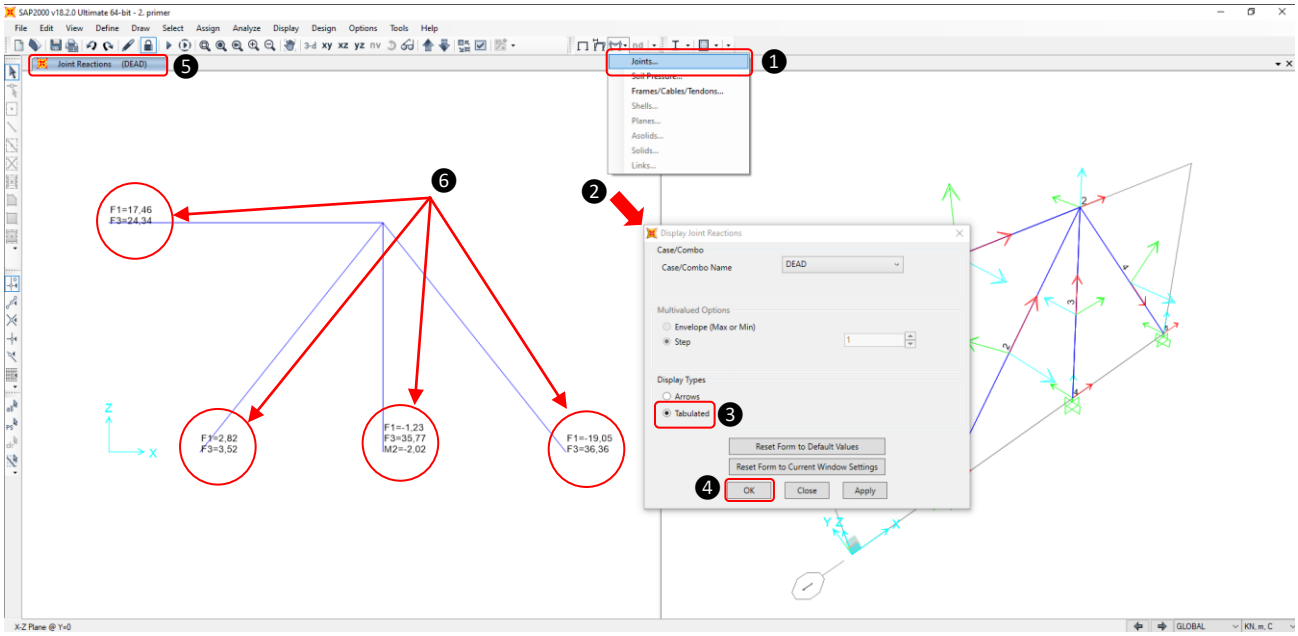
Takoj po končani analizi se v levem oknu izrišejo diagrami upogibnih momentov (Slika 2.56 – ❶). Pri obeh grednih končnih elementih (še posebej pri končnem elementu z oznako 4) lahko vidimo njihov natančnejši izris in novi lokaciji ter vrednosti pripadajočih ekstremnih pozitivnih vrednosti, ki sedaj znašata 29,63 kNm za prvi in 7,97 kNm za četrti končni element (Slika 2.56 – ❷).



Slika 2.56: Izboljšan izris upogibnih momentov v pogledu *X–Z*

– Izpis vrednosti reakcij

Za izpis reakcij v orodni vrstici kliknemo na ikono in na seznamu izberemo *Joints* ... (Slika 2.57 – ❶). Odpre se okno *Display Joint Reaction* (Slika 2.57 – ❷) in v razdelku *Display Types* namesto *Arrows* izberemo *Tabulated* (Slika 2.57 – ❸). Vse skupaj potrdimo z *OK* (Slika 2.57 – ❹). Okno *Display Join Reactions* se zapre, hkrati se pa v aktivnem oknu (Slika 2.57 – ❺) v tabelirani obliki na lokacijah reakcij izpišejo njihove vrednosti, ki so različne od nič (Slika 2.57 – ❻).

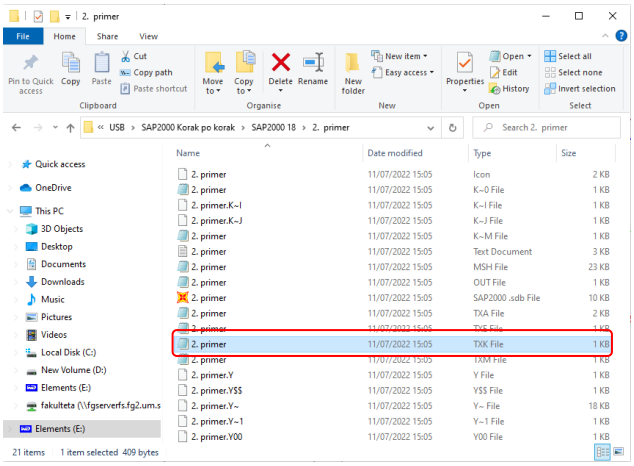


Slika 2.57: Izpis reakcij v tabelirani obliki

Vse rezultate analize lahko namesto grafično prikažemo tudi v tabelirani obliki (glej prvi primer, str. 51–53).

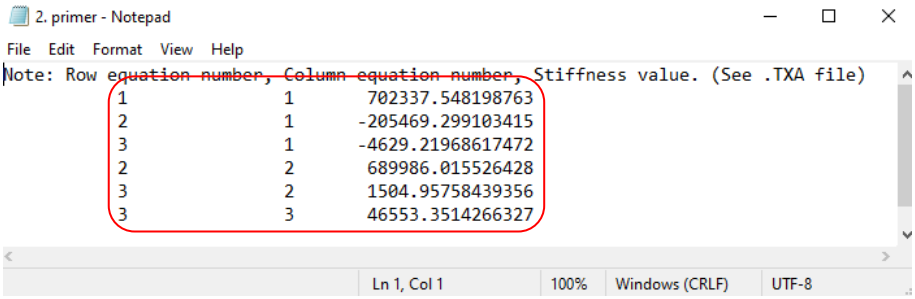
2.5 Izpis reducirane togostne matrike konstrukcije

Izpis togostne matrike konstrukcije je mogoč samo, če je predhodno to omogočeno v nastavitvah analize (glej Slika 2.43 – ❼, str. 84). V ta namen na disku poiščemo lokacijo, kjer je dokument shranjen, in v Beležnici odpremo tip datoteke TXK (Slika 2.58).



Slika 2.58: Lokacija datoteke primera 2

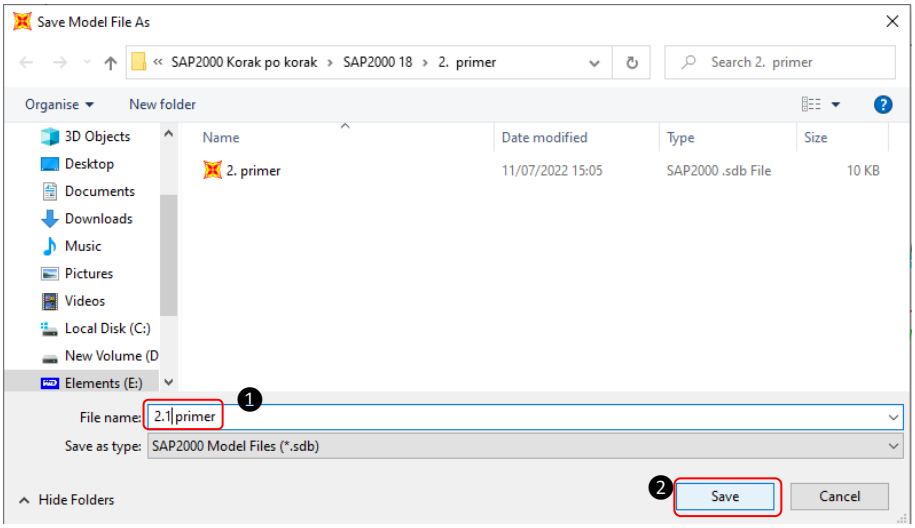
Odpre se program Beležnica z izpisanimi členi spodnjega trikotnika reducirane togostne matrike 3 x 3 za izračun obeh neznanih pomikov in zasuka v vozlišču 2 (Slika 2.59).



Slika 2.59: V Beležnici izpisani členi togostne matrike

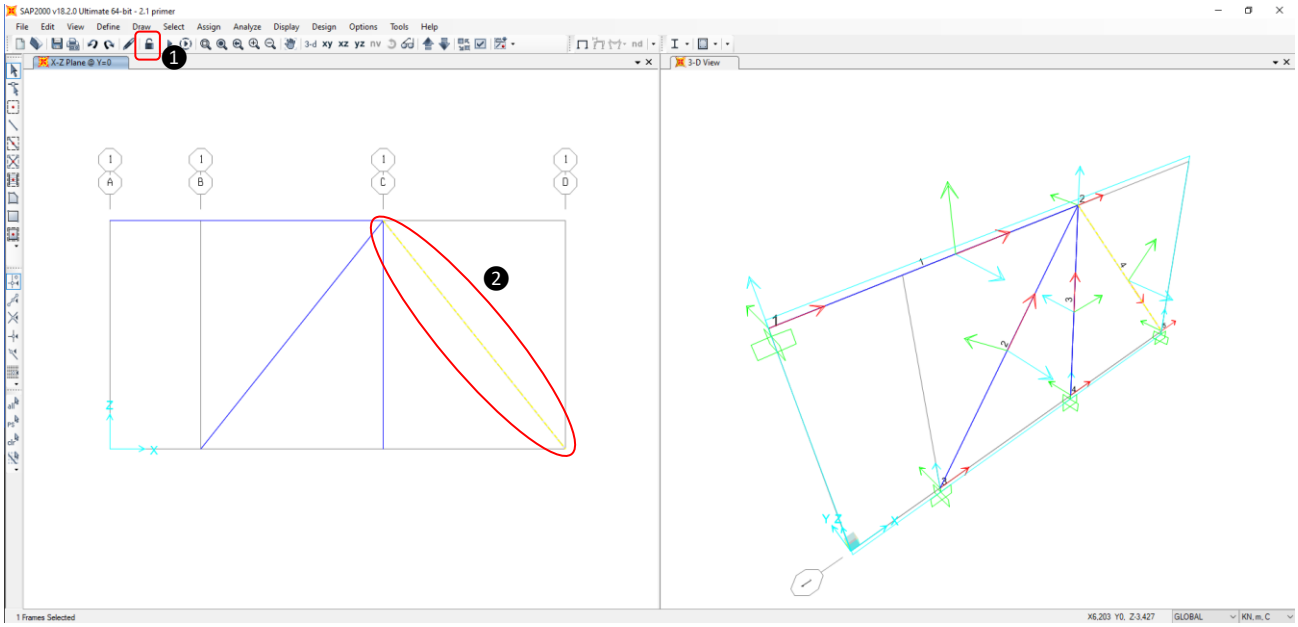
2.6 Analiza spremenjene konstrukcije

Če ne želimo izgubiti rezultatov že izvedene analize, moramo podatke o konstrukciji oziroma modelu konstrukcije skupaj z rezultati analize najprej shraniti. S hkratnim pritiskom na tipke *Ctrl + Shift + S* se odpre okno *Save Model File As*. Dokument lahko shranimo na isti (ali katerikoli drugi) lokaciji (mapi) pod novim imenom, na primer *primer 2.1* (Slika 2.60 – ❶), z levim klikom na *Save* (Slika 2.60 – ❷).



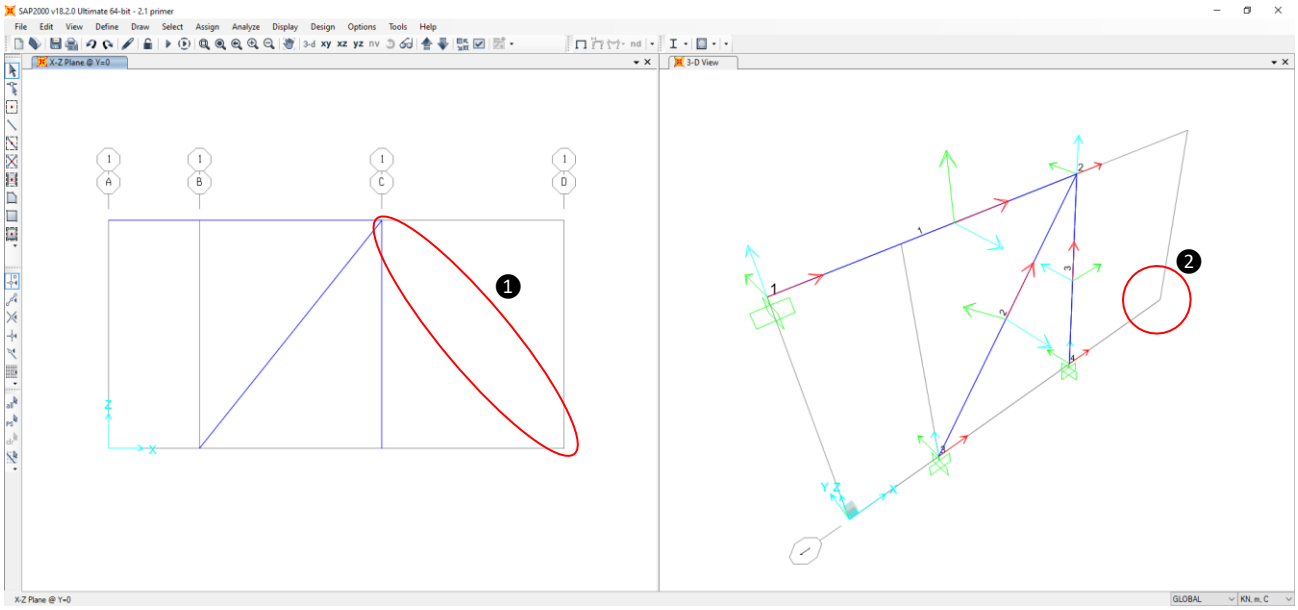
Slika 2.60: Shranjevanje dokumenta

Model se odklene, kar nakazuje ikona odklenjene ključavnice v orodni vrstici (Slika 2.61 – ❶). Zdaj je omogočena priprava modela spremenjene konstrukcije brez poševnega četrtega končnega elementa. Četrti končni element odstranimo tako, da ga najprej označimo (Slika 2.61 – ❷) in nato pritisnemo gumb *delete* na tipkovnici.



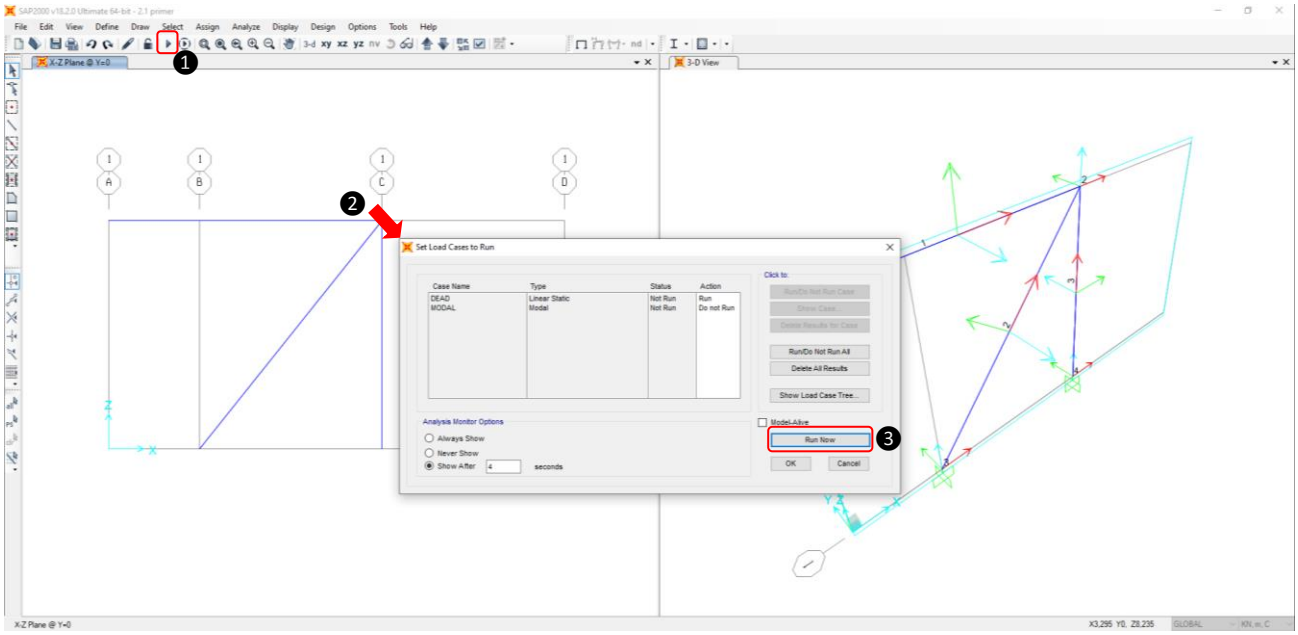
Slika 2.61: Shranjevanje dokumenta

Označen četrti končni element izgine (Slika 2.62 – ❶). Prav tako izgine vpeta podpora v vozlišču 5, ki ni več povezana s preostalo konstrukcijo, kar lahko vidimo v desnem oknu (Slika 2.62 – ❷).



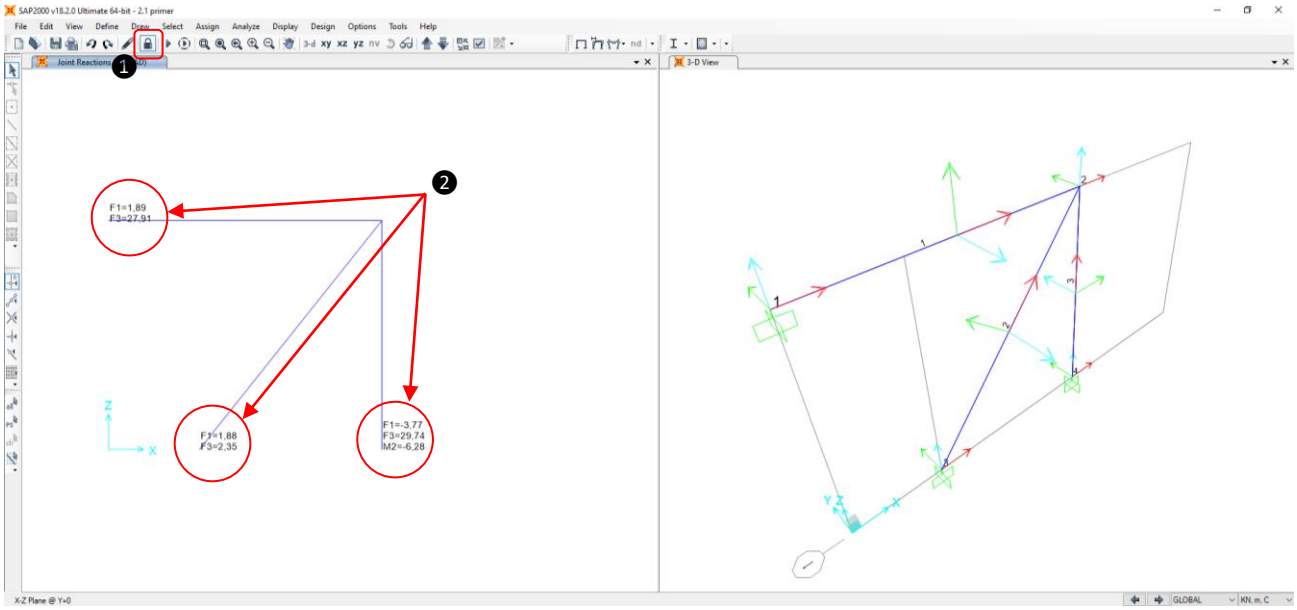
Slika 2.62: Spremenjena konstrukcija brez četrtega končnega elementa in vpete podpore

Ponovno zaženemo postopek analize podatkov, tako da v orodni vrstici najprej kliknemo na ikono ▶ (Slika 2.63 – ❶). Odpre se okno *Set Load Cases to Run* (Slika 2.63 – ❷), kjer lahko takoj kliknemo na ikono *Run Now* (Slika 2.63 – ❸).



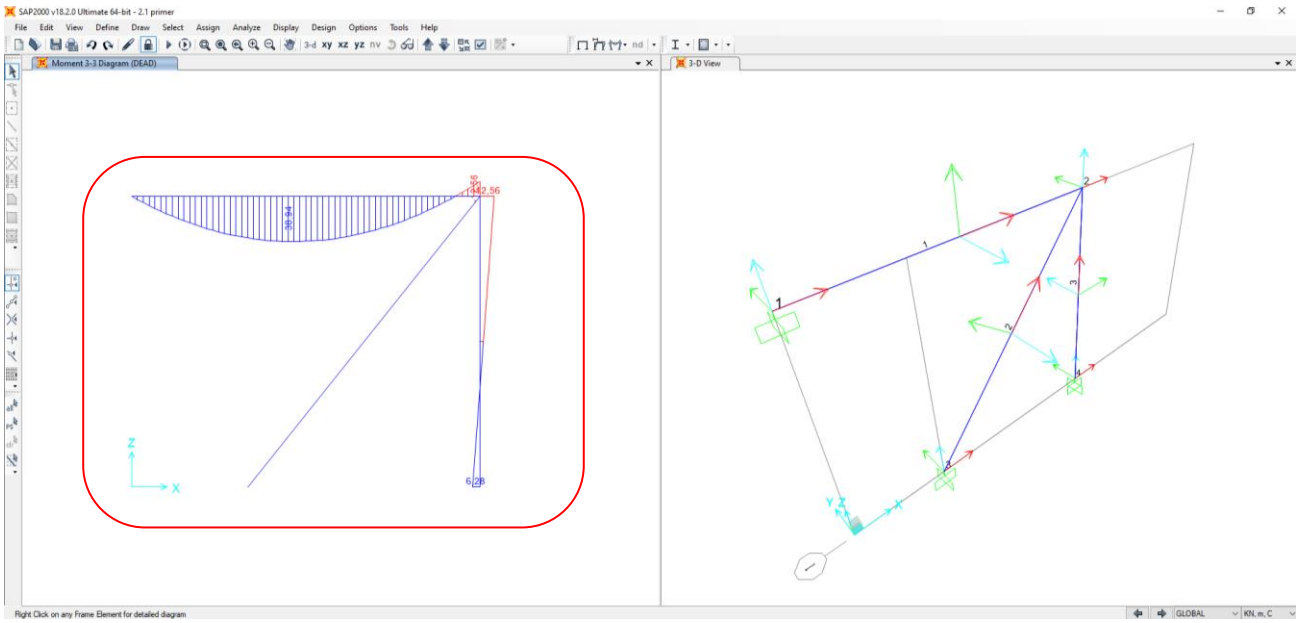
Slika 2.63 Zagon linearne statične analize

Po končani analizi podatkov se model zaklene, kar nakazuje ikona zaklenjene ključavnice 🔒 (Slika 2.64 – ❶). V pogledu *X–Z* se izvede izris konstrukcije z veličinami, ki so bile aktivirane v predhodni analizi, preden smo model odklenili. Torej se v tem primeru izpišejo velikosti reakcij v tabelirani obliki (Slika 2.64 – ❷).



Slika 2.64: Zagon linearne statične analize

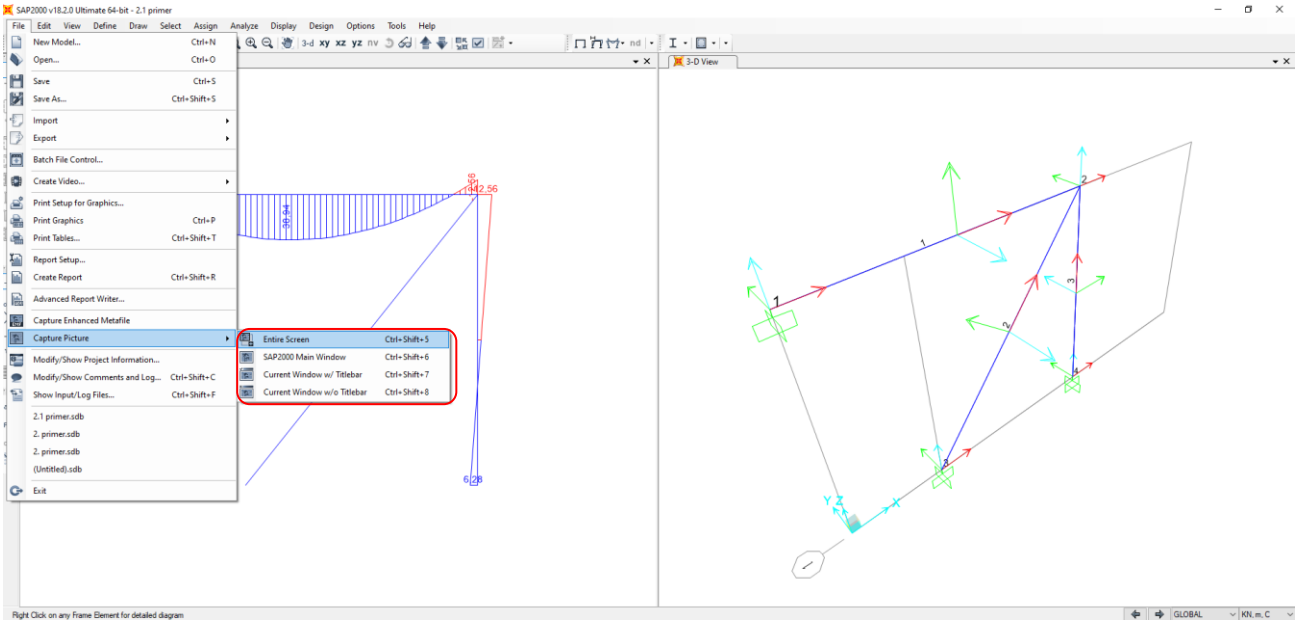
Če želimo, lahko tudi nadaljujemo s poprocesiranjem in prikažemo izris na primer upogibnih momentov (Slika 2.65).



Slika 2.65: Izris upogibnih momentov

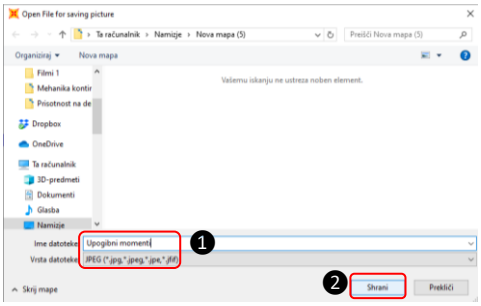
2.7 Zajem slike v programu SAP2000

Katerekoli grafične izpise programa lahko pred ali po končani analizi kot sliko najprej shranimo na disk in nato prenesemo v druge programe. To storimo tako, da se v visečem meniju *File* pomaknemo na *Capture Picture*. Pojavijo se štirje načini (Slika 2.66), ki so opisani v nadaljevanju.



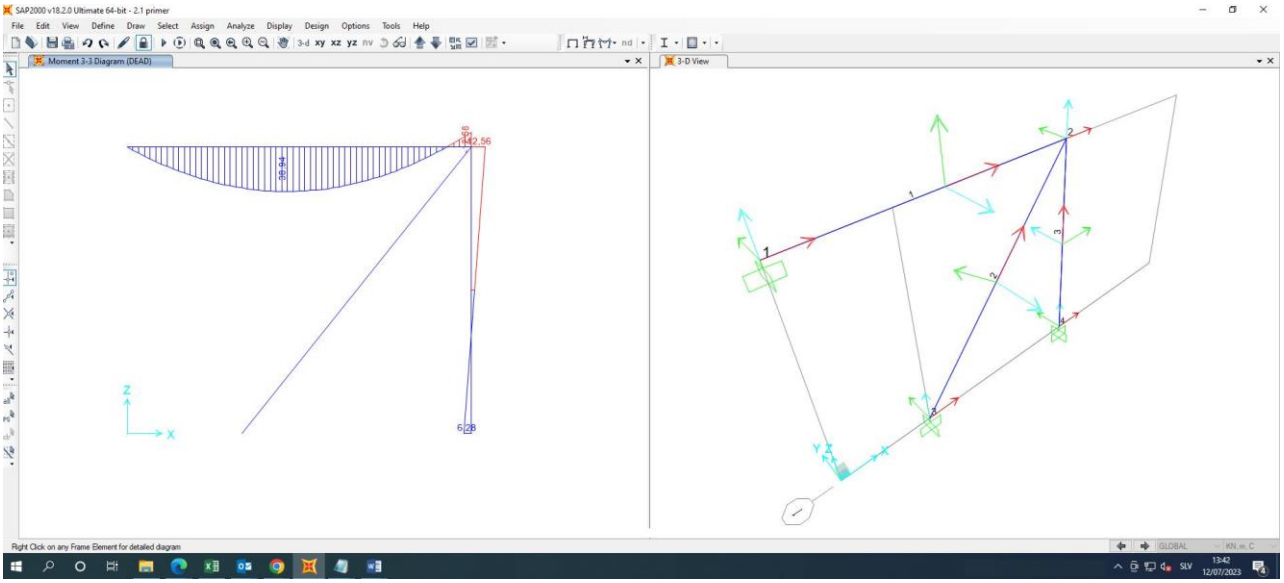
Slika 2.66: Zajem slike v programu

S klikom na katerokoli od štirih prikazanih možnosti se odpre okno *Open File for saving picure*. Izberemo lokacijo, kjer bomo (rastrsko) sliko shranili, ter ime slike (npr. *upogibni momenti*) in vrsto grafične datoteke (*JPEG*, *GIF*, *PNG* itd.) (Slika 2.67 – ❶). Sliko dokončno shranimo s klikom na gumb *Shrani* (Slika 2.67 – ❷).



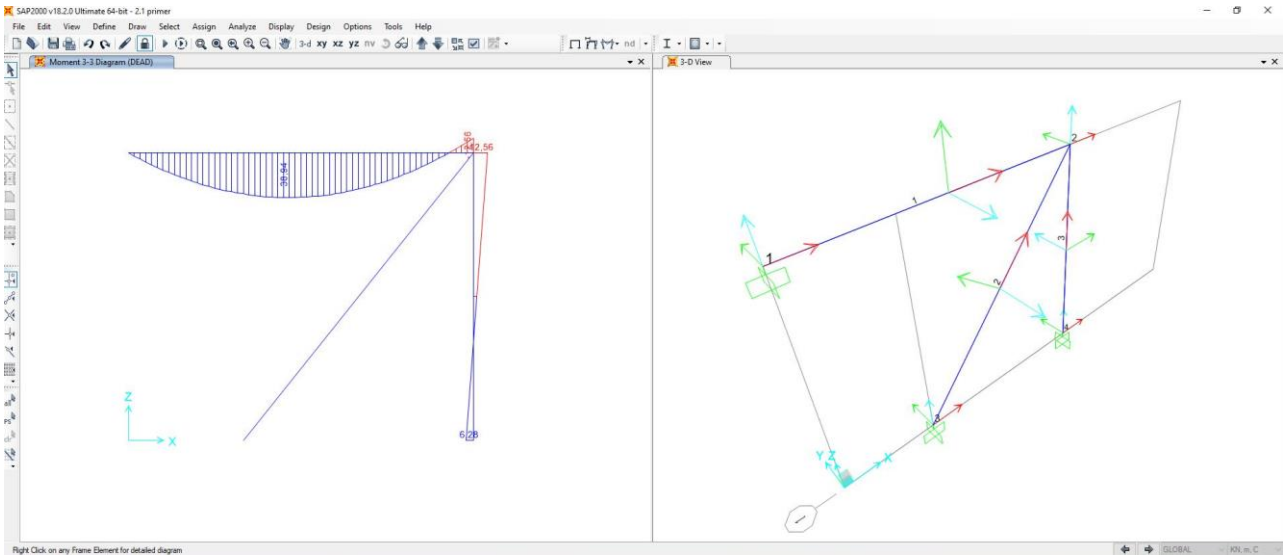
Slika 2.67: Shranjevanje slike na disk

S klikom na *Enire Screen* (*Ctrl* + *Shift* + *5*) zajamemo sliko celotnega zaslona (Slika 2.68).



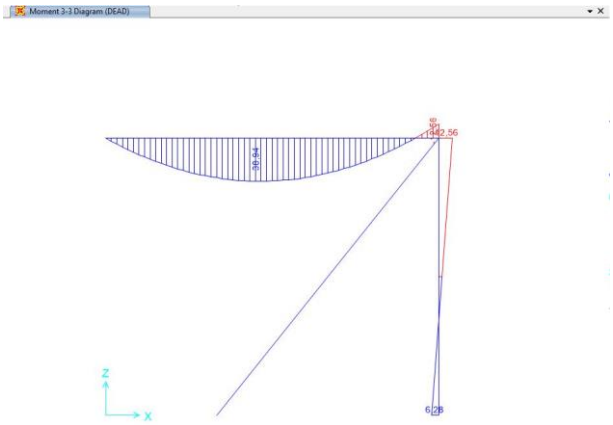
Slika 2.68: Slika celotnega zaslona

S klikom na *SAP2000 Main Window* (*Ctrl + Shift + 6*) zajamemo sliko glavnega okna (Slika 2.69).



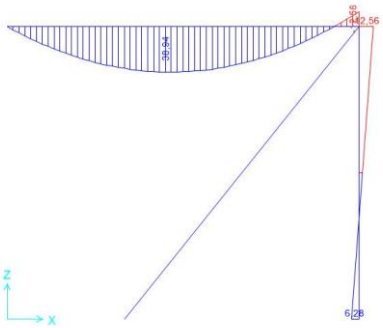
Slika 2.69: Slika glavnega okna programa

S klikom na *Current Window w/Titlebar* (*Ctrl + Shift + 7*) zajamemo sliko aktivnega (torej v tem primeru levega) prikaznega okna z naslovno vrstico (Slika 2.70).



Slika 2.70: Slika aktivnega prikaznega okna z naslovno vrstico

S klikom na *Current Window w/o Titlebar* (*Ctrl + Shift + 8*) zajamemo sliko aktivnega okna brez naslovne vrstice (Slika 2.71).



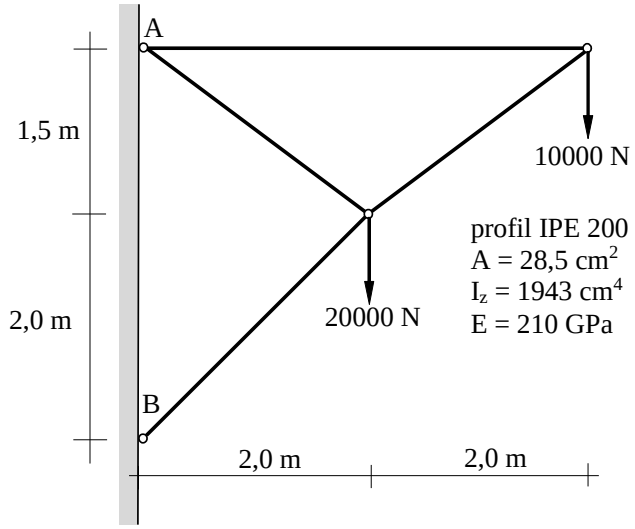
Slika 2.71: Slika aktivnega okna brez naslovne vrstice

Primer 3 – ravninsko paličje

3.1 Podatki o analizirani konstrukciji

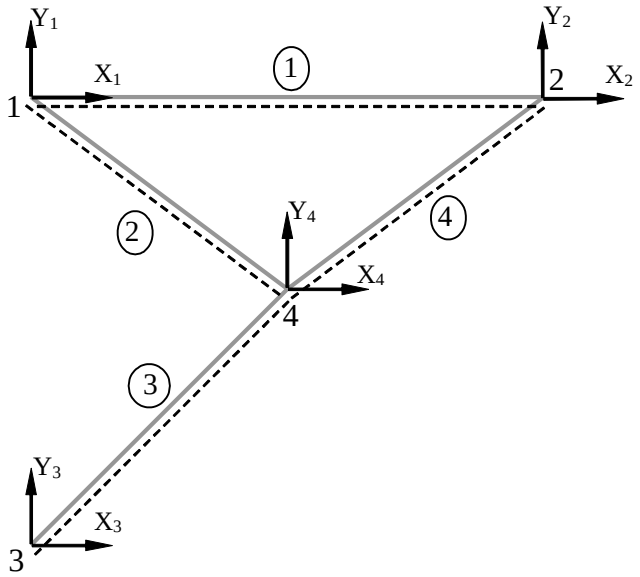
Izračunaj pomike, reakcije in notranje statične količine za ravninsko palično konstrukcijo na sliki (Slika 3.1). Vsi elementi so iz jeklenega profila IPE 200, ki ima modul elastičnosti E = 210 GPa.

Analizo dodatno izvedi še za primer, ko sila v desnem vozlišču deluje vodoravno desno namesto vertikalno.



Slika 3.1: Predstavitev primera 3

Uporabili bomo minimalni (in hkrati popolnoma zadosten) računski model s štirimi končnimi elementi v ravnini X–Y (Slika 3.2).

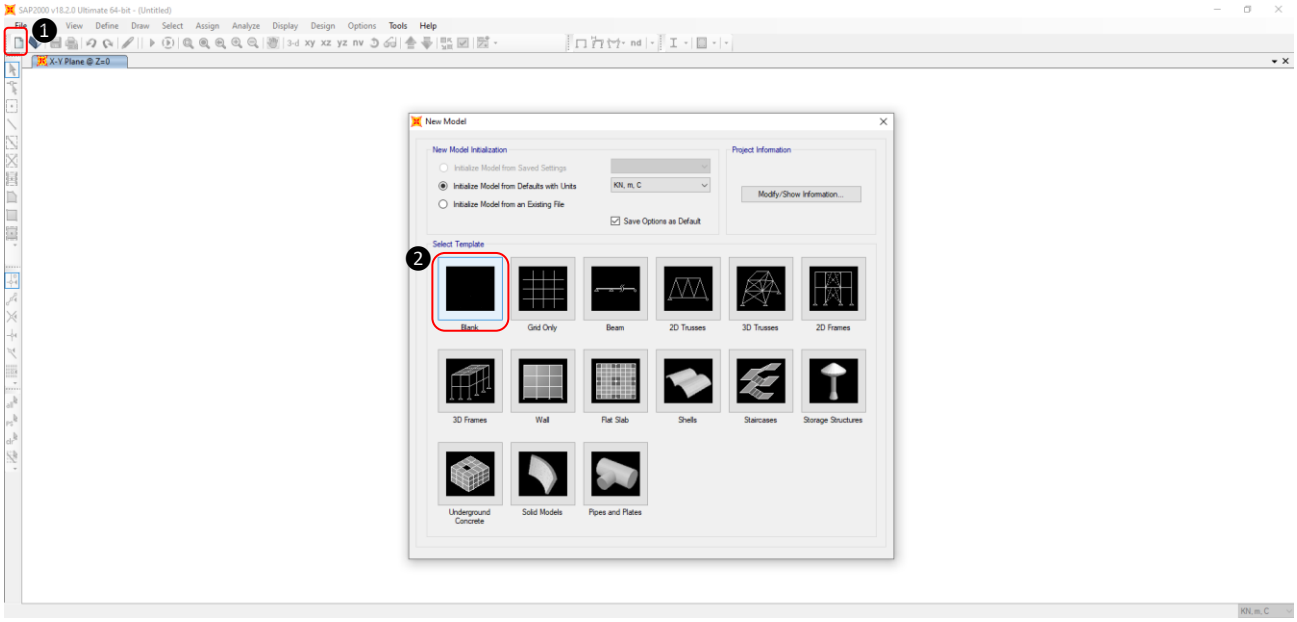


Slika 3.2: Označitev vozlišč, elementov in prostostnih stopenj konstrukcije

3.2 Podajanje podatkov v programu SAP2000

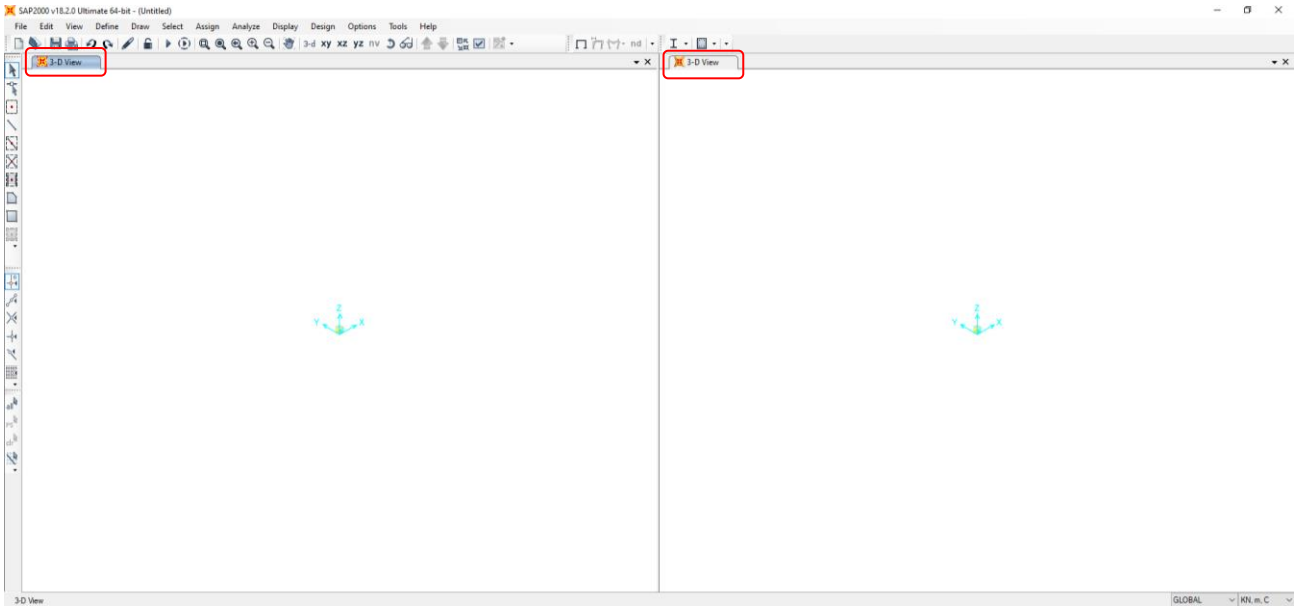
– Diskretizacija konstrukcije: definiranje ravnine X–Y

Po zagonu programa tokrat (iz demonstracijskih razlogov prikaza drugačnega pristopa) namesto na ikono *Grid Only* kliknemo na ikono praznega lista (Slika 3.3 – ❶). Po odprtju okna *New Model* v razdelku *Select Template* (enako kot v primerih 1 in 2) tokrat izberemo (namesto predloga *Grid only*) predlog *Blank* (Slika 3.3 – ❷).



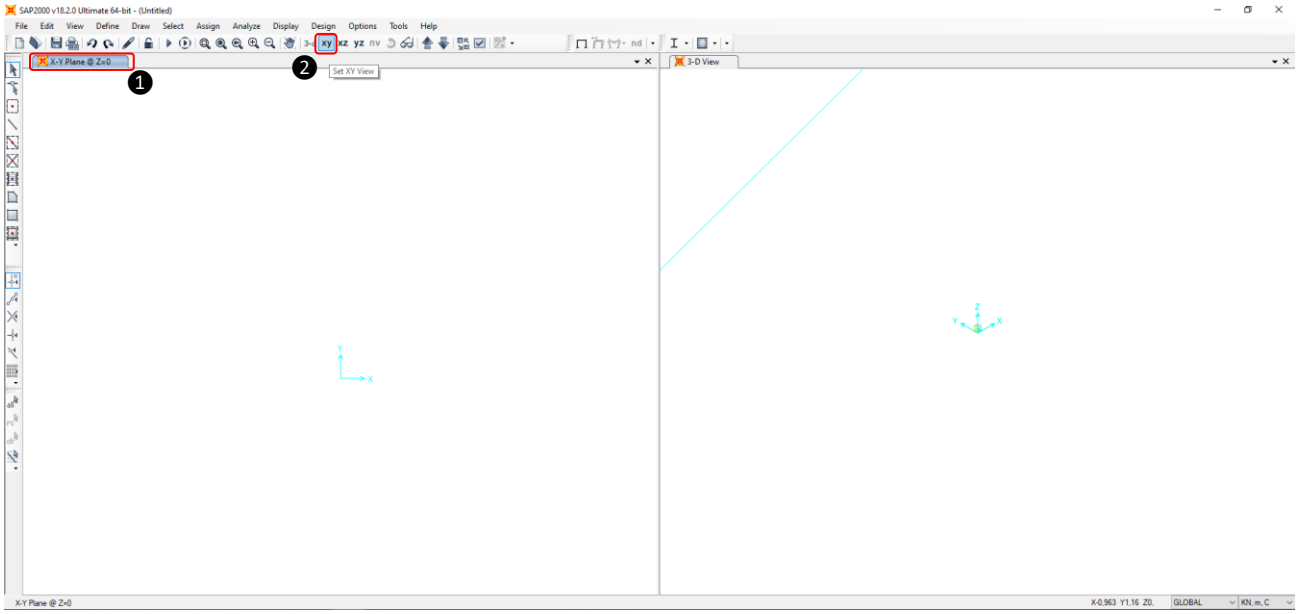
Slika 3.3: Izbira predloge

Pojavita se dva predefinirana 3D-pogleda, ki zasedata vsak polovico zaslona (Slika 3.4).



Slika 3.4: Izbira pogleda

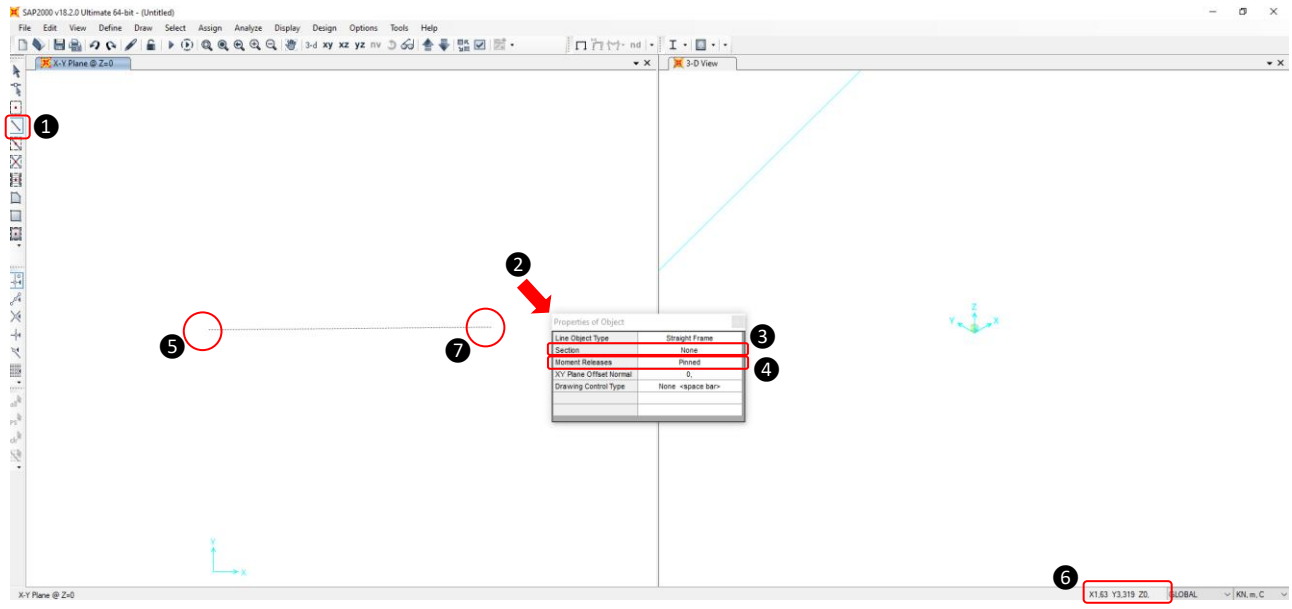
Če želimo v levem oknu spremeniti 3D-pogled v pogled X–Y, pazimo, da je okno aktivno, in v orodni vrstici kliknemo na ikono xy (Slika 3.5 – ❶). V levem oknu se namesto *3-D View* izpiše *X-Y Plane @ Z=0* (Slika 3.5 – ❷), ki označuje pogled v ravnini X–Y oziroma tlorisu.



Slika 3.5: Definiranje pogleda v ravnini *X–Y*

– Diskretizacija konstrukcije: definiranje končnih elementov (topologije)

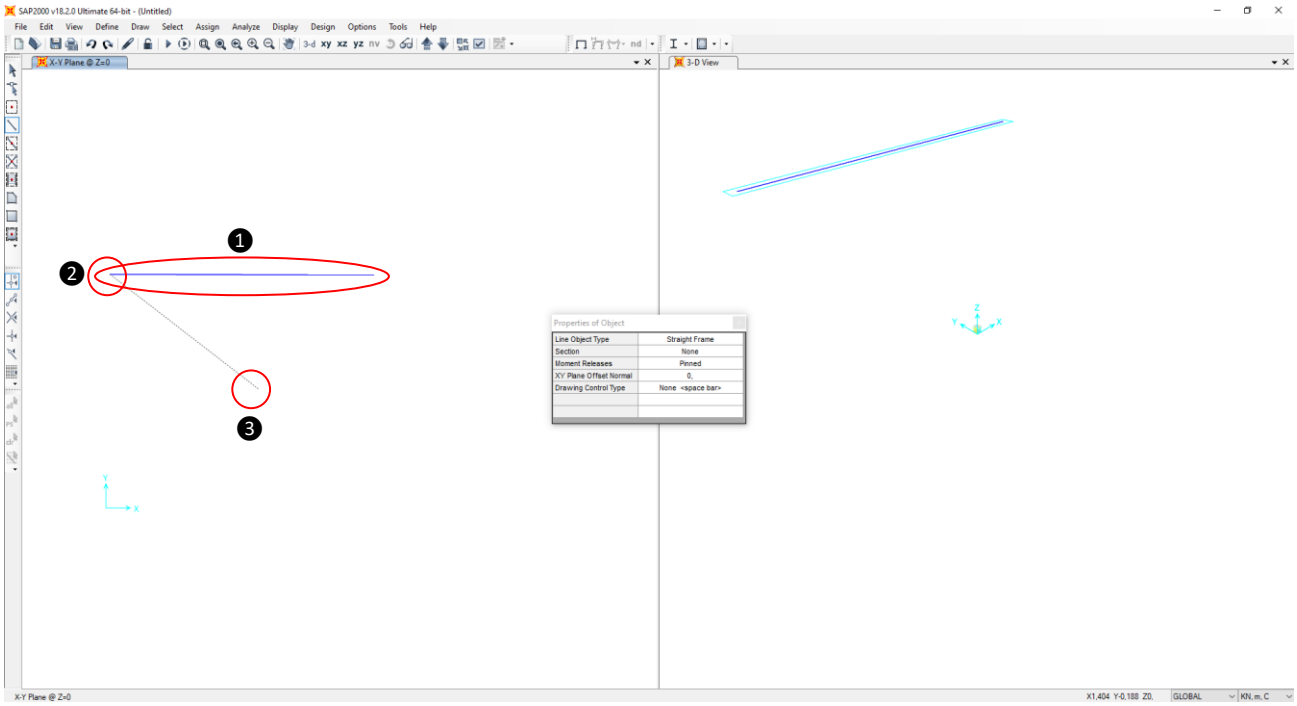
Za definiranje topologije končnih elementov najprej v orodni vrstici kliknemo na ikono (Slika 3.6 – ❶). Odpre se okno *Properties of Object*, kjer pred izrisom prvega končnega elementa najprej določimo njegove potrebne lastnosti (Slika 3.6 – ❷). Prereza končnega elementa trenutno še nismo definirali, zato v drugi vrstici *Section* izberemo *None* (Slika 3.6 – ❸). Za izris paličnih končnih elementov v tretji vrstici *Moment Releases* izberemo *Pinned* (Slika 3.6 – ❹). Vse ostale nastavitve pustimo tako, kot so bile že predhodno predefinirane.



Slika 3.6: Definiranje lege in izris prvega končnega elementa

Nato se s kazalcem pomaknemo v levo polovico okna (v pogled *X–Y*) in z levim klikom potrdimo približno lokacijo (Slika 3.6 – ❺) začetnega vozlišča (X ≈ 0 m; Y ≈ 3,5 m) prvega končnega elementa. Lokacijo kazalca spremljamo v desnem spodnjem kotu glavnega okna (Slika 3.6 – ❻). Kazalec nato premikamo proti končnemu vozlišču, kjer se sproti med začetno in trenutno lokacijo kazalca (Slika 3.6 – ❼) izrisuje pikčasta daljica.

Ko se s kazalcem nahajamo na približni lokaciji končnega vozlišča (X ≈ 4 m; Y ≈ 3,5 m), jo potrdimo z levim klikom na miški in izriše se prvi končni element (Slika 3.7 – ❶). Začetno vozlišče drugega končnega elementa se nahaja v začetnem vozlišču prvega končnega elementa. Zato najprej z desnim klikom na miški prekinemo nadaljnji izris drugega končnega elementa iz končnega vozlišča prvega končnega elementa. Nato se pomaknemo nazaj na začetno vozlišče prvega končnega elementa. Če želimo, da program zazna točno lokacijo že definiranega vozlišča, pri čemer se ob približanju kazalca izriše rdeči krogec, mora biti aktivna možnost (glej ***Opomba 2***, str. 16). Nato začetno vozlišče drugega končnega elementa (ko se izriše rdeči krogec) potrdimo z levim klikom (Slika 3.7 – ❷). Če možnost ni aktivna, se lahko s kazalcem vozlišču samo približamo in s klikom definiramo novo vozlišče, kar pomeni, da v tem primeru končna elementa medsebojno nista povezana. Kazalec premaknemo naprej na približno lokacijo končnega vozlišča (X ≈ 2,0 m; Y ≈ 2,0 m) drugega končnega elementa (Slika 3.7 – ❸) in potrdimo izris drugega končnega elementa z levim klikom na miško.



Slika 3.7: Definiranje in izris drugega končnega elementa

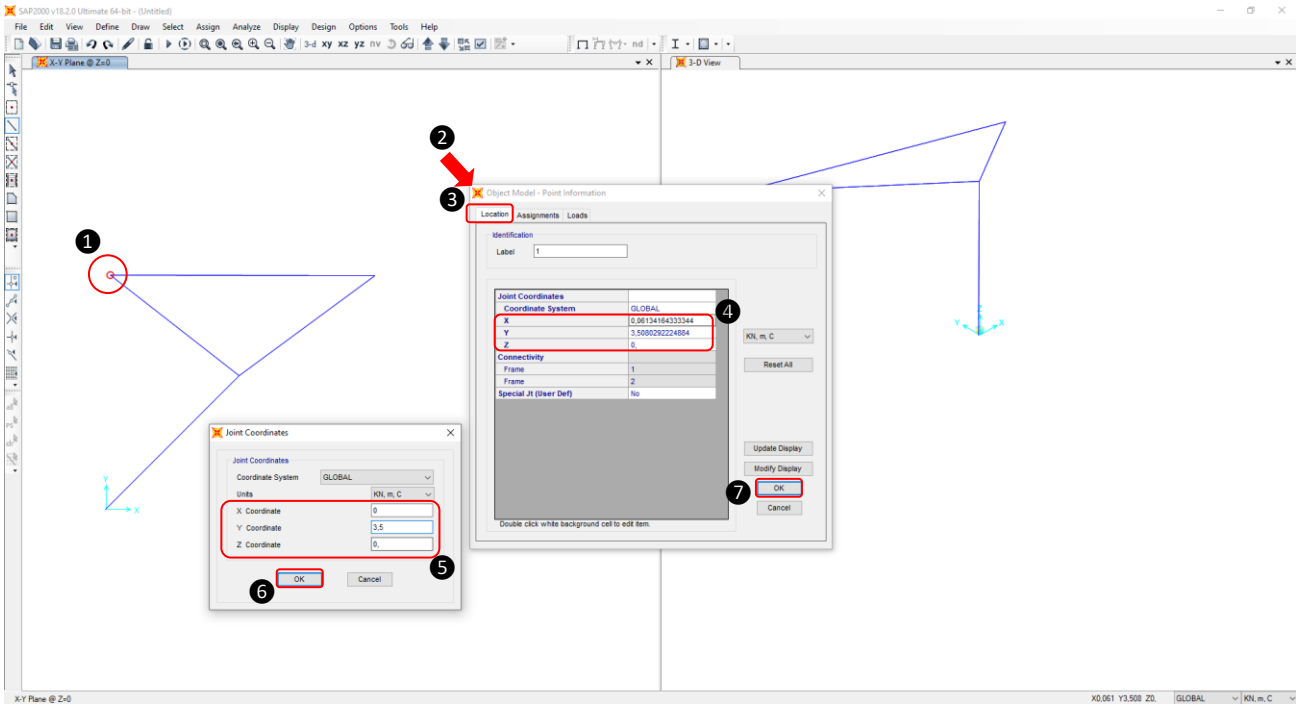
Na enak način nadaljujemo še s približnim izrisom tretjega in četrtega končnega elementa. Nato (po potrebi) sledi popravek vseh štirih vozlišč. S kazalcem se pomaknemo najprej na začetno vozlišče prvega in drugega končnega elementa ter nanj kliknemo z desnim gumbom miške (Slika 3.8 – ❶). Odpre se okno *Object model – Point information*, v katerem se nahajajo vse potrebne informacije o definiranem vozlišču (Slika 3.8 – ❷):

– *Location* (definirana lokacija);

– *Assignments* (morebitne dodeljene količine, kot so masa, vzmet, lokalna os, podpora itd.);

– *Loads* (morebitne dodeljene koncentrirane obtežbe).

Ker želimo spremeniti približno definirano lokacijo vozlišča, izberemo *Location* (Slika 3.8 – ❸). V tabeli *Joint Coordinates* so prikazane trenutne koordinate vozlišča (Slika 3.8 – ❹). Z dvojnim levim klikom miške na katerokoli od približno definiranih koordinat *X*, *Y* in *Z* se odpre novo okno *Join Coordinates*, v katerem lahko vse tri koordinate popravimo v točne vrednosti $X = 0$, $Y = 3{,}5$ m in $Z = 0$ (Slika 3.8 – ❺, glej ***Opomba 4***, str. 18). Vse skupaj potrdimo s klikom na *OK* v oknu *Join Coordinates* (Slika 3.8 – ❻). Potrditev nato še enkrat ponovimo v oknu *Object model – Point information* (Slika 3.8 – ❼).

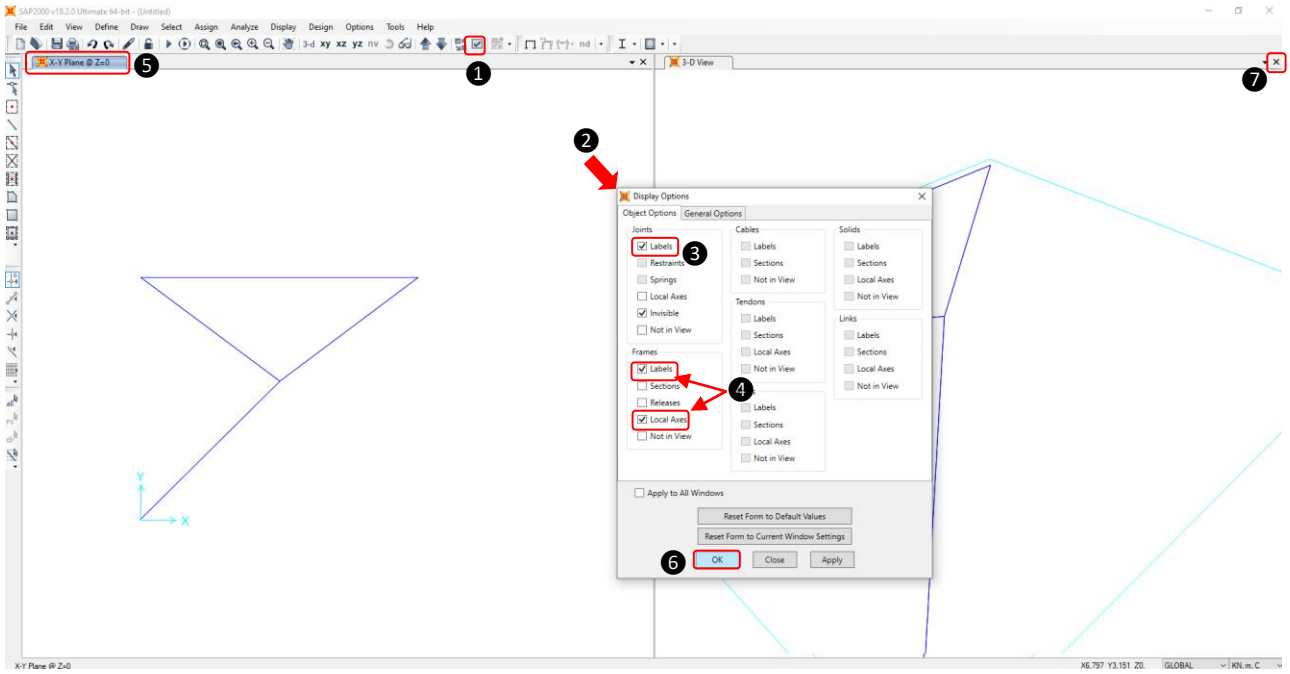


Slika 3.8: Popravek koordinat vozlišč končnih elementov

Postopek (ki ni prikazan v korakih) ponovimo še za ostala tri vozlišča, torej popravimo njihove netočne lokacije.

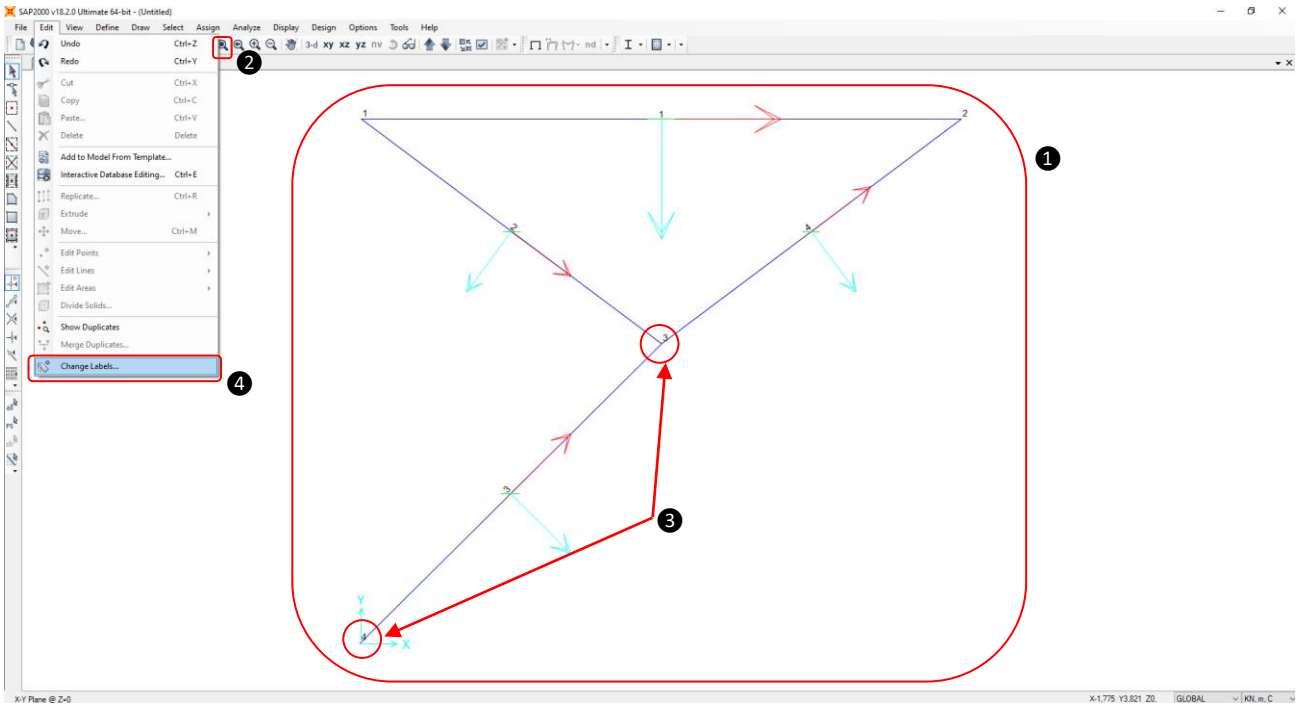
– *Diskretizacija konstrukcije: spreminjanje oznak elementov in vozlišč*

Če želimo v pogledu ravnine *X–Y* imeti prikazana označena vozlišča in usmeritve končnih elementov, potem v glavnem meniju kliknemo najprej na *View* in nato v visečem meniju na *Set Display Options* ..., še hitreje pa lahko to storimo kar v orodni vrstici s klikom na ikono ☑ (Slika 3.9 – ❶). Odpre se okno *Display Options* (Slika 3.9 – ❷). Za oštevilčenje oznak vozlišč v razdelku *Joint* kliknemo na *Labels* (Slika 3.9 – ❸). Za oštevilčenje oznak in izris usmeritev lokalnih osi elementov v razdelku *Frames* kliknemo na *Labels* in *Local Axes* (Slika 3.9 – ❹). Pazimo, da imamo aktivno levo okno (Slika 3.9 – ❺), in vse skupaj potrdimo s klikom na *OK* (Slika 3.9 – ❻). Opcijsko lahko okno v 3D-pogledu (*3-D View*), ki pri ravninski analizi ni potreben, s klikom na ikono ✕ (Slika 3.9 – ❼) zapremo in s tem še povečamo prostor za prikaz ravninske palične konstrukcije v pogledu X–Y.



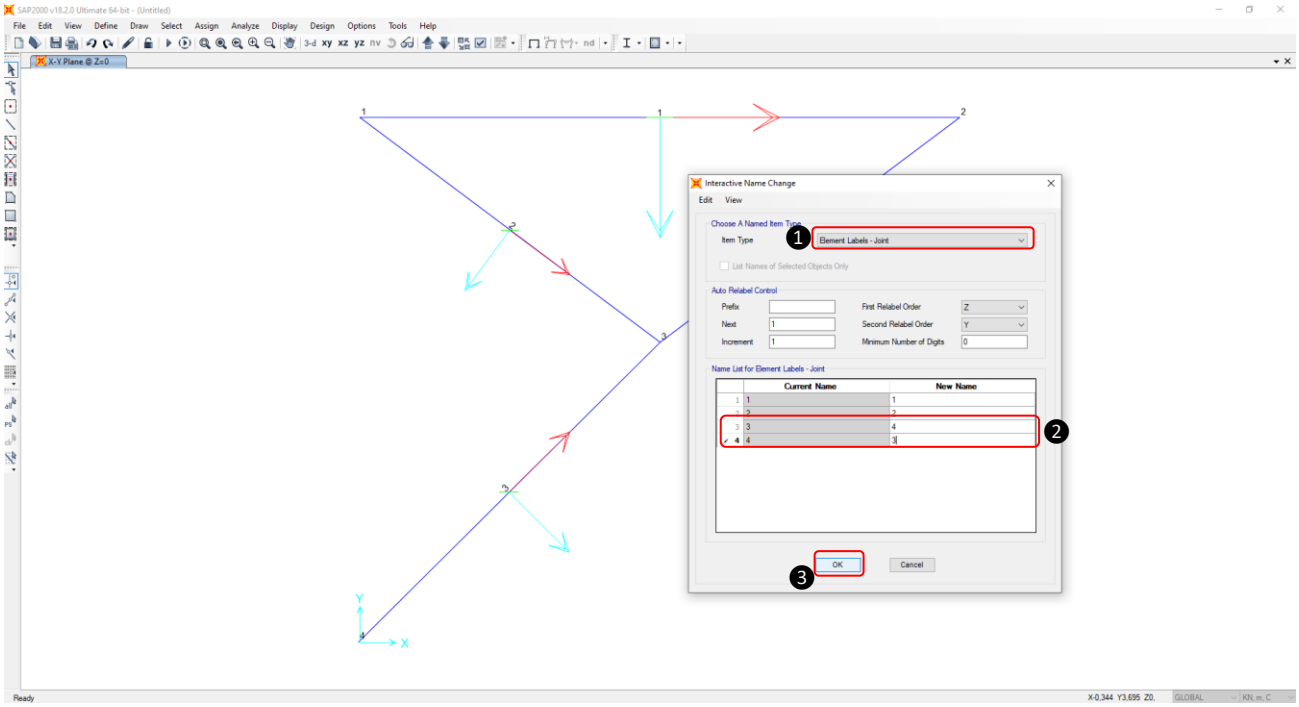
Slika 3.9: Nastavitve prikaza konstrukcije

V aktivnem oknu se na izrisani palični konstrukciji prikažejo še oznake vozlišč in elementov ter lokalne osi elementov (Slika 3.10 – ❶). Konstrukcijo v ravnini X–Y lahko povečamo na celo okno s klikom na ikono 🔍 (Slika 3.10 – ❷). Vidimo lahko (Slika 3.10 – ❸), da sta oznaki vozlišč 3 in 4 neskladni z izbrano diskretizacijo (glej Slika 3.2), saj je program vozlišča oštevilčil glede na vrstni red njihovega definiranja ob podajanju topologije elementov. Označbe vozlišč lahko najlažje popravimo tako, da v glavnem meniju izberemo *Edit* in se nato v visečem meniju pomaknemo na *Change Labels* (Slika 3.10 – ❹) ter izbiro potrdimo.



Slika 3.10: Označba vozlišč in elementov ter lokalne osi elementov

Odpre se okno *Interactive Name Change*. Za spreminjanje oznak vozlišč v razdelku *Choose A Named Item Type* izberemo *Element Labels – Joint* (Slika 3.11 – ❶). Nato se s kazalcem pomaknemo v razdelek *Name List for Element Labels – Joint* in v drugem stolpcu (z imenom *New Name*) preimenujemo vozlišče 3 v vozlišče 4 ter vozlišče 4 v vozlišče 3 (Slika 3.11 – ❷). Spremembo potrdimo še z *OK* (Slika 3.11 – ❸). Ob kliku na *OK* se oznaki vozlišč zamenjata, tako dobimo povsem enake oznake vozlišč in elementov ter usmerjenost lokalnih osi elementov, kot smo jih izbrali na začetku (Slika 3.2).



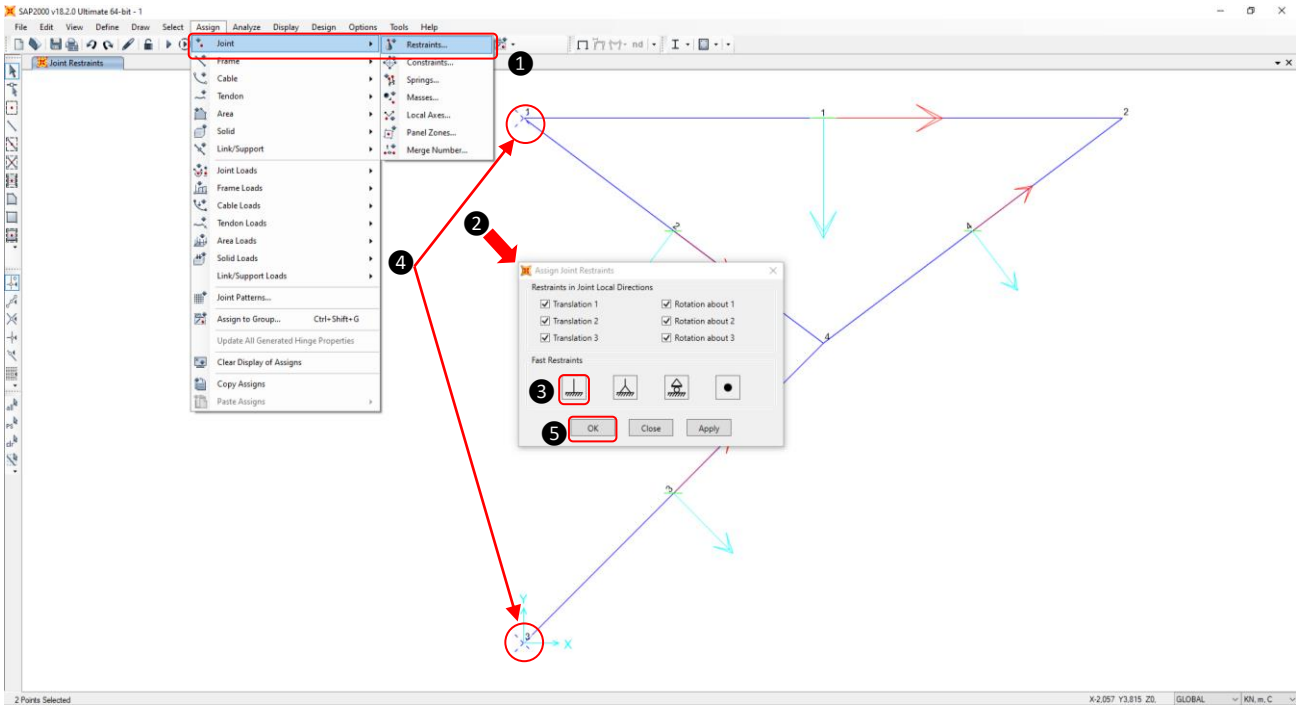
Slika 3.11: Spreminjanje oznak vozlišč

– Diskretizacija konstrukcije: definiranje kinematičnih robnih pogojev (podpor)

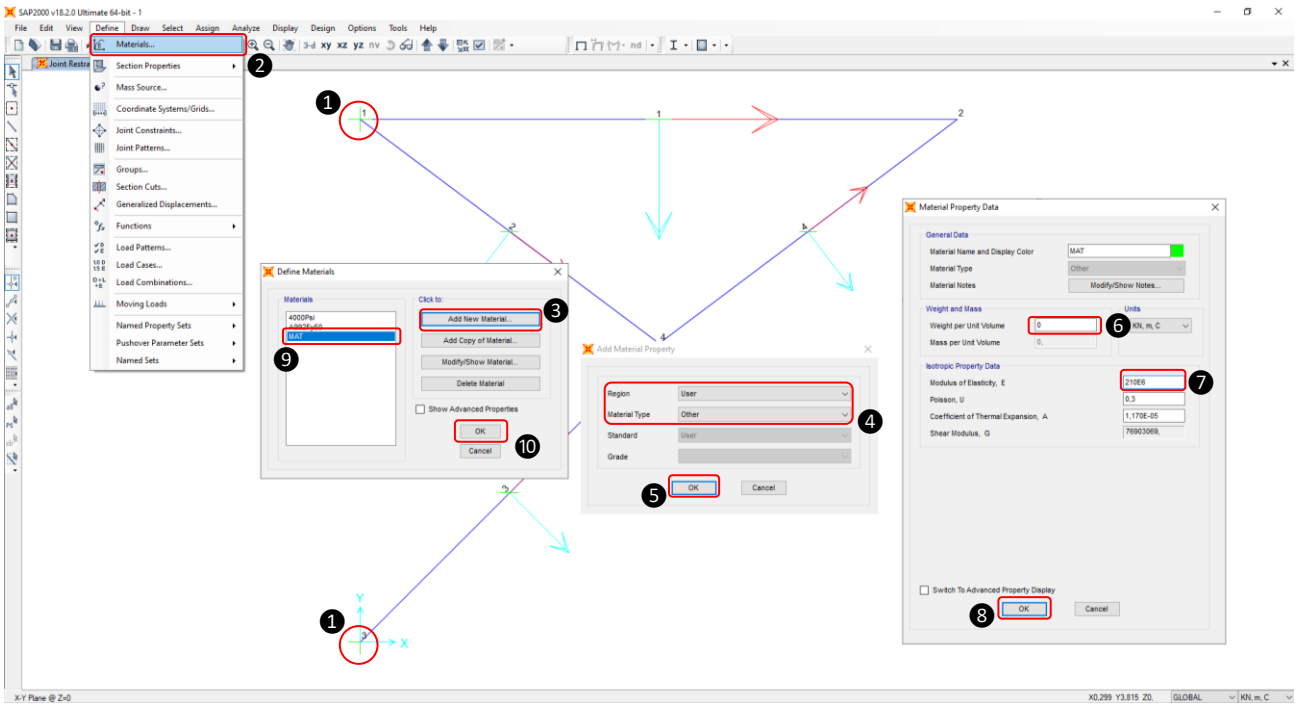
Za definiranje podprtih vozlišč v glavnem meniju kliknemo na *Assign*, nato se v visečem meniju pomaknemo na *Joint* in izberemo *Restraints* ... (Slika 3.12 – ❶). Odpre se novo okno *Assign Joint Restraints* (Slika 3.12 – ❷). Podpori lahko definiramo kot vpeti, saj so v elementih že upoštevani sproščeni upogibni momenti. Najhitreje pa ju definiramo v razdelku *Fast Restraints* s klikom na ikono (Slika 3.12 – ❸). Označimo obe vozlišči 1 in 3, ki ju želimo podpreti (Slika 3.12 – ❹), ter izbiro potrdimo z *OK* (Slika 3.12 – ❺). Izris podpor v vozliščih 1 in 3 je razviden iz slike (Slika 3.13 – ❶).

– Diskretizacija konstrukcije: definiranje materiala

Material definiramo tako, da se v glavnem meniju pomaknemo na *Define* in v visečem meniju izberemo *Materials* ... (Slika 3.13 – ❷). Odpre se okno *Define Materials* in v razdelku *Click to:* izberemo *Add New Material* ... (Slika 3.13 – ❸). Odpre se okno *Add Material Property*, kjer v dveh visečih menijih *Region* in *Material Type* izberemo *User* in *Other* (Slika 3.13 – ❹) ter izbiro potrdimo z *OK* (Slika 3.13 – ❺). Odpre se novo okno *Material Property Data*, kjer določimo material s težo 0 (Slika 3.13 – ❻) in za elastični modul $E = 210 \cdot 10^6$ kPa v polje zapišemo 210E6 (Slika 3.13 – ❼) ter izbiro potrdimo s klikom na *OK* (Slika 3.13 – ❽). V oknu *Define Materials* se pojavi na novo definiran material s predefiniranim imenom *MAT* (Slika 3.13 – ❾). Potrdimo ga s ponovnim klikom na *OK* (Slika 3.13 – ❿).



Slika 3.12: Podajanje podpor

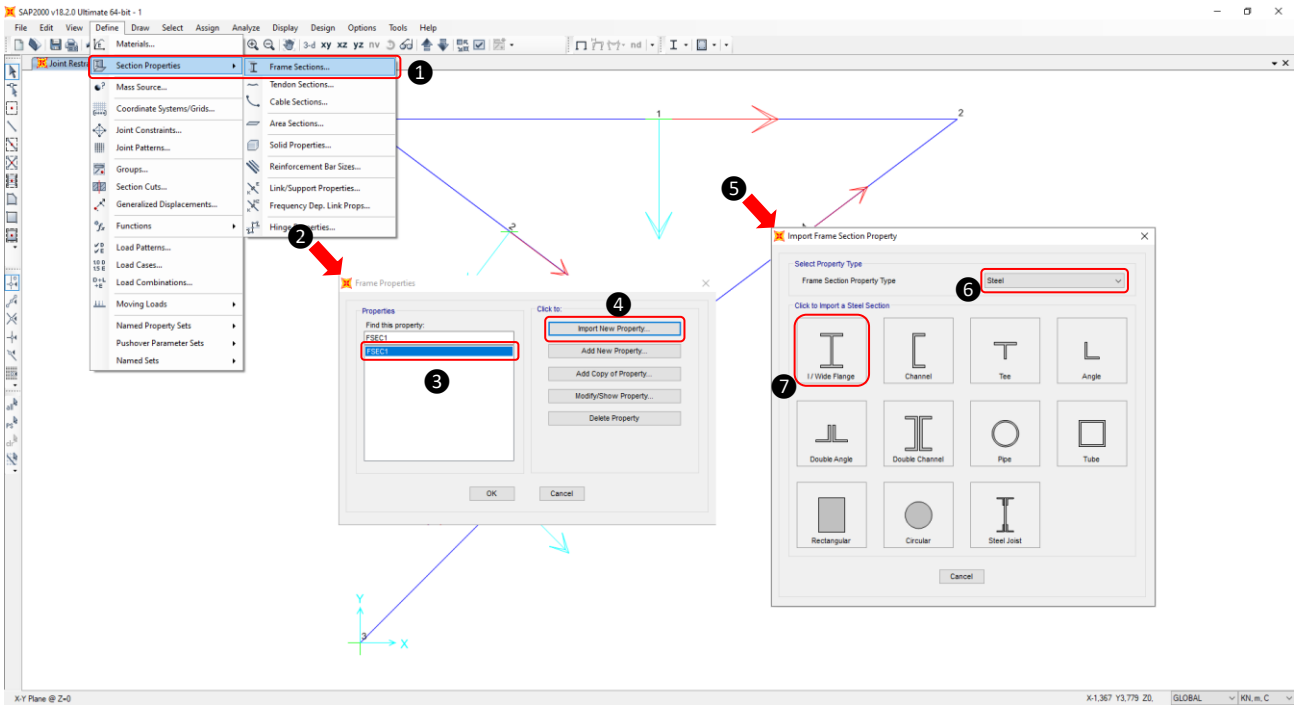


Slika 3.13: Definiranje materiala

—

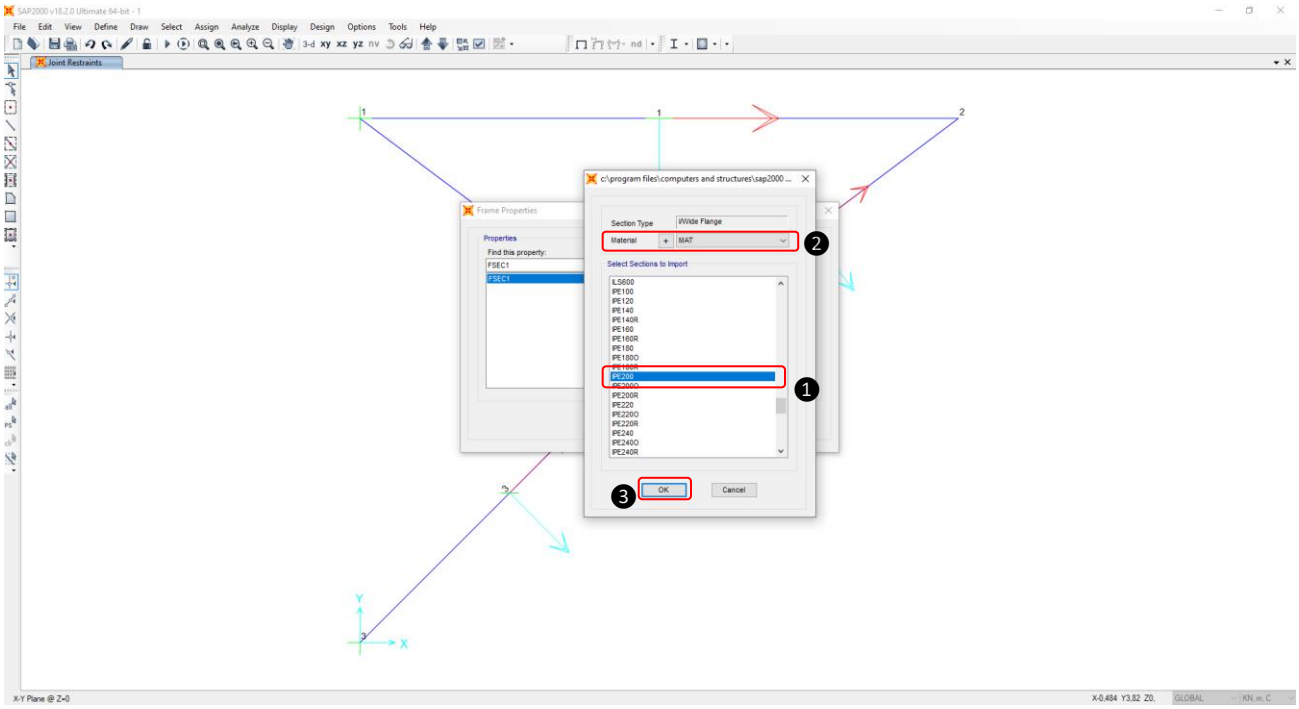
Diskretizacija konstrukcije: definiranje prereza

Za definiranje prereza v glavnem meniju najprej kliknemo na *Define*, se pomaknemo na *Section Properties* ... in nato še na *Frame Sections* ..., ki ga s klikom potrdimo (Slika 3.14 – ❶). Odpre se okno *Frame Properties* (Slika 3.14 – ❷). V razdelku *Properties* že obstaja predefiniran prerez z imenom *FSEC1* (Slika 3.14 – ❸). Program ga je samodejno definiral, ker smo (enako kot pri drugem primeru) namesto prereza najprej definirali in izrisali končne elemente. Standardizirani profil IPE 200 je že v bazi profilov programa SAP2000, ki ga uvozimo tako, da najprej v razdelku *Click to:* izberemo *Import New Property* (Slika 3.14 – ❹). Odpre se okno *Import Frame Section Property* (Slika 3.14 – ❺). V razdelku *Select Property Type* izberemo *Steel* (Slika 3.14 – ❻) in nato v razdelku *Clik to Import a Steel Section* kliknemo na ikono I profila (Slika 3.14 – ❼).



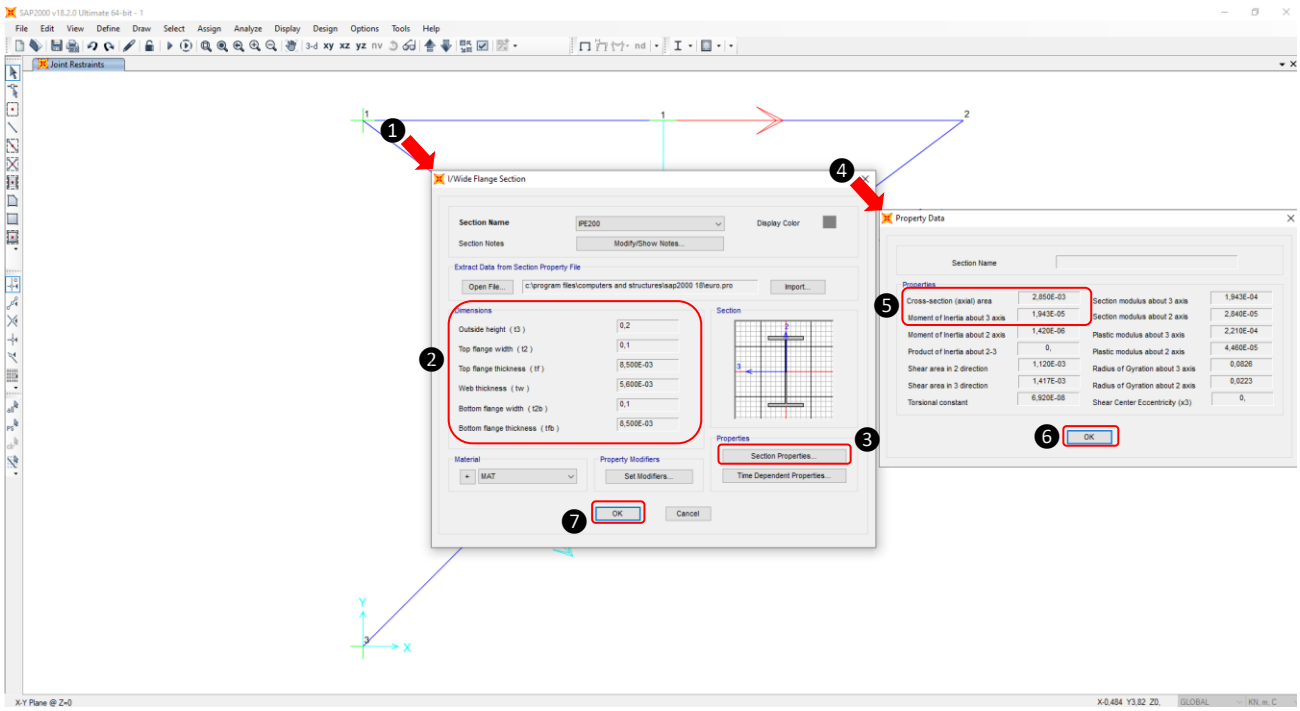
Slika 3.14: Definiranje prereza

Ob kliku na ikono se odpre okno s seznamom standardiziranih profilov I, med katerimi v razdelku *Select Sections to Import* poiščemo in izberemo profil IPE200 (Slika 3.15 – ❶). V razdelku *Material* pa na seznamu definiranih materialov izberemo material za izbran prerez z oznako *MAT* (Slika 3.15 – ❷). Vse skupaj nato le še potrdimo s klikom na *OK* (Slika 3.15 – ❸).



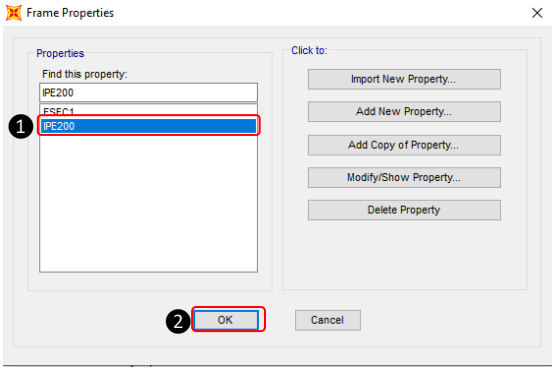
Slika 3.15: Izbira profila na seznamu

Odpre se okno *I/Wide Flange Section* (Slika 3.16 – ❶), kjer so v razdelku *Dimensions* izpisane dimenzije standardiziranega profila IPE200 (Slika 3.16 – ❷). S klikom na ikono *Section Properties* ... (Slika 3.16 – ❸) se odpre novo okno *Property Data* (Slika 3.16 – ❹). Preverimo lahko, da sta geometrijski karakteristiki (Slika 3.16 – ❺) površina *A* in vztrajnostni moment *Iz* prereza enaki kot v podatkih naloge. Okno *Property Data* zapremo s klikom na *OK* (Slika 3.16 – ❻). Izbrani profil IPE200 dokončno potrdimo s klikom na *OK* (Slika 3.16 – ❼).



Slika 3.16 Dimenzije izbranega profila IPE

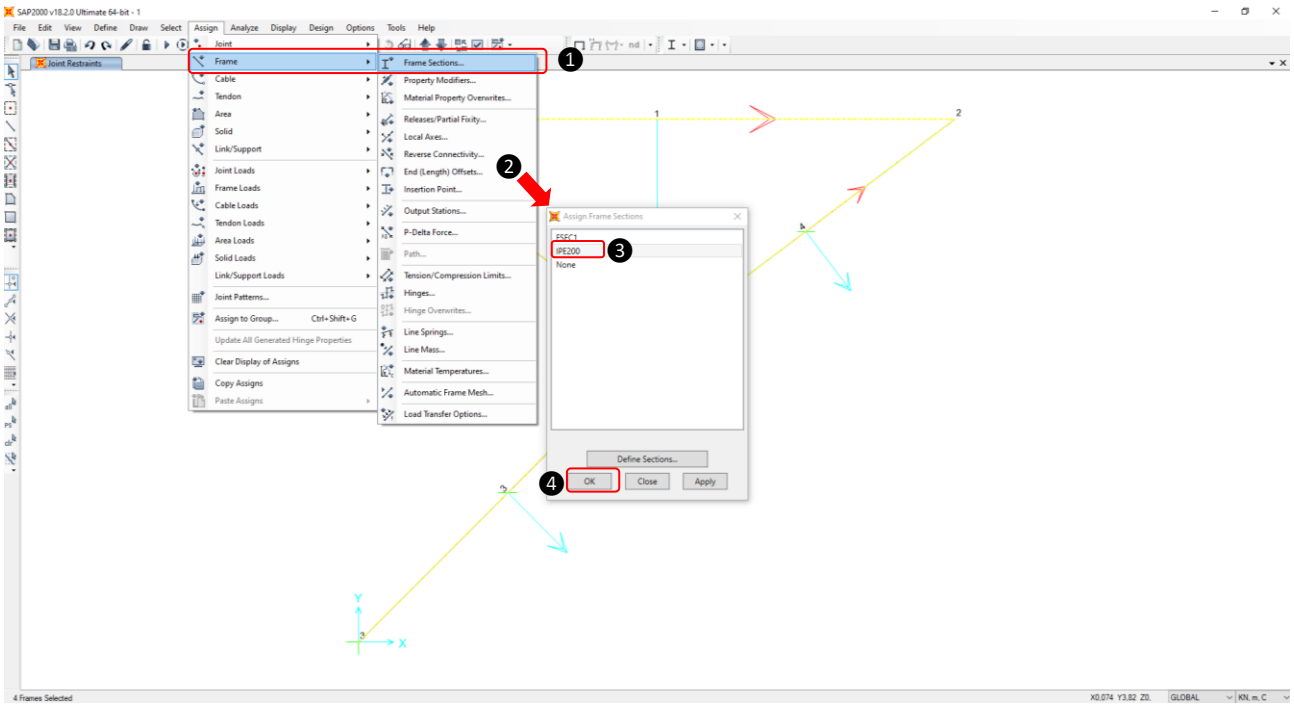
V oknu *Frame Properties* se na novo definiran prerez z oznako IPE200 (profil) izpiše v razdelku *Properties* (Slika 3.17 – ❶). Prerez dokončno potrdimo s klikom na *OK* (Slika 3.17 – ❷).



Slika 3.17: Potrditev izbranega profila IPE200

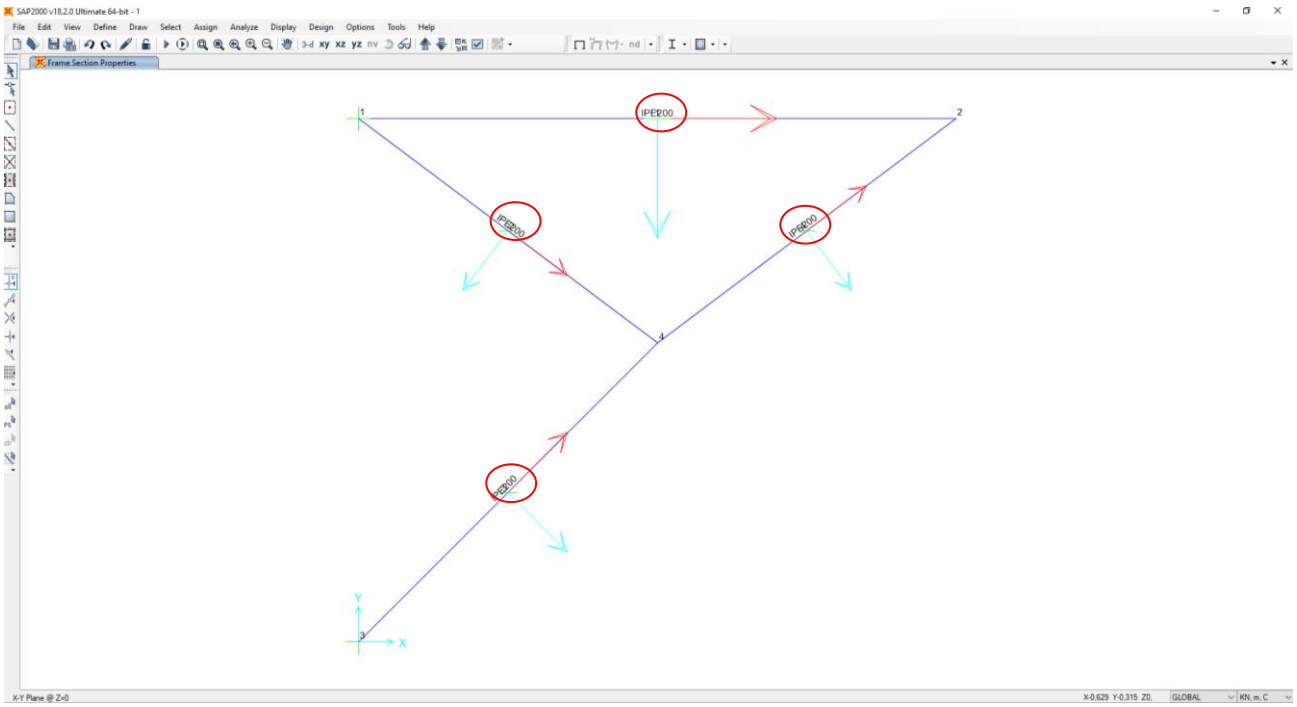
– *Diskretizacija konstrukcije: dodelitev prereza končnim elementom konstrukcije*

Za dodelitev pripadajočega prereza IPE200 izrisanim končnim elementom v glavnem meniju najprej kliknemo na *Assign*. Nato se v visečem meniju pomaknemo na *Frame*, in ko se prikaže nov viseči meni, kliknemo še na *Frame Sections* ... (Slika 3.18 – ❶). Odpre se novo okno *Assign Frame Sections* s seznamom vseh definiranih prerezov (Slika 3.18 – ❷). Označimo (bodisi posamezno bodisi vse naenkrat) vse štiri končne elemente (označeni elementi so rumene barve) in na seznamu izberemo predhodno definiran profil IPE200 (Slika 3.18 – ❸). Izbiro potrdimo s klikom na *OK* (Slika 3.18 – ❹).



Slika 3.18: Dodelitev prereza končnim elementom

V pogledu ravnine X–Y se nato na vseh štirih končnih elementih izrišejo oznake dodeljenih prerezov, ki se prekrivajo skupaj z oznakami elementov (Slika 3.19), kadar so te prikazane.



Slika 3.19: Izpis oznak dodeljenih prerezov na končnih elementih palične konstrukcije

– *Določitev obtežb*

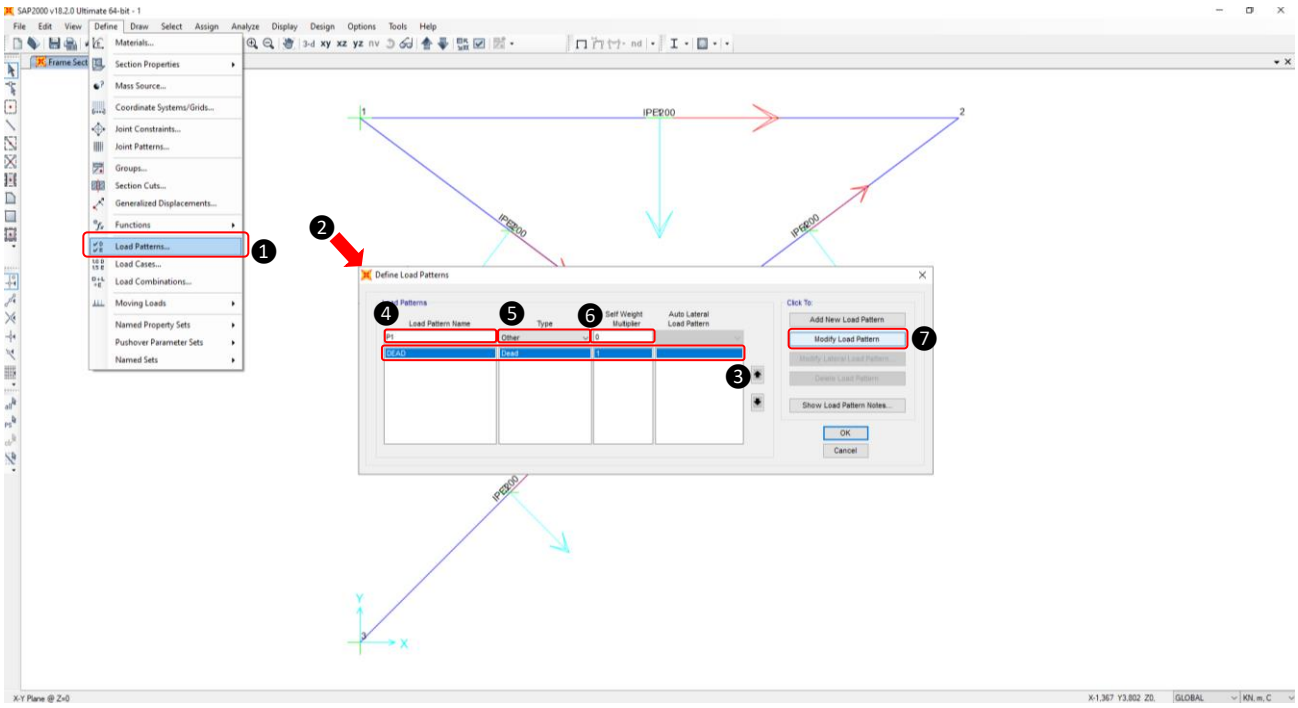
V nalogi sta dodeljena dva obtežna primera, zato je treba najprej definirati posamezne obtežne primere, ki bodo lahko ločeno ali skupaj upoštevani v dveh obtežnih primerih. V glavnem meniju kliknemo na *Define* in v visečem meniju izberemo *Load Patterns* ... (Slika 3.20 – ❶). Odpre se okno *Define Load Patterns* (Slika 3.20 – ❷). V razdelku *Load Patterns* imamo že sistemsko predefinirano ime obtežnega primera (Slika 3.20 – ❸). Za definiranje imena novega obtežnega primera izpolnimo naslednja okenca:

– *Load pattern Name* (vpišemo ime obtežnega primera);

– *Type* (izberemo vrsto/tip obtežnega primera);

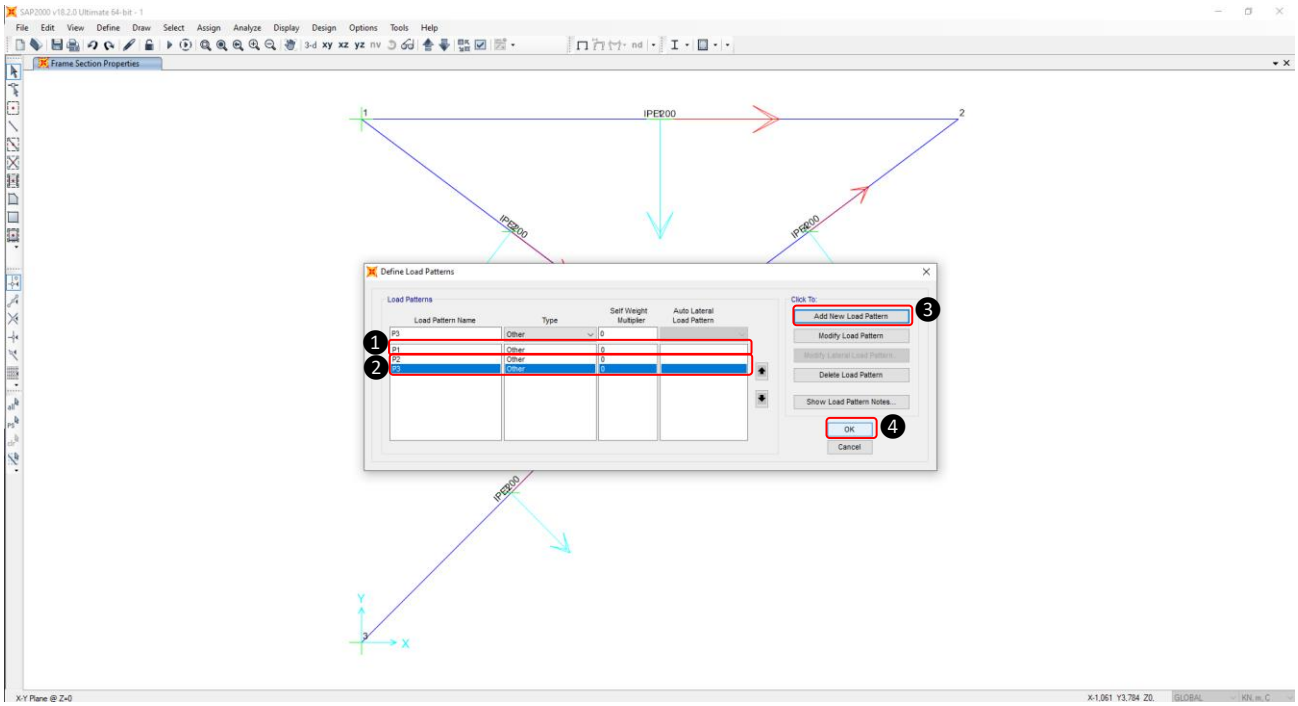
– *Self Weight Multipler* (vpišemo faktor velikosti upoštevane lastne teže konstrukcije obtežnega primera);

V nadaljevanju glede na izbiro lokalnega koordintnega sistema vozlišč definiramo imena treh obtežnih primerov (z izbranimi imeni, na primer *P1*, *P2* in *P3*) za vsako delujočo silo posebej. Obtežni primer *P1* tako predstavlja silo 20 kN v negativni smeri lokalne osi *Y* vozlišča 4. Obtežni primer *P2* predstavlja silo 10 kN prav tako v negativni smeri lokalne osi *Y* vozlišča 2. Zadnji obtežni primer *P3* pa predstavlja silo 10 kN v pozitivni smeri lokalne osi *X* vozlišča 2. Za imensko definiranje prvega obtežnega primera v okno pod *Load pattern Name* v prvem stolpcu vpišemo ime obtežnega primera *P1* (Slika 3.20 – ❹). V drugem stolpcu z imenom *Type* izberemo vrsto obtežnega primera. Ker obtežni primer tega primera konstrukcije ni eksplicitno definiran po imenu, v visečem meniju izberemo *Other* (Slika 3.20 – ❺). V tretjem stolpcu pa v okno pod *Self Weight Multipler* vpišemo faktor, s katerim multipliciramo lastno težo konstrukcije. V našem primeru lastna teža konstrukcije ne bo upoštevana, zato izberemo faktor 0 (Slika 3.20 – ❻). Za analizo nepotreben sistemsko že predefinirani obtežni primer z imenom *DEAD* nadomestimo z novim obtežnim primerom s klikom na *Modify Load Pattern* (Slika 3.20 – ❼).



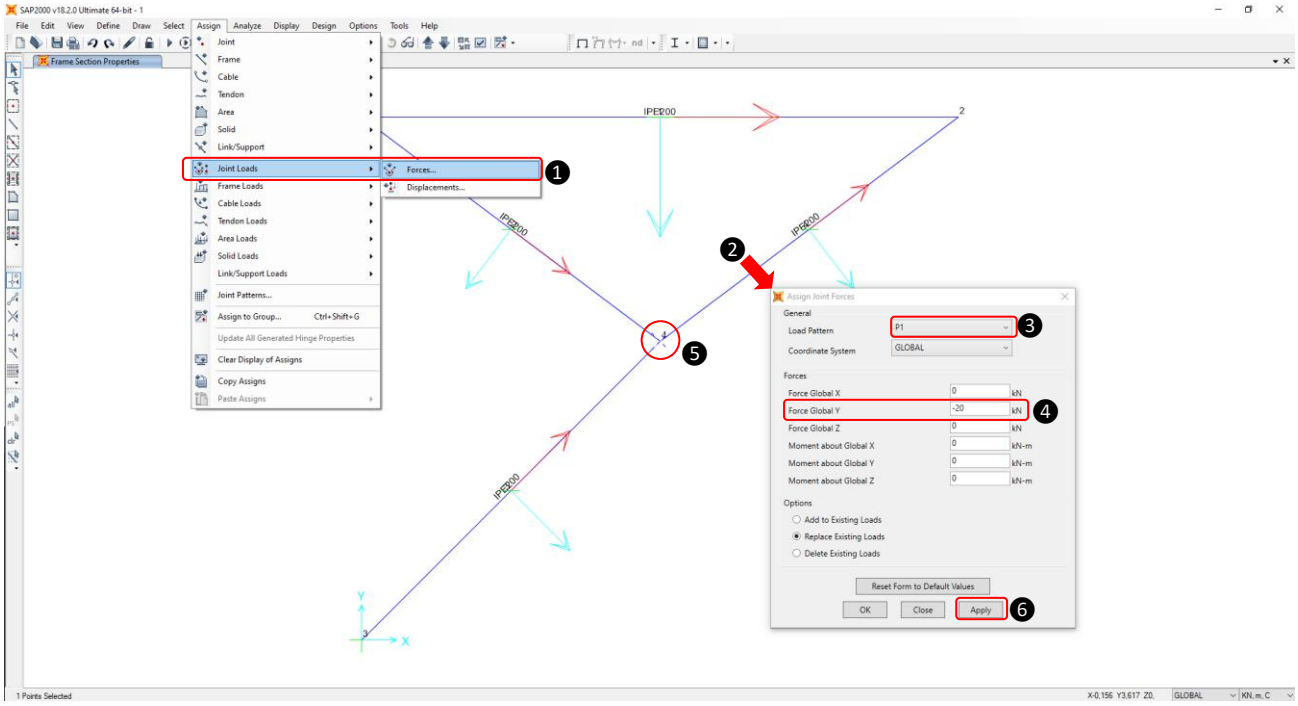
Slika 3.20: Določitev obtežnih primerov

Na seznamu se namesto že predefiniranega obtežnega primera izpiše na novo definirani obtežni primer (Slika 3.21 – ❶). Na seznam dodamo še ostala dva obtežna primera z imenoma *P2* in *P3* (Slika 3.21 – ❷), le da po vpisu imen *P2* in *P3* namesto na *Modify Load Pattern* kliknemo tokrat na *Add New Load Pattern* (Slika 3.21 – ❸). Z imeni definirane obtežne primere potrdimo s klikom na *OK* (Slika 3.21 – ❹).



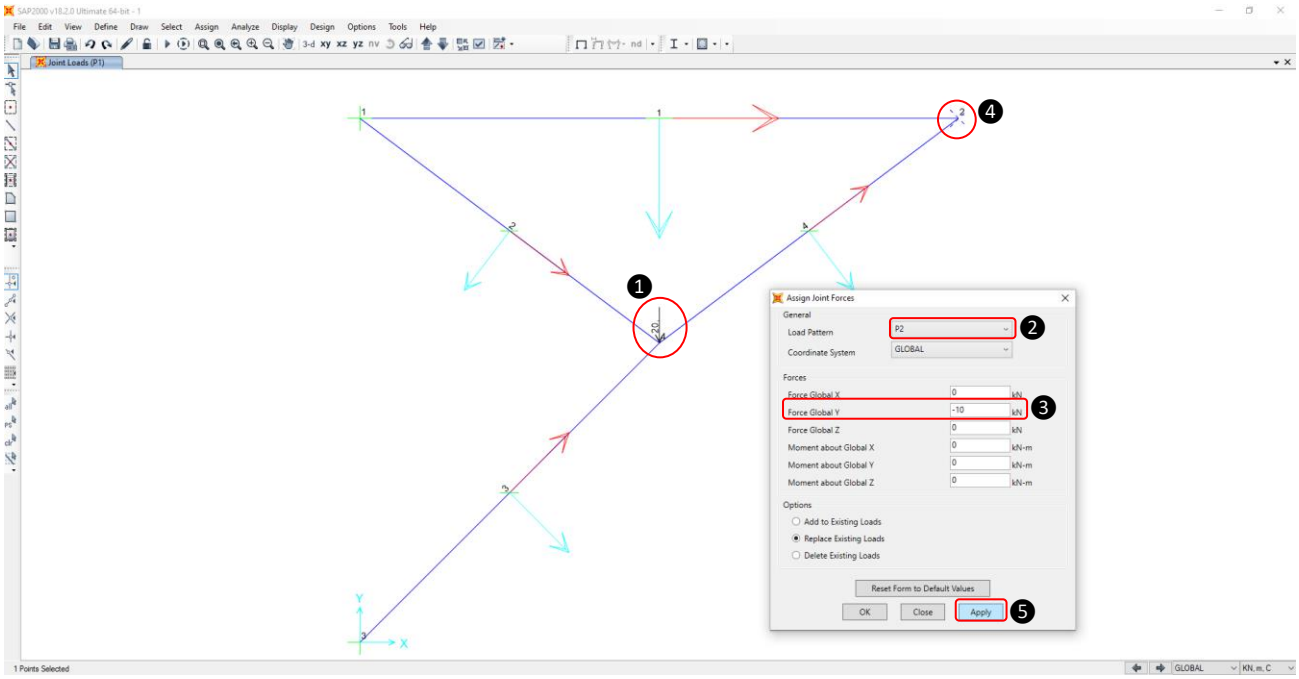
Slika 3.21: Določitev vzorcev obtežb

Poimensko definirane obtežne primere lahko sedaj apliciramo na konstrukcijo. V glavnem meniju kliknemo na *Assign*, se v visečem meniju pomaknemo na *Joint Loads* in kliknemo na *Forces* ...(Slika 3.22 – ❶). Odpre se okno *Assign Joint Forces* (Slika 3.22 – ❷). V razdelku *General* na seznamu definiranih obtežnih primerov *Load Pattern* izberemo najprej *P1* (Slika 3.22 – ❸). V razdelku *Forces* pa podamo še ustrezno smer in velikost sile ali momenta obtežnega primera. Glede na globalni koordinatni system konstrukcije deluje sila v obtežnem primeru *P1* v negativni smeri koordinate *Y*, zato vpišemo (v kN) vrednost –20 v okno poleg *Force Global Y* (Slika 3.22 – ❹). Pred potrditvijo apliciranja sile še označimo vozlišče 4 (Slika 3.22 – ❺). Nato izbiro potrdimo s klikom na *Apply* (Slika 3.22 – ❻).



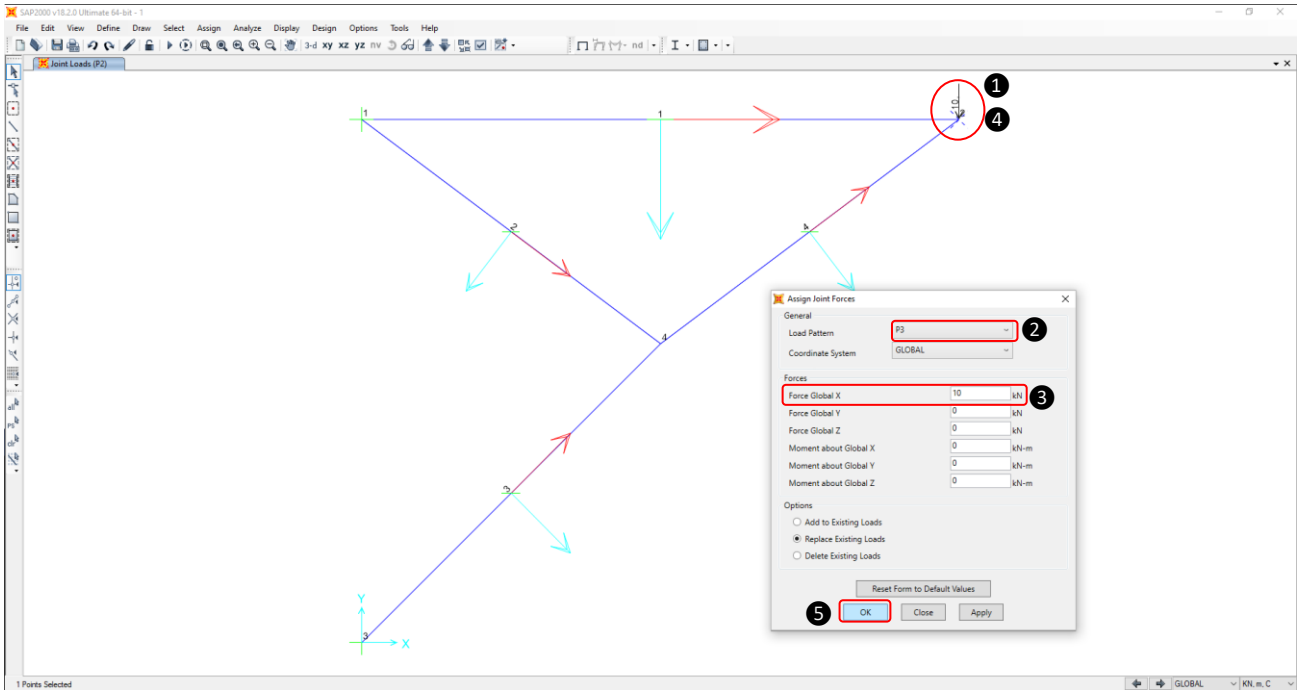
Slika 3.22: Vnašanje obtežb na konstrukcijo za obtežni primer P1

Ob kliku na *Apply* se na izrisani konstrukciji v vozlišču 4 prikaže edina aplicirana sila za obtežni primer P1 (Slika 3.23 – ❶), hkrati pa ostane okno *Assign Joint Forces* še vedno odprto za nadaljnje definiranje obtežnih primerov. Tokrat na seznamu *Load Pattern* izberemo obtežni primer *P2* (Slika 3.23 – ❷). Sila obtežnega primera *P2* glede na globalni koordinatni system prav tako deluje v negativni smeri *Y*, zato vpišemo (v kN) vrednost –10 v okno poleg *Force Global Y* (Slika 3.23 – ❸). Pred potrditvijo apliciranja sile označimo vozlišče 2 (Slika 3.23 – ❹) in ponovno kliknemo na *Apply* (Slika 3.23 – ❺).



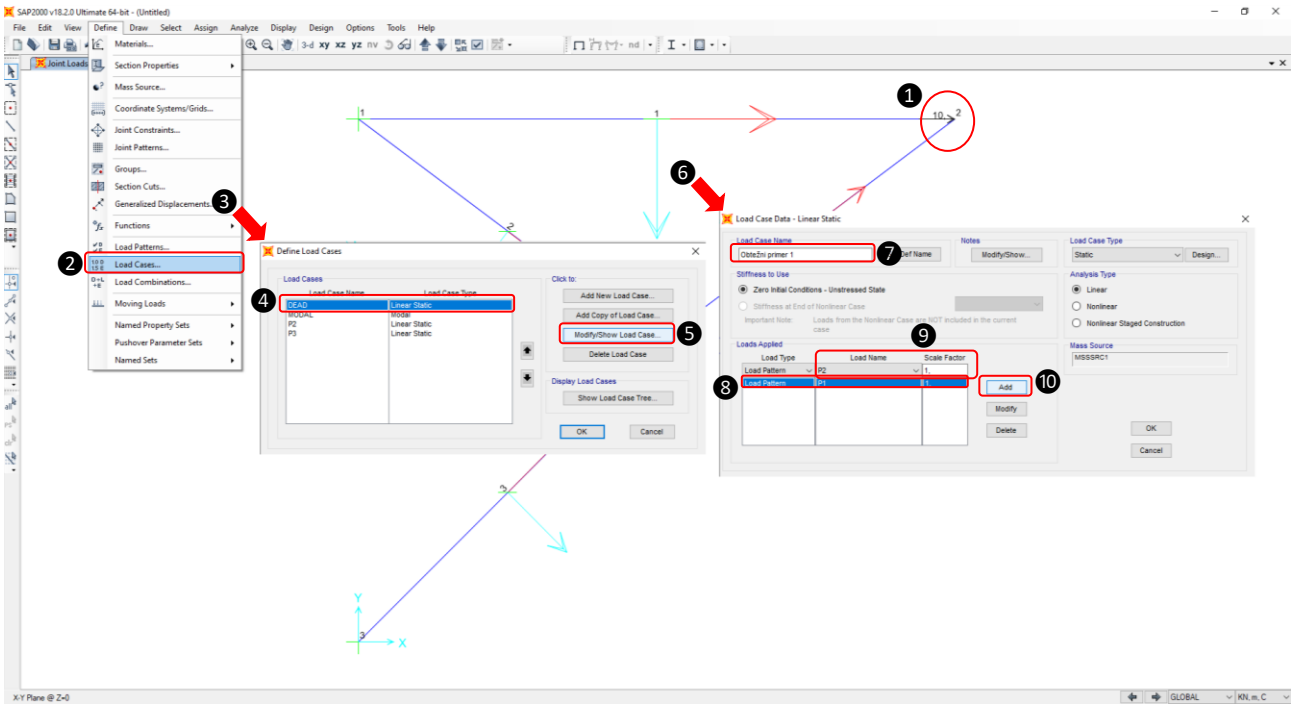
Slika 3.23: Vnašanje obtežb na konstrukcijo za obtežni primer P2

Ob kliku na *Apply* se na izrisani konstrukciji v vozlišču 2 izgine sila iz obtežnega primera P1, hkrati pa se prikaže edina vnesena sila za obtežni primer P2 (Slika 3.24 – ❶). Okno *Assign Joint Forces* ostane še vedno odprto za nadaljnji vnos tretjega (zadnjega) obtežnega primera. Tokrat na seznamu *Load Pattern* izberemo še zadnji obtežni primer *P3* (Slika 3.24 – ❷). Sila obtežnega primera *P3* glede na globalni koordinatni system deluje tokrat v pozitivni smeri *X*, zato vpišemo (v kN) vrednost 10 v okno poleg *Force Global X* (Slika 3.24 – ❸). Za potrditev vnosa sile še prej označimo vozlišče 2 (Slika 3.24 – ❹) in kliknemo na *OK* (Slika 3.24 – ❺).



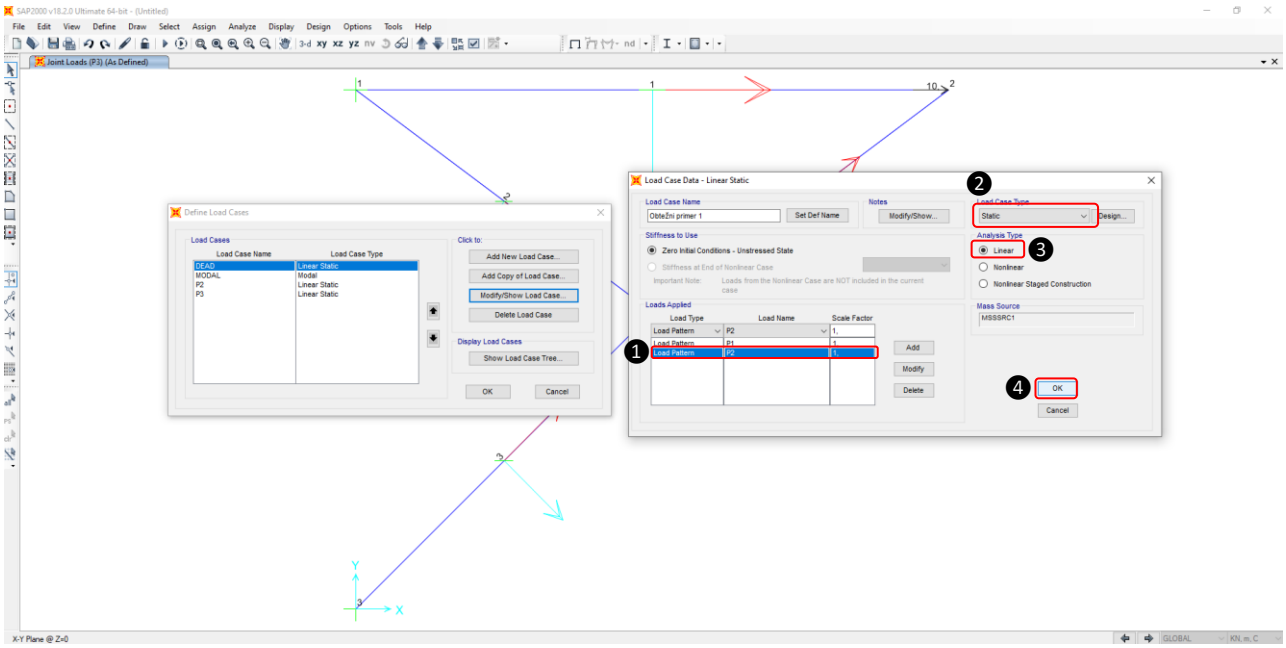
Slika 3.24: Vnašanje obtežb na konstrukcijo za obtežni primer P3

Ob kliku na *OK* se okno *Assign Joint Forces* zapre, hkrati pa se na konstrukciji v vozlišču 2 prikaže edina vnesena sila za obtežni primer *P3* (Slika 3.25 – ❶). Na osnovi definiranih obtežnih primerov in vnesenih pripadajočih sil lahko nazadnje definiramo še oba obtežna primera. Najprej v glavnem meniju kliknemo na *Define* in nato v visečem meniju kliknemo še na *Load Cases ...* (Slika 3.25 – ❷). Odpre se okno *Define Load Cases* (Slika 3.25 – ❸). V razdelku *Load Cases* so v prvem stolpcu pod *Load Case Name* prikazana imena vseh definiranih obtežnih primerov, med katerimi sta že sistemsko predefinirana obtežna primera z imenoma *DEAD* in *MODAL*. Poleg pa sta na seznamu še dva nova obtežna primera *P2* in *P3*, ki pa sta bila avtomatično generirana ob definiranju novih obtežnih primerov *P2* in *P3* s klikom na *Add New Load Pattern* (glej Slika 3.21 – ❸, str. 110). V drugem stolpcu pod *Load Case Type* so vzporedno prikazane vse razpoložljive analize vseh (štirih) definiranih obtežnih primerov, od tega tri linearne statične in ena modalna analiza. Za definiranje prvega obtežnega primera označimo obtežni primer *DEAD* (Slika 3.25 – ❹) in kliknemo na *Modify/Show Load Case ...* (Slika 3.25 – ❺). Odpre se okno *Load Case Data – Linear Static* (Slika 3.25 – ❻). V razdelku *Load Case Name* (lahko poljubno) spremenimo ime iz *DEAD* v *Obtežni primer 1* (Slika 3.25 – ❼). V razdeleku *Load Applied* se na seznamu apliciranih obtežb že nahaja predefiniran obtežni primer *P1* (Slika 3.25 – ❽). V prvem obtežnem primeru poleg obtežnega primera *P1* nastopa še obtežni primer *P2*, ki ga vnesemo na seznam tako, da na seznamu pod *Load Name* izberemo obtežni primer *P2* in v okno pod *Scale Factor* vpišemo faktor 1 (Slika 3.25 – ❾). Vnos potrdimo še s klikom na *Add* (Slika 3.25 – ❿).



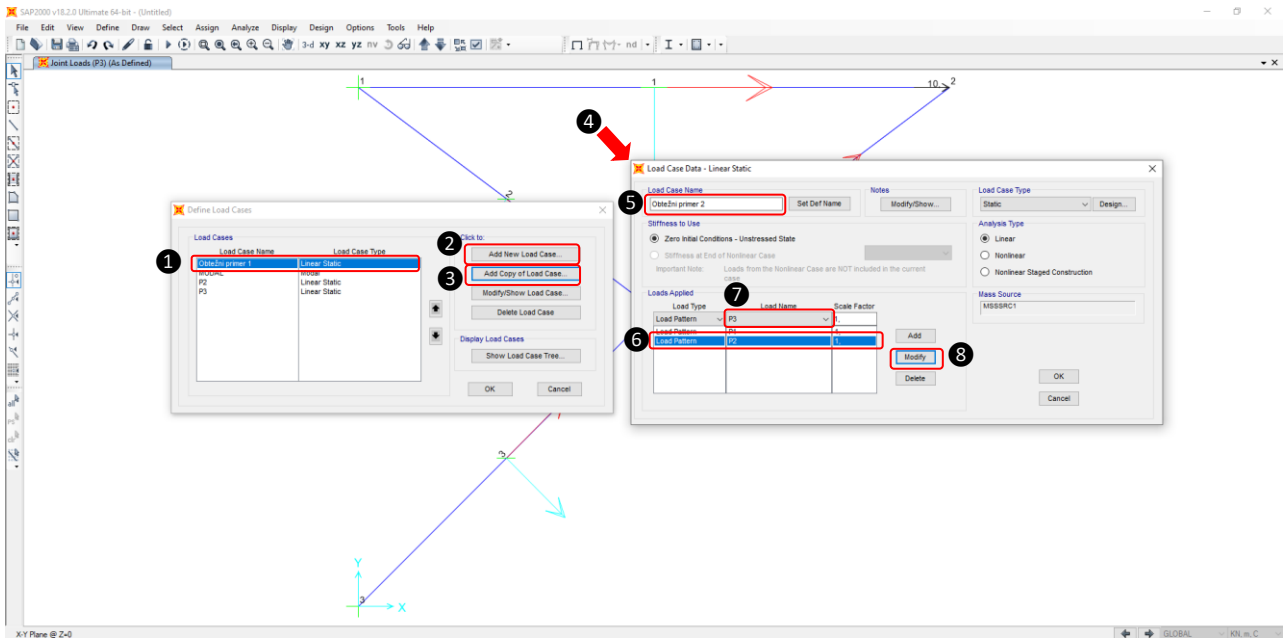
Slika 3.25: Definiranje obtežnega primera 1

Na seznamu se poleg obtežnega primera *P1* izpiše še obtežni primer *P2* (Slika 3.26 – ❶). Za izvedbo linearne statične analize mora biti v tem obtežnem primeru obvezno v razdelku *Load Case Type* na seznamu izpisano *Static* (Slika 3.26 – ❷). V razdelku *Analysis Type* pa mora biti označeno še polje *Linear* (Slika 3.26 – ❸). Na novo definiran obtežni primer potrdimo z *OK* (Slika 3.26 – ❹).



Slika 3.26: Definiranje obtežnega primera 1

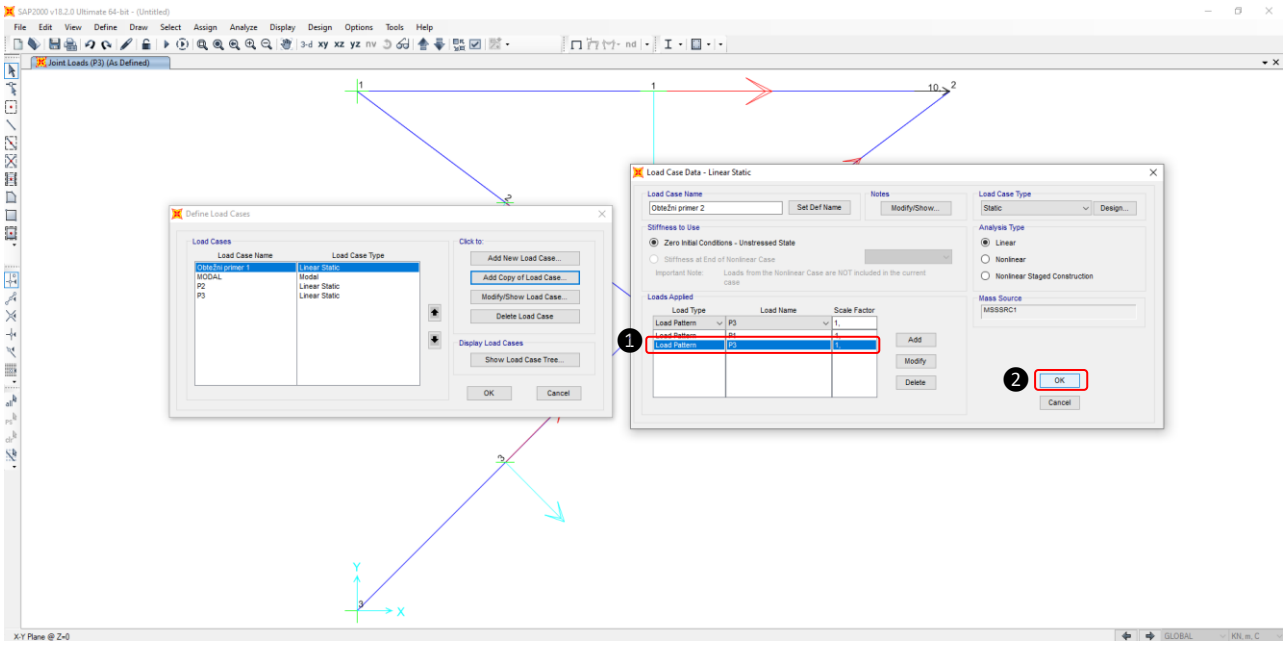
V razdelku *Load Cases* se na seznamu *Load Cases Name* namesto imena *DEAD* izpiše novo izbrano ime *Obtežni primer 1* za obtežni primer 1 (Slika 3.27 – ❶). Drugi obtežni primer bi lahko analogno na novo definirali s klikom na *Add New Load Case* ... (Slika 3.27 – ❷). Ker pa je obtežni primer zelo podoben prvemu, je hitrejša pot, da ustvarimo kopijo prvega obtežnega primera, tako da označimo *Obtežni primer 1*, ki se obarva modro, in kliknemo na *Add Copy of Load Case* ... (Slika 3.27 – ❸). Ponovno se odpre okno *Load Case Data – Linear Static* (Slika 3.27 – ❹). V razdelku *Load Case Name* (namesto novega imena *Obtežni primer 1-1*, ki ga določi program) vpišemo tokrat *Obtežni primer 2* (Slika 3.27 – ❺). V drugem obtežnem primeru poleg obtežnega primera *P1* tokrat nastopa obtežni primer *P3*, ki na seznamu nadomesti obtežni primer *P2*. Torej v razdelku *Load Applied* najprej označimo obtežni primer *P2*, ki se obarva modro (Slika 3.27 – ❻).



Slika 3.27: Definiranje obtežnega primera 2

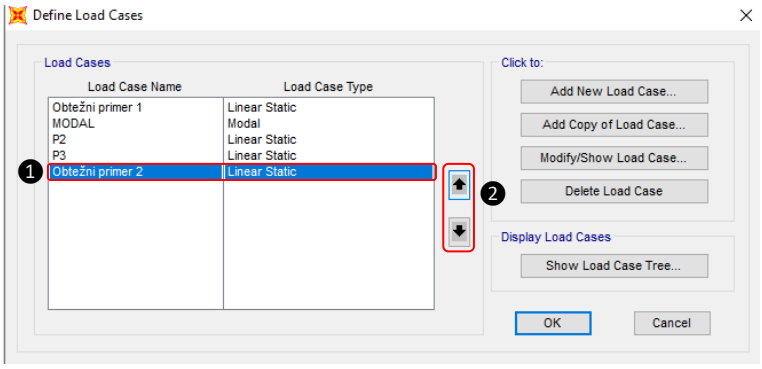
Nato na seznamu pod *Load Name* izberemo obtežni primer *P3* (Slika 3.27 – ❼). V oknu pod *Scale Factor* je že vpisan ustrezni faktor 1, ki pripada označenemu obtežnemu primeru *P2*, zato izbiro samo še potrdimo s klikom na *Modify* (Slika 3.27 – ❽).

Na seznamu se namesto obtežnega primera *P2* pojavi obtežni primer *P3* (Slika 3.28 – ❶). Vrsta analize ostane enaka kot v prvem obtežnem primeru, zato izbiro samo še potrdimo s klikom na *OK* (Slika 3.28 – ❷).



Slika 3.28: Definiranje obtežnega primera 2

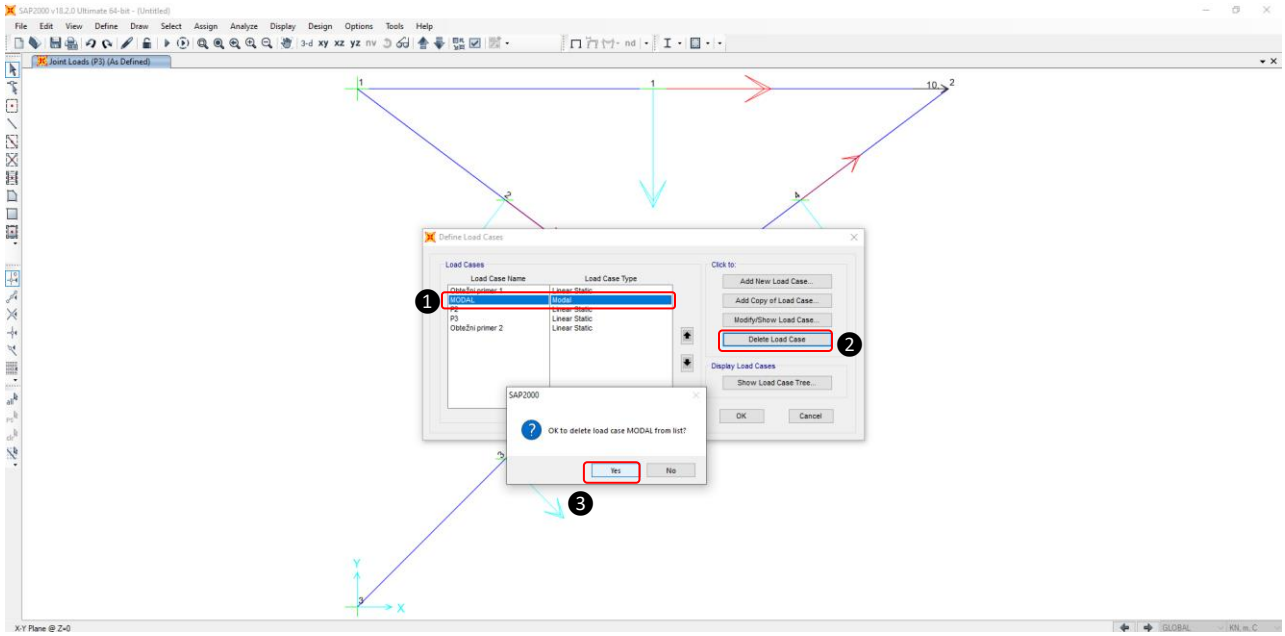
V oknu *Define Load Cases* se na dnu seznama v razdelku *Load Case Name* pojavi na novo definirani obtežni primer z imenom *Obtežni primer 2* (Slika 3.29 – ❶). Vrstni red obtežnih primerov na seznamu pa lahko nadalje poljubno urejamo s klikom na ikono gor usmerjene puščice ⬆ za pomik obtežnega primera po seznamu navzgor ali na ikono dol usmerjene puščice ⬇ za pomik po seznamu navzdol (Slika 3.29 – ❷).



Slika 3.29: Definiranje obtežnih primerov

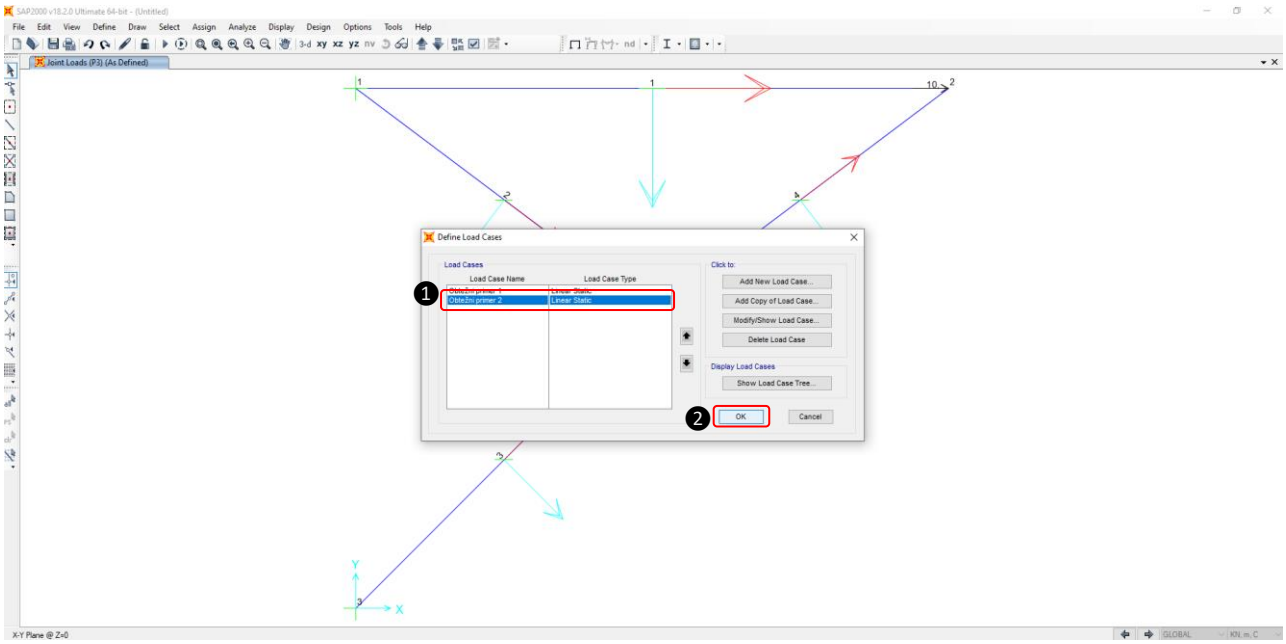
Glede na to, da za ostale obtežne primere na seznamu z imeni *MODAL*, *P2* in *P3* ne bomo izvajali analiz, jih lahko po želji odstranimo, kar pa ni obvezno, saj jih lahko iz analize po želji odstranimo tudi tik pred zagonom procesiranja. Za odstranitev obtežnega primera *MODAL* ga je treba najprej označiti (Slika 3.30 – ❶). Nato kliknemo na ikono *Delete Load Case* (Slika 3.30 – ❷). Program

nas opozori, če želimo s seznama odstraniti obtežni primer *MODAL*. Izbiro potrdimo še s klikom na ikono *Yes* (Slika 3.30 – ❸).



Slika 3.30: Odstranitev odvečnih/neželenih obtežnih primerov

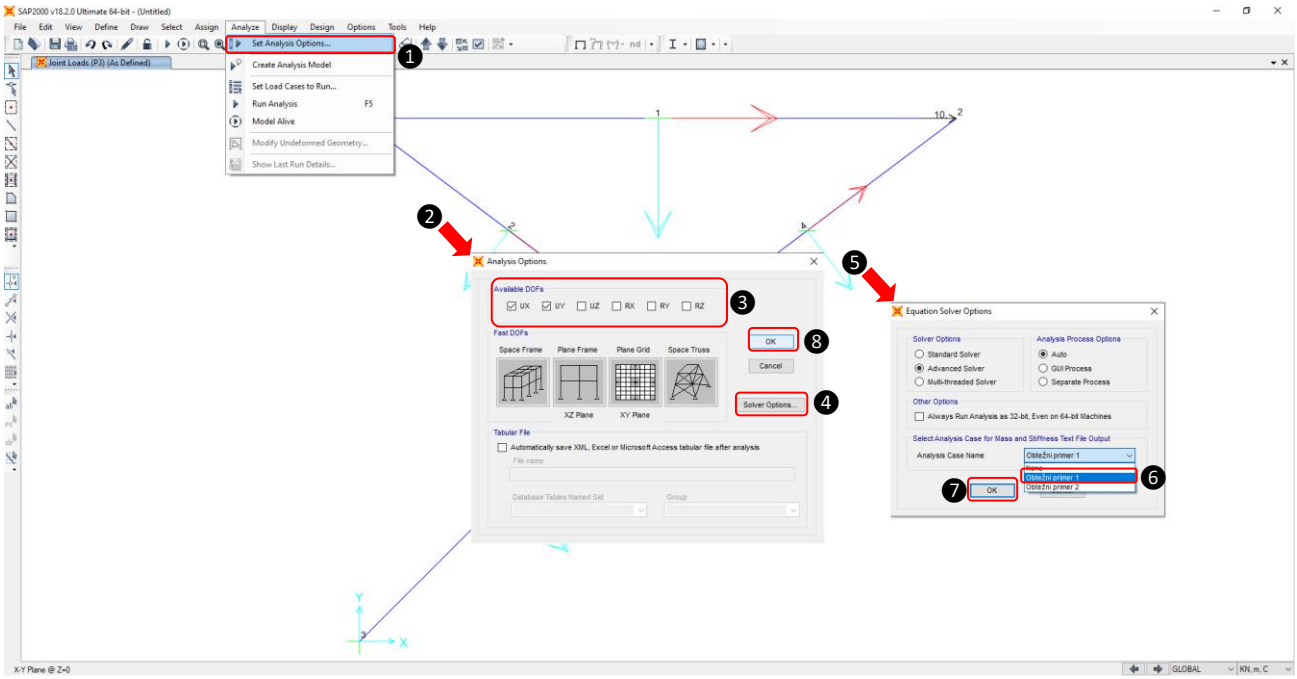
Postopek odstranitve po enakem postopku ponovimo še za ostala dva obtežna primera, torej *P2* in *P3*. Tako na seznamu ostaneta samo še *Obtežni primer 1* in *Obtežni primer 2* (Slika 3.31 – ❶), ki ju dokončno potrdimo s klikom na *OK* (Slika 3.31 – ❷).



Slika 3.31: Dokončna potrditev definiranih obtežnih primerov

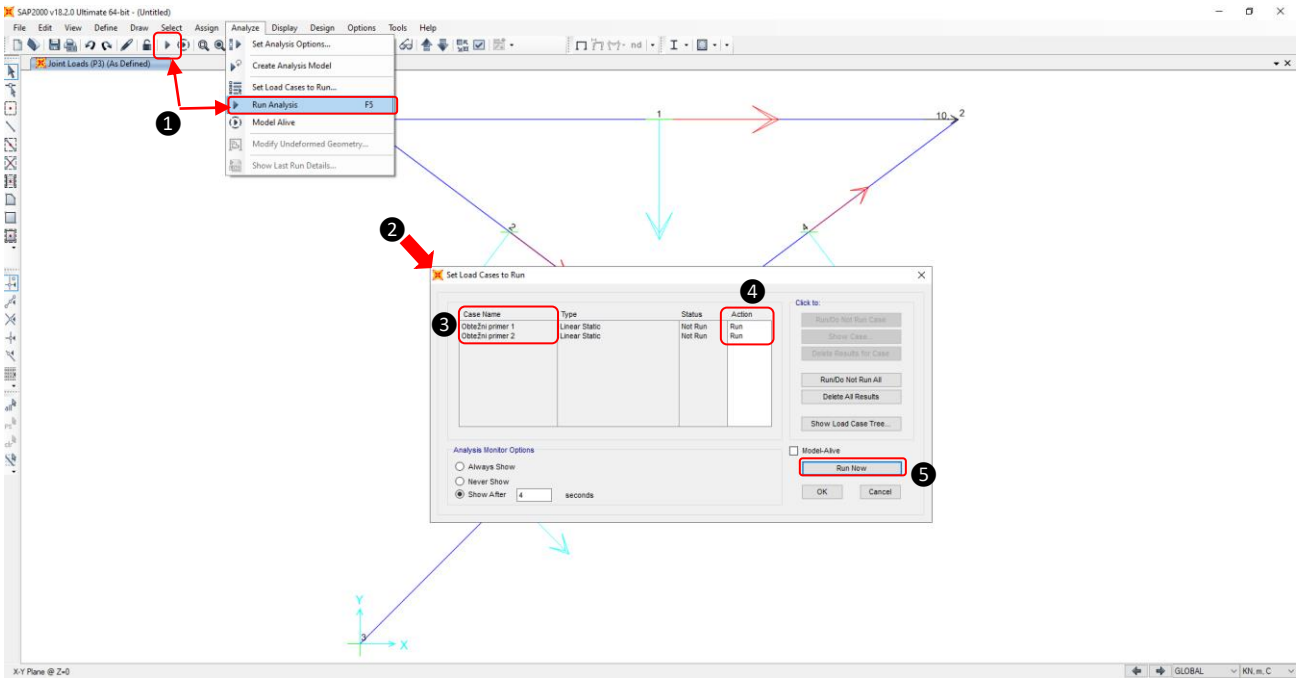
3.3 Analiza podanih podatkov

Preden zaženemo analizo, najprej izberemo tiste prostostne stopnje, ki so nujne za izvedbo analize v ravnini *X–Y*. Za nastavitve prostostnih stopenj v glavnem meniju kliknemo na *Analyze* in na visečem meniju izberemo *Set Analysis Options* ... (Slika 3.32 – ❶). Odpre se okno *Anaysis Options* (Slika 3.32 – ❷). Ker smo konstrukcijo obravnavavali **samo** s paličnimi končnimi elementi tipa členek–členek (Slika 3.6 – ❹), bodo neničelne prostostne stopnje v tem primeru samo pomiki v smereh *X* in *Y* v vozliščih 2 in 4. Zato lahko v razdelku *Availible DOFs* označimo samo *UX* in *UY* (Slika 3.32 – ❸). Za kasnejši morebitni izpis datotek s togostno in masno matriko po želji kliknemo na ikono *Solver Options* (Slika 3.32 – ❹). Odpre se novo okno *Equation Solver Options* (Slika 3.32 – ❺). V razdelku *Select Analysis Case for Mass and Stiffness Text File Output* na seznamu (namesto *None*) izberemo enega od obravnavanih obtežnih primerov, na primer *Obtežni primer 1* (Slika 3.32 – ❻), in izbiro potrdimo s klikom na *OK* (Slika 3.32 – ❼). V tem primeru je togostna matrika enaka za oba obtežna primera. Vse skupaj dokončno potrdimo s klikom na *OK* še v oknu *Analysis Options* (Slika 3.32 – ❽).



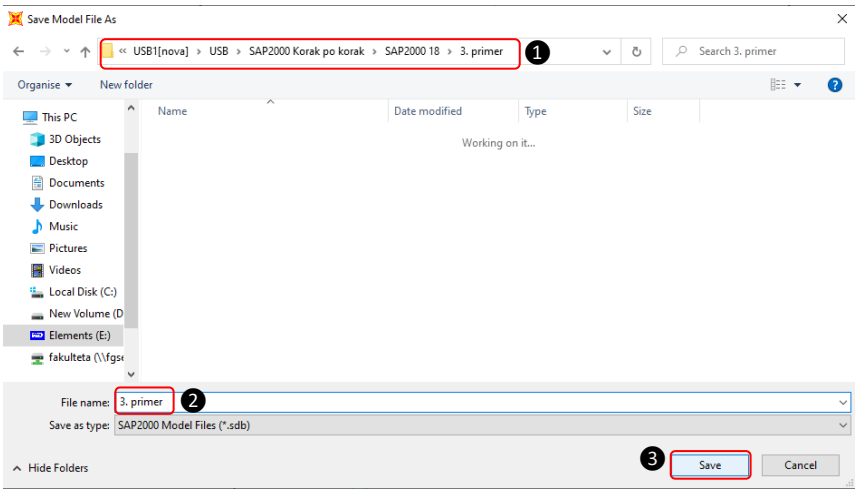
Slika 3.32: Nastavitve prostostnih stopenj za analizo

Sedaj, ko smo definirali vsa vozlišča, končne elemente, robne pogoje, obtežbe in prostostne stopnje, lahko izvedemo analizo tako, da v glavnem meniju zopet kliknemo na *Analyse*. V visečem meniju nato izberemo *Run Analysis*, še hitreje pa lahko v orodni vrstici kliknemo kar na ikono ▶ (Slika 3.33 – ❶). Odpre se okno *Set Load Cases to Run* (Slika 3.33 – ❷). Na seznamu v prvem stolpcu sta prikazana oba definirana obtežna primera (Slika 3.33 – ❸). V četrtem stolpcu pod *Action* pri obeh obtežnih primerih piše *Run* (Slika 3.33 – ❹), kar pomeni, da sta oba obtežna primera pripravljena za začetek analize. Analizo obeh obtežnih primerov začnemo s klikom na ikono *Run Now* (Slika 3.33 – ❺).



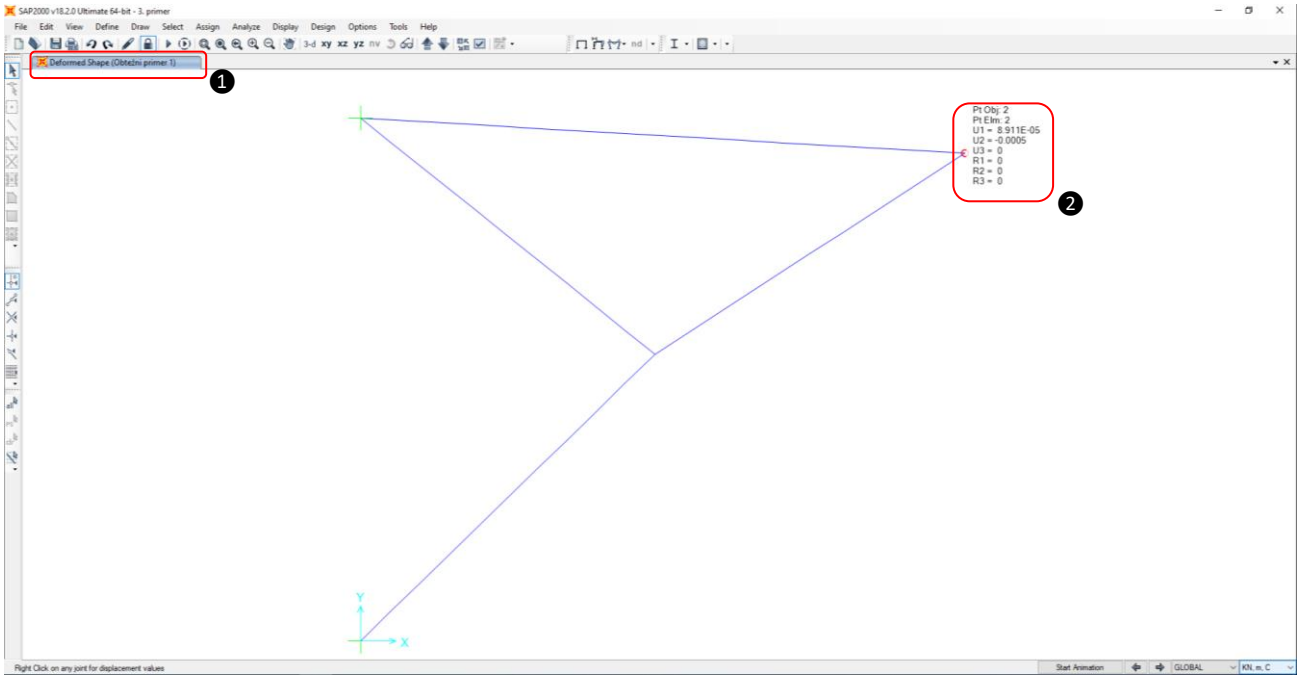
Slika 3.33: Priprava obtežnih primerov za začetek analize

Ker dokument s podatki o konstrukciji in analizah do zdaj še ni bil shranjen, se pojavi okno *Save Model File As*. Določimo lokacijo na disku (Slika 3.34 – ❶) in izberemo ime primera, na primer *primer 3* (Slika 3.34 – ❷, glej ***Opomba 7***, str. 39). Dokument (dokončno) shranimo s klikom na *Save* (Slika 3.34 – ❸).



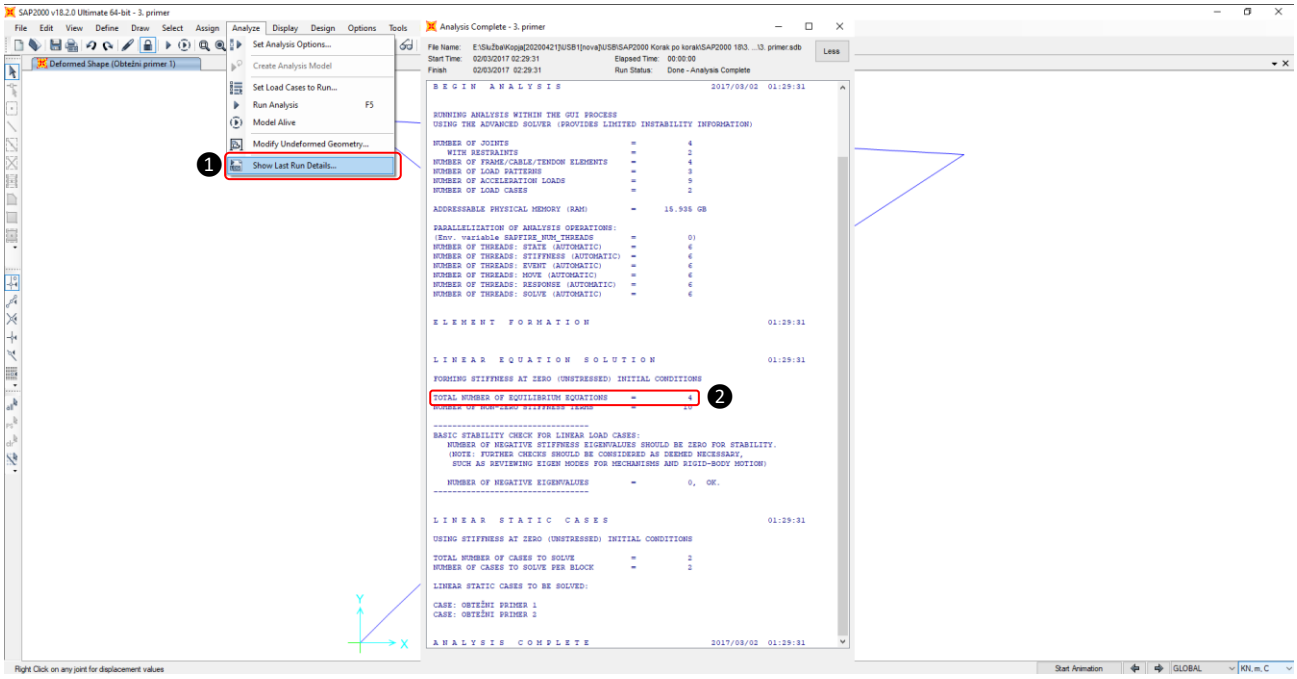
Slika 3.34: Shranjevanje dokumenta

Nato se začne analiza za oba obtežna primera in po nekaj sekundah (čas analize je odvisen od procesorske moči in seveda od modela konstrukcije) se v deformirani legi prikaže konstrukcija za prvi obtežni primer, ki je bil tudi prvi procesiran. Kateri obtežni primer je grafično prikazan v deformirani obliki, se lahko enostavno prepričamo v zgornjem kotu okna, kjer je zapisano ime prikazanega obtežnega primera (Slika 3.35 – ❶). Ob pomiku kazalca v neposredno bližino vozlišča se prikažejo pripadajoče velikosti pomikov in zasukov (Slika 3.35 – ❷). Izmed vseh šestih prikazanih pomikov in zasukov sta edina od nič različna lokalna pomika vozlišč U1 in U2.



Slika 3.35: Deformirana oblika konstrukcije za prvi obtežni primer

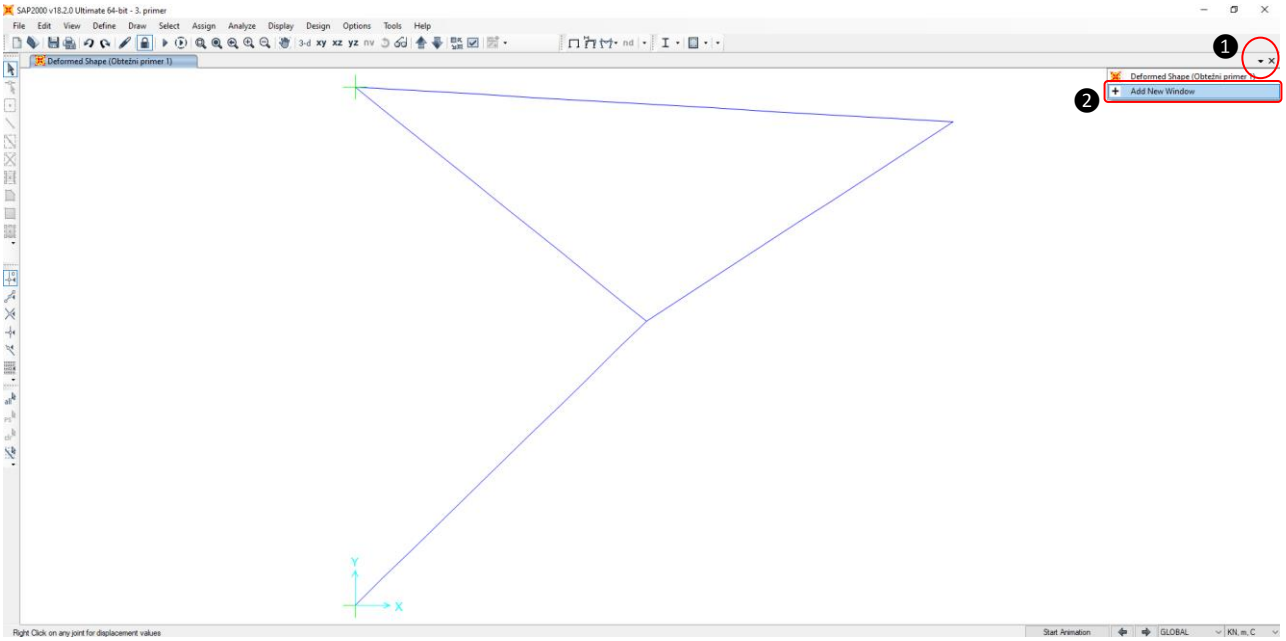
Za prikaz podrobnosti (število elementov in vozlišč, število rešenih linearnih enačb itd.) obeh izvedenih analiz v glavnem meniju kliknemo na *Analyse* in izberemo *Show Last Run Details …* (Slika 3.36 – ❶). V novem oknu lahko poleg ostalih informacij opazimo, da so bile za oba obtežna obtežna primera rešene štiri linearne enačbe (Slika 3.36 – ❷). Ob neupoštevanju ostalih prostostnih stopenj (glej Slika 3.32 – ❷, str. 117) sta v konstrukciji ostali po dve prostostni stopnji (U1 in U2) v vsakem izmed prostih vozlišč (2 in 4). Tako ima konstrukcija vsega skupaj štiri neznane pomike in posledično tudi enako število linearnih enačb za vsak obtežni primer.



Slika 3.36: Prikaz števila linearnih enačb za izračun neznanih pomikov

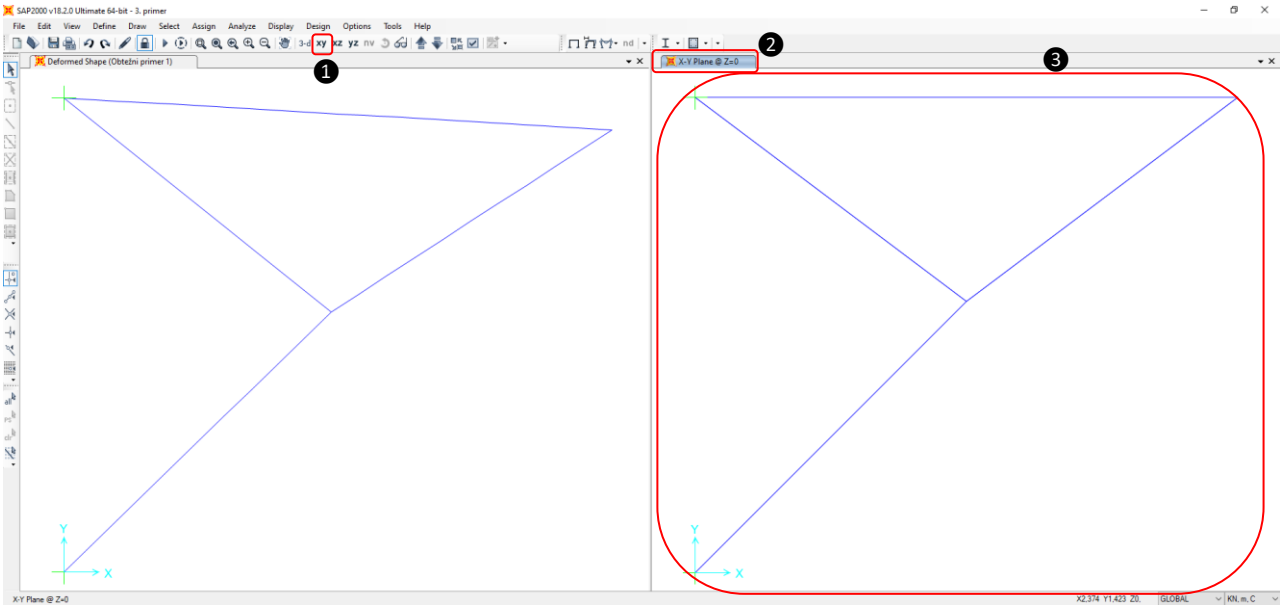
3.4 Poprocesiranje

Za hkraten prikaz rezultatov obeh obtežnih primerov in s tem njihovo enostavnejšo primerjavo lahko odpremo novo prikazno okno za izris konstrukcije s klikom na ikono ▼ v desnem zgornjem kotu (Slika 3.37 – ❶). Nato v visečem meniju izberemo *Add New Window* (Slika 3.37 – ❷).



Slika 3.37: Dodajanje novega okna

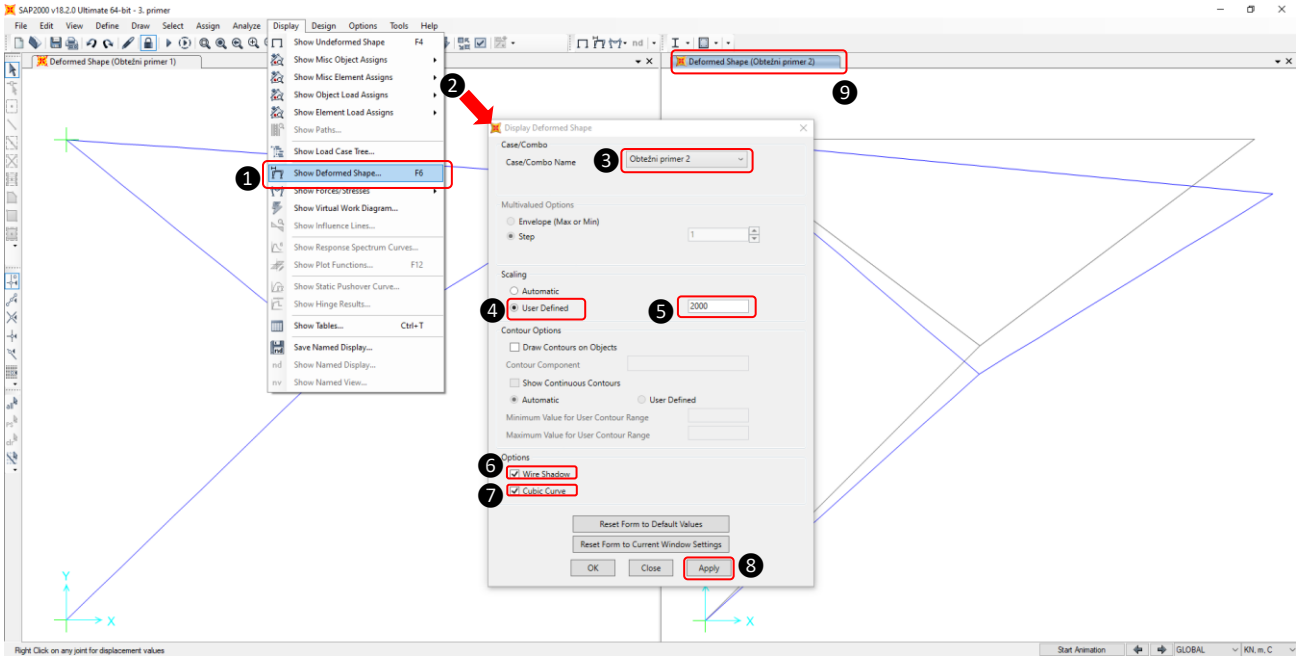
Pojavi se novo okno nedeformirane konstrukcije, prikazane v 3D-pogledu, ki zaseda desno polovico zaslona. Pogled konstrukcije v tem oknu spremenimo še v ravnino *X*–*Y* s klikom na ikono xy (Slika 3.38 – ❶). Ob tem pa hkrati pazimo, da je aktivno novo (desno) prikazno okno (Slika 3.38 – ❷). Konstrukcija je zdaj v desnem prikaznem oknu (v nedeformirani obliki) prikazana v ravnini *X*–*Y* (Slika 3.38 – ❸).



Slika 3.38: Prikaz paličja v dveh oknih

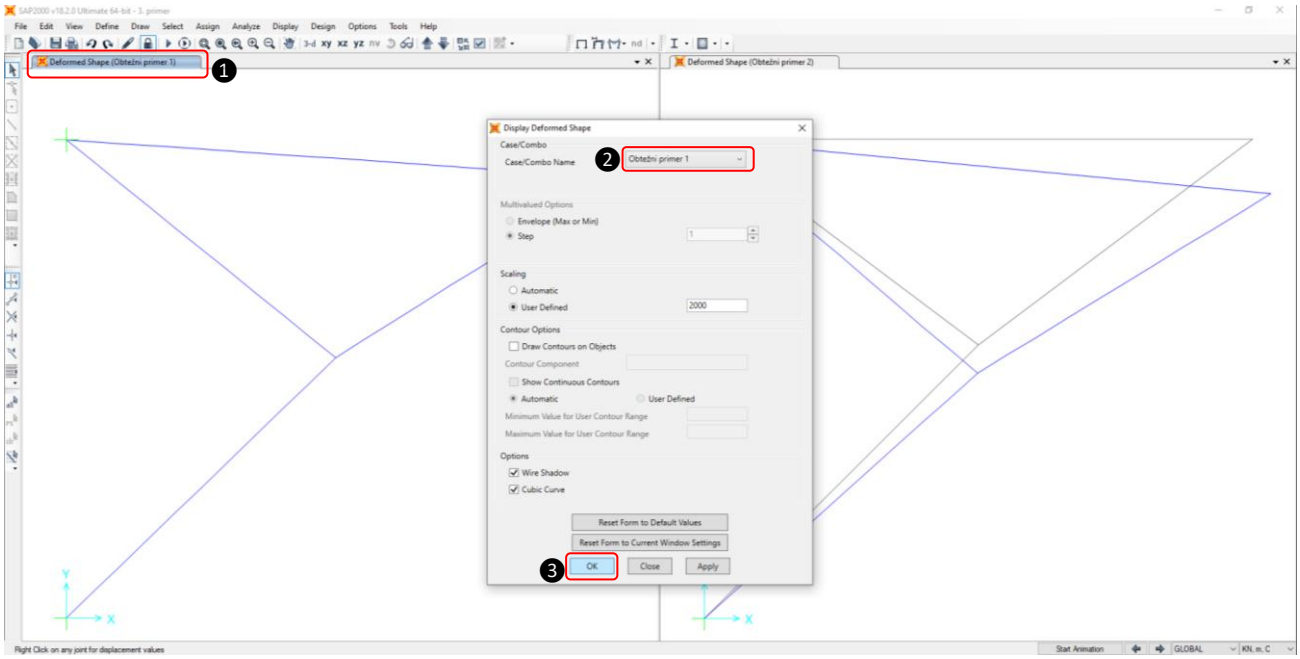
– Grafični prikaz deformirane lege konstrukcije

Za prikaz deformirane oblike paličja za drugi obtežni primer v glavnem meniju kliknemo na *Display* in nato v visečem meniju na *Show Deformed Shape* ... (Slika 3.39 – ❶). Odpre se novo okno *Display Deformed Shape* (Slika 3.39 – ❷). Najprej v razdelku *Case/Combo* izberemo na seznamu *Obtežni primer 2* (Slika 3.39 – ❸). V razdelku *Scaling* namesto samodejnega izrisa po izbiri programa (*Automatic*) označimo *User Defined* (Slika 3.39 – ❹) in sami ročno izberemo nam primerno povečano velikost pomikov deformirane konstrukcije. V našem primeru smo pomike povečali za faktor 2000 (Slika 3.39 – ❺). V razdelku *Options* označimo še *Wire Shadow* (Slika 3.39 – ❻), saj nam poleg deformirane lege paličja omogoča še izris začetne lege. Funkcija *Cubic Curve* v tem primeru ne izboljša izrisa deformirane lege, saj je pri paličju potek deformacij med vozlišči linearen, torej uporaba funkcije ne vpliva na izris deformirane lege konstrukcije (Slika 3.39 – ❼). Kliknemo na *Apply* (Slika 3.39 – ❽) in hkrati pazimo, da imamo še vedno aktivno desno prikazno okno (Slika 3.39 – ❾). V aktivnem desnem oknu se poleg sivo obarvane začetne lege izriše tudi deformirana oblika konstrukcije za izbrani (drugi) obtežni primer.



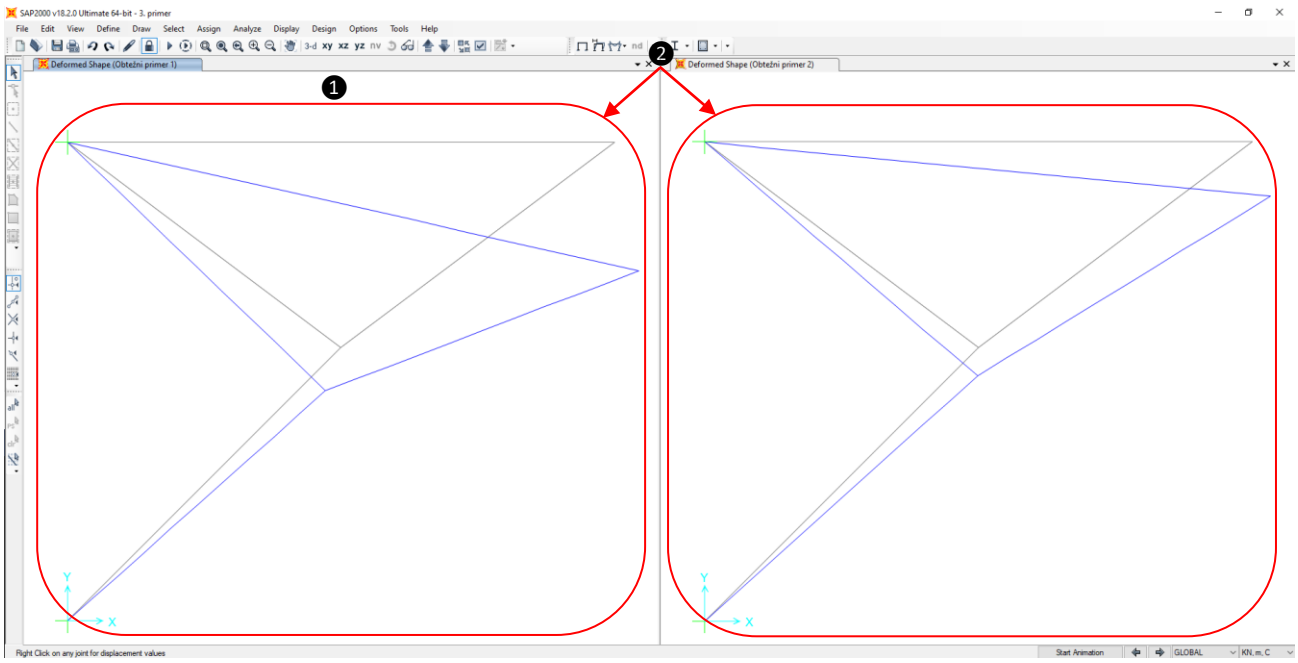
Slika 3.39: Nastavitve prikaza deformirane oblike konstrukcije za drugi obtežni primer

Nato se s kazalcem pomaknemo v levo prikazno okno, ki postane aktivno s klikom na levi gumb miške (Slika 3.40 – ❶). V razdelku *Case/Combo* izberemo *Obtežni primer 1* (Slika 3.40 – ❷). Za medsebojno primerjavo pomikov med obtežnima primeroma ohranimo faktor izrisa 2000 in izbiro potrdimo s klikom na *OK* (Slika 3.40 – ❸).



Slika 3.40: Nastavitve prikaza deformirane oblike konstrukcije za prvi obtežni primer

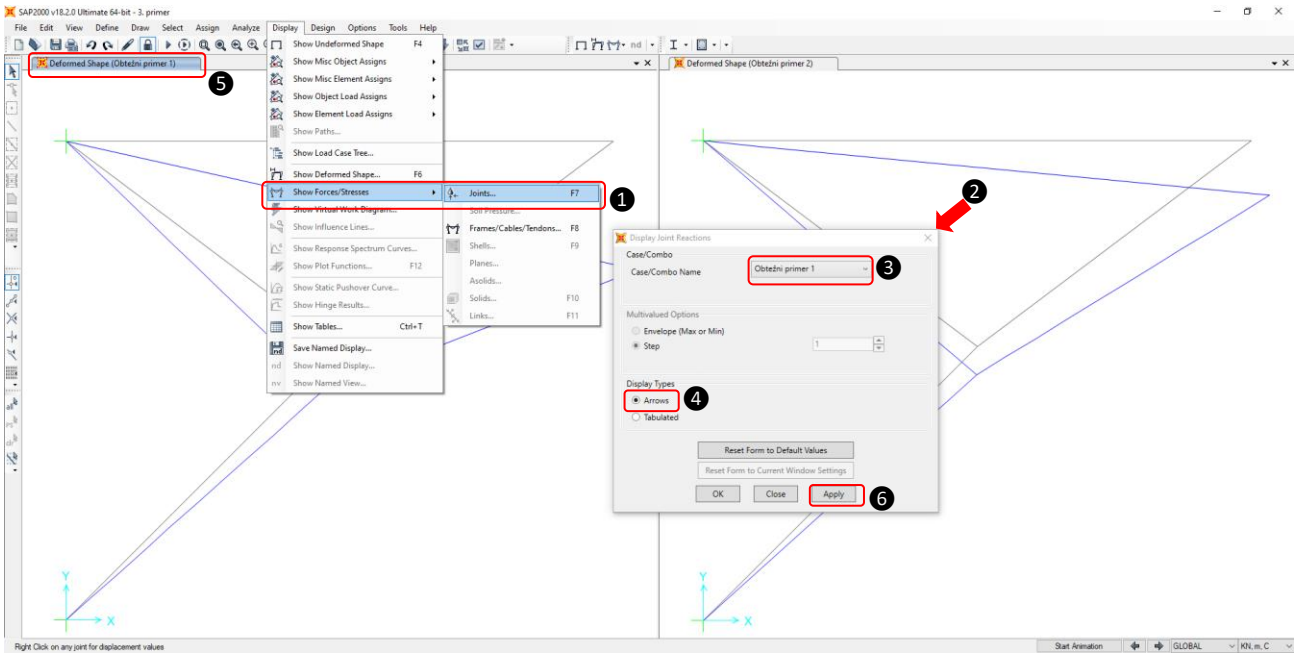
Ob kliku na *OK* se okno *Display Deformed Shape* zapre, hkrati pa se v (aktivnem) levem oknu poleg sivo obarvane začetne lege paličja izriše še deformirana oblika za prvi obtežni primer (Slika 3.41 – ❶). Iz primerjave pomikov deformirane konstrukcije v obeh oknih (Slika 3.41 – ❷) se jasno vidi, da so vertikalni pomiki v prvem obtežnem primeru pričakovano opazno večji, saj oba obtežna primera, torej *P1* in *P2*, delujeta v vertikalni smeri navzdol.



Slika 3.41: Prikaz deformirane oblike konstrukcije za oba obtežna primera

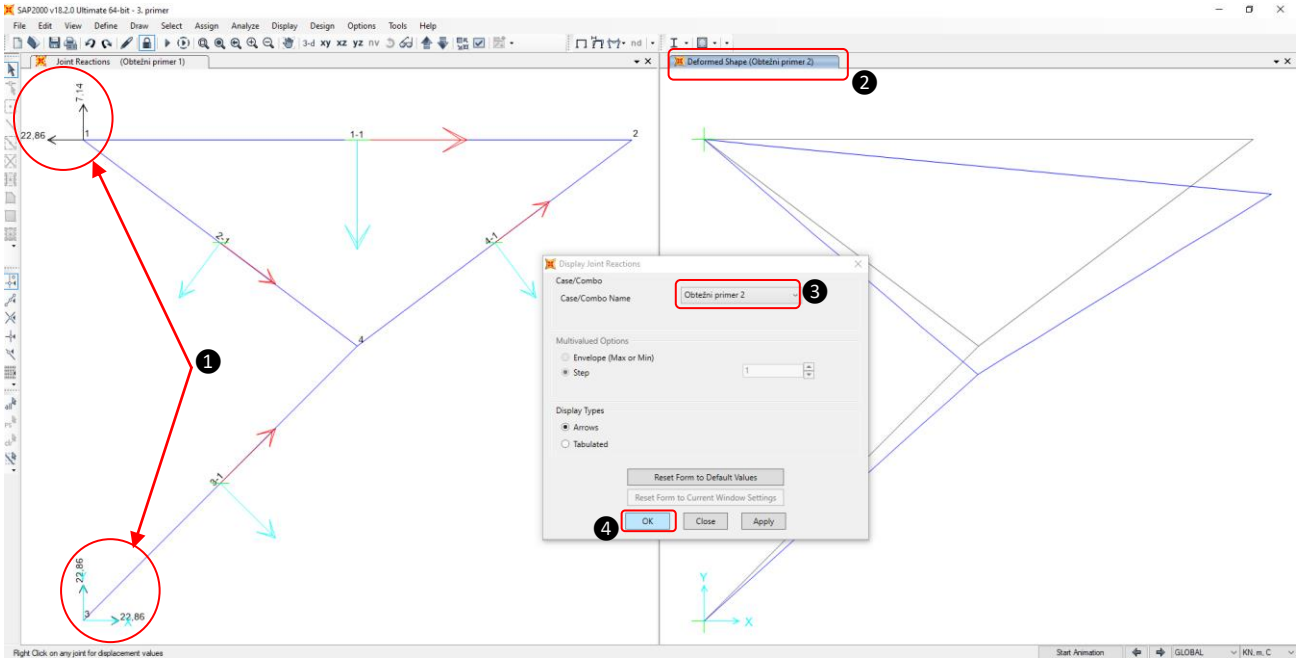
– Grafični prikaz reakcij

Za grafični prikaz reakcij v glavnem meniju kliknemo na *Display* in se v visečem meniju pomaknemo na *Show Forces/Stresses*. Ko se odpre še drugi viseči meni, še enkrat kliknemo na *Joints ...* (Slika 3.42 – ❶). Odpre se okno *Display Joint Reactions* (Slika 3.42 – ❷). V razdelku *Case/Combo* je na seznamu že izbran prvi obtežni primer, to je *Obtežni primer 1* (Slika 3.42 – ❸), ki je bil v analizi dveh obtežnih primerov na seznamu procesiran kot prvi (glej Slika 3.33 – ❸, str. 118). Za prikaz reakcij v obliki puščic pa v razdelku *Display Types* označimo *Arrows* (Slika 3.42 – ❹). Pred končno potrditvijo izrisa reakcij prvega obtežnega primera v izbranem oknu, na primer levem, se najprej prepričamo, da je to okno aktivno (Slika 3.42 – ❺), in šele nato kliknemo na *Apply* (Slika 3.42 – ❻).



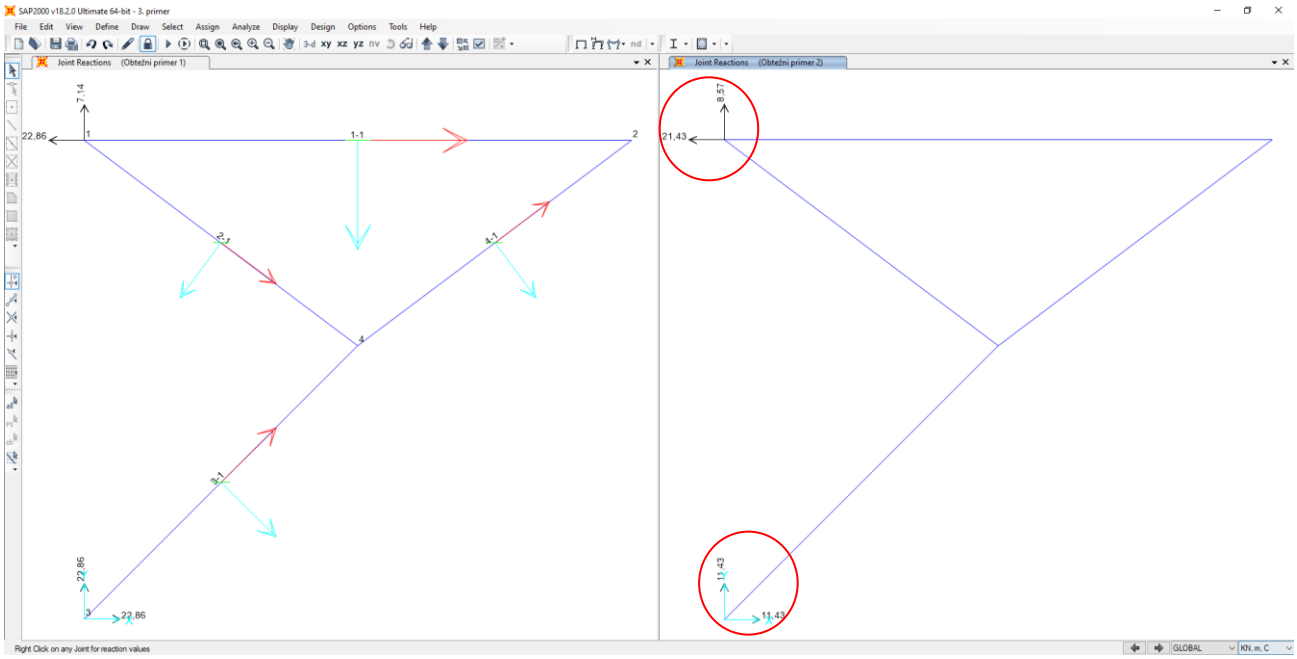
Slika 3.42: Nastavitve prikaza reakcij za prvi obtežni primer

V aktivnem levem oknu se na lokacijah podpor v obliki puščic izrišejo reakcijske sile in izpišejo pripadajoče velikosti (Slika 3.43 – ❶). Za prikaz reakcij drugega obtežnega primera v desnem oknu kliknemo v območje desnega okna, ki postane aktivno (Slika 3.43 – ❷). Nato v razdelku *Case/Combo*, ki je še vedno prisotno na ekranu, izberemo *Obtežni primer 2* (Slika 3.43 – ❸) in kliknemo na *OK* (Slika 3.43 – ❹).



Slika 3.43: Nastavitve prikaza reakcij za drugi obtežni primer

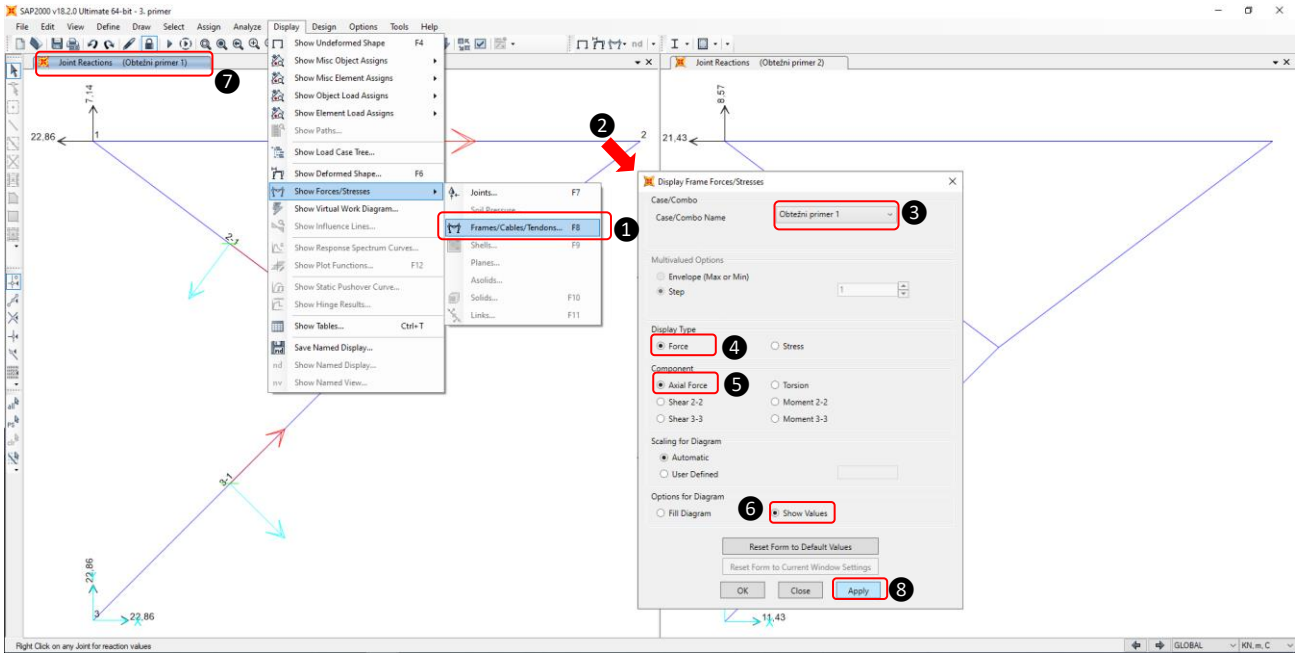
Ob kliku na *OK* se okno *Display Joint Reactions* hkrati zapre, v aktivnem desnem oknu pa se na lokacijah obeh podpor v obliki puščic izrišejo reakcije in izpišejo pripadajoče velikosti za drugi obtežni primer (Slika 3.44).



Slika 3.44: Prikaz reakcij obeh obtežnih primerov

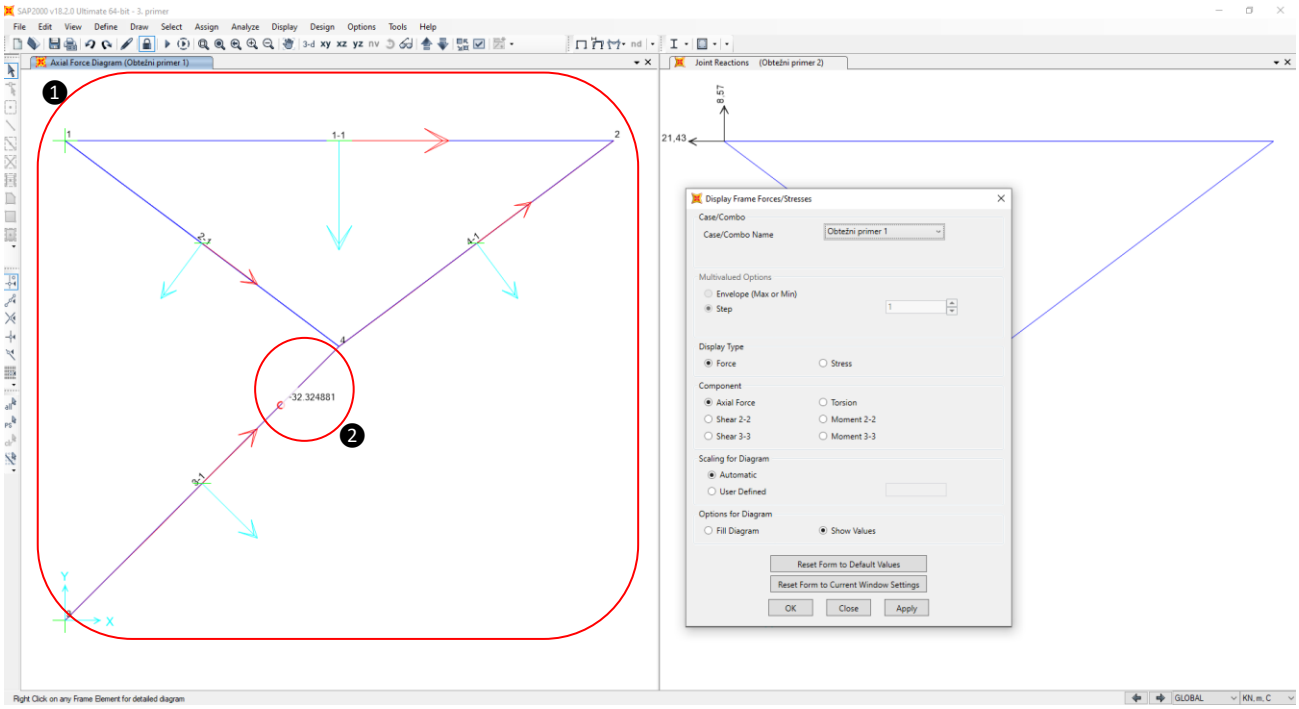
– *Grafični prikaz notranjih statičnih količin*

Za grafični prikaz notranjih statičnih količin (NSK) v glavnem meniju kliknemo na *Display*, nato se v visečem meniju pomaknemo na *Show Forces/Stresses*, in ko se odpre nov viseči meni, še enkrat kliknemo na *Frames/Cables/Tendons* ... (Slika 3.45 – ❶). Odpre se okno *Display Frame Forces/Stresses* (Slika 3.45 – ❷). Za prikaz prvega obtežnega primera je v razdelku *Case/Combo* na seznamu že izbran *Obtežni primer 1* (Slika 3.45 – ❸). Za grafični prikaz NSK mora biti najprej v razdelku *Display Type* obvezno označeno *Force* (Slika 3.45 – ❹). Alternativa je izris napetosti. Šele nato lahko v razdelku *Component* izmed šestih izberemo želeno količino. Za izris osnih sil (edine nastopajoče NSK v paličju) mora biti označeno polje *Axial Force* (Slika 3.45 – ❺). Če želimo poleg grafičnega izrisa diagramov še pripadajoče vrednosti, potem v razdelku *Options for Diagram* namesto *Fill Diagram* označimo *Show Values* (Slika 3.45 – ❻). Pred končno potrditvijo izrisa diagramov osnih sil pri prvem obtežnem primeru v izbranem oknu, na primer levem, se najprej prepričamo, da je to okno aktivno (Slika 3.45 – ❼). Šele nato kliknemo na *Apply* (Slika 3.45 – ❽).



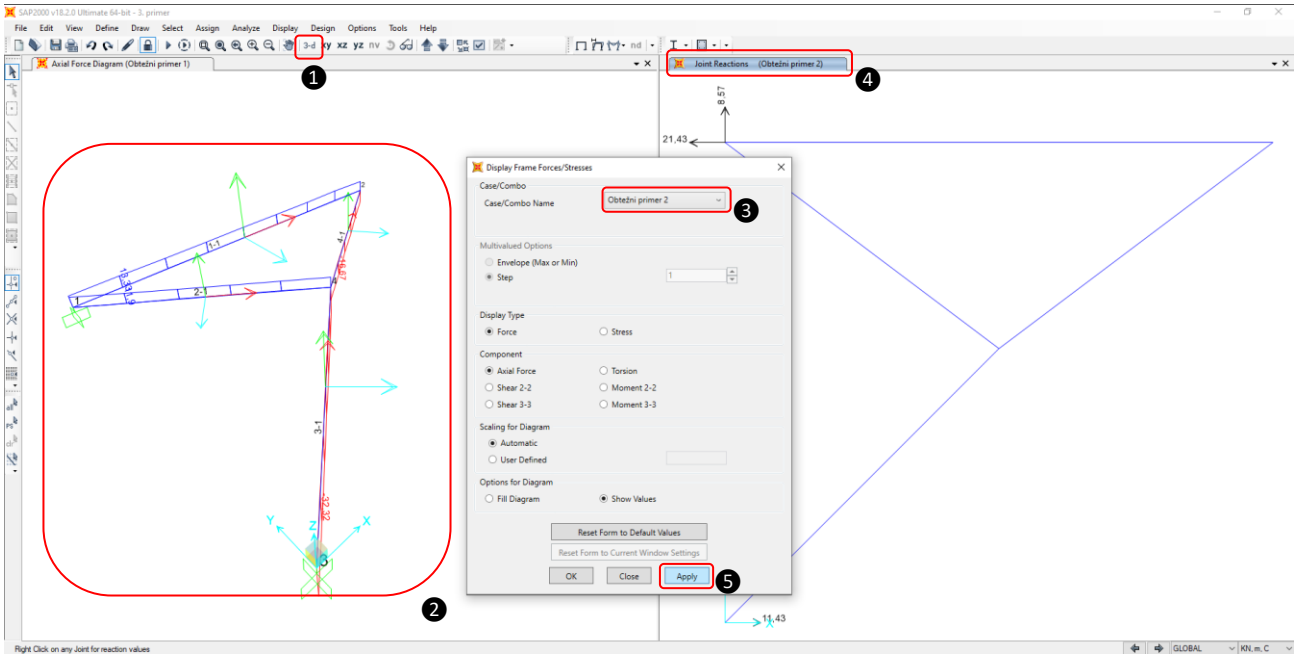
Slika 3.45: Nastavitve prikaza diagrama NSK za prvi obtežni primer

V aktivnem levem prikaznem oknu v pogledu *X–Y* diagramov osnih sil ne moremo videti (Slika 3.46 – ❶). Diagram osnih sil se namreč sistemsko izriše samo v smeri lokalne osi 2 (→) končnega elementa. V tem primeru pa so vsi končni elementi definirani tako, da lokalni osi 1 (→) in 3 (→) sovpadata z ravnino X–Y globalnega koordinatnega sistema. Lahko pa opazimo, da se ob pomiku kazalca na lokacijo, na primer elementa 3, izpiše vrednost osne sile –32.324881 (Slika 3.46 – ❷).



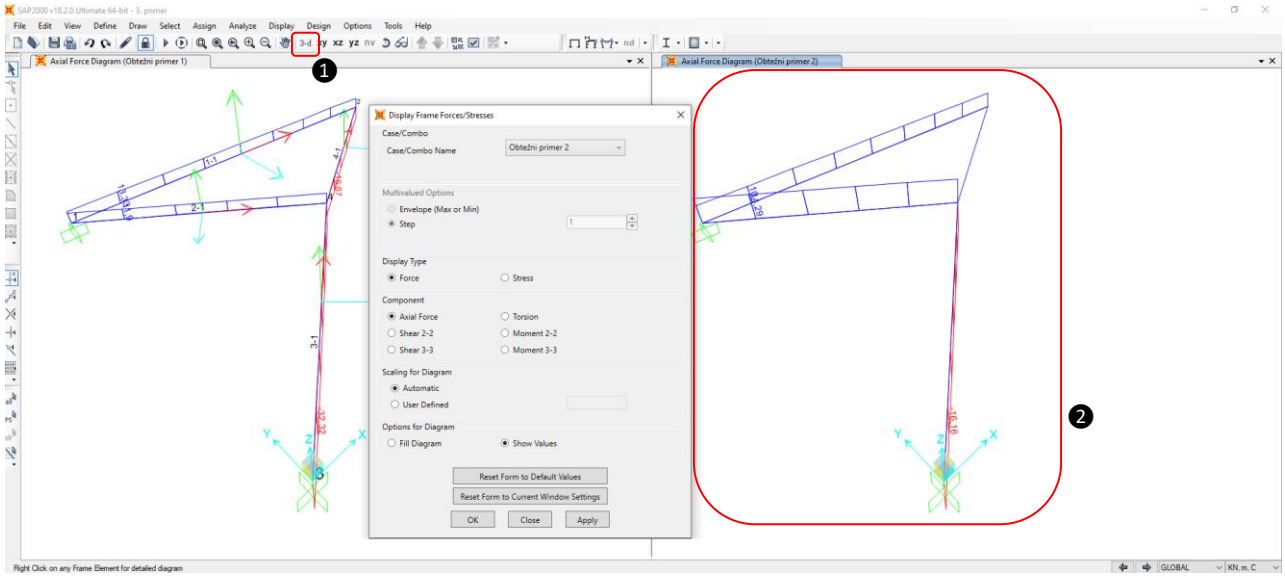
Slika 3.46: Neustrezen prikaz diagrama osnih sil za prvi obtežni primer

Šele ob kliku na ikono 3-d v orodni vrstici (Slika 3.47 – ❶) lahko vidimo, da se diagrami osnih sil v (aktivnem) levem prikaznem oknu v 3D-pogledu izrišejo v smereh lokalnih osi 2 (→) (Slika 3.47 – ❷). Za prikaz diagramov osnih sil drugega obtežnega primera v razdelku *Case/Combo* izberemo *Obtežni primer 2* (Slika 3.47 – ❸) in kliknemo na desno prikazno okno, ki postane s tem aktivivno (Slika 3.47 – ❹). Ponovno potrdimo s klikom na *Apply* (Slika 3.47 – ❺).



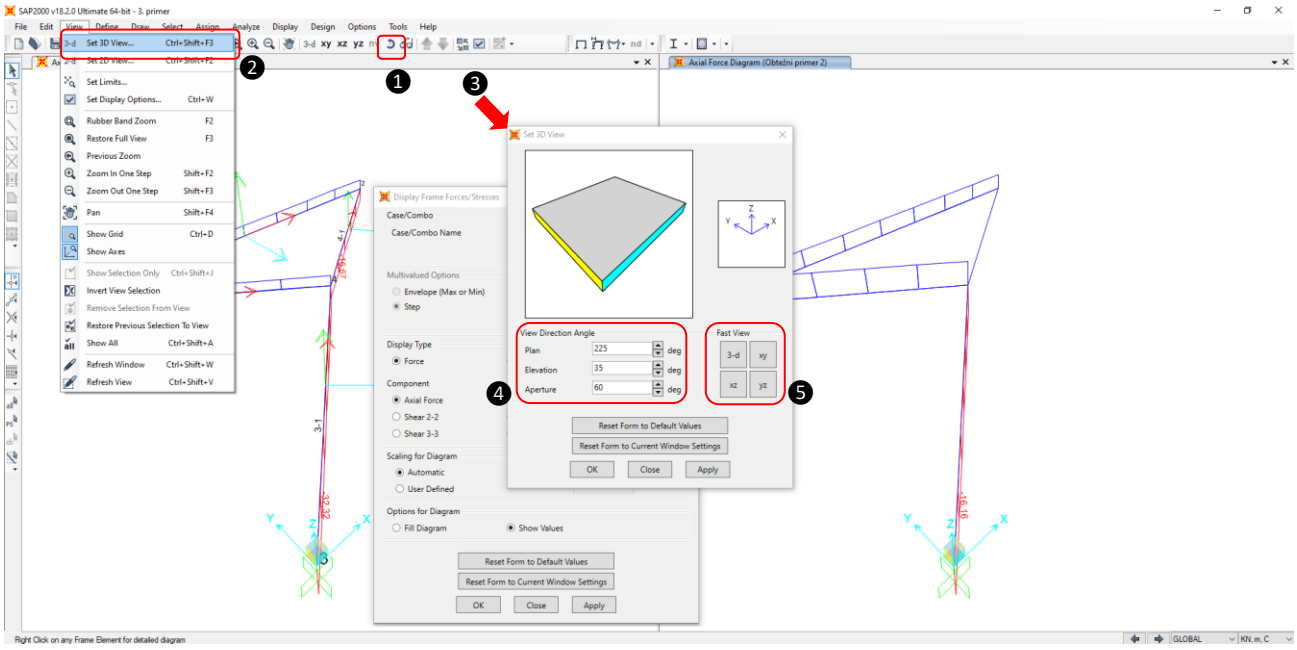
Slika 3.47: 3D-prikaz diagrama osnih sil za prvi obtežni primer in nastavitve prikaza diagrama za drugi obtežni primer

Tudi v desnem prikaznem oknu se diagrami osnih sil za drugi obtežni primer izrišejo šele po kliku na ikono 3-d (Slika 3.48 – ❶) in jih lahko vidimo v desnem oknu na sliki spodaj (Slika 3.48 – ❷).



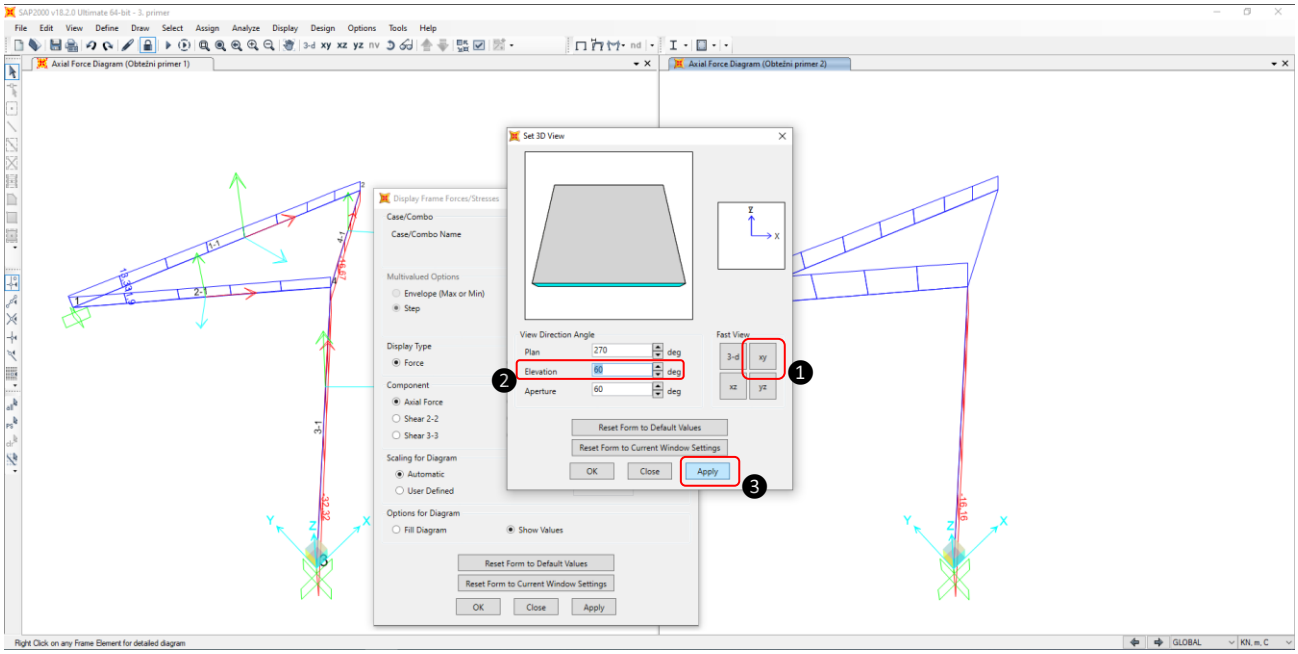
Slika 3.48: Prikaz diagramov osnih sil za prvi in drugi obtežni primer

Če nam predefiniran zorni kot 3D-pogleda ne ustreza, potem lahko v orodni vrstici uporabimo ikono in prilagodimo zorni kot po lastni izbiri (Slika 3.49 – ❶). Če želimo natančno definirati zorni kot, potem v glavnem meniju kliknemo na *View* in nato v visečem meniju še enkrat kliknemo na *Set 3D View* ... (Slika 3.49 – ❷). Odpre se okno *Set 3-D View* (Slika 3.49 – ❸). V razdelku *View Direction Angle* na voljo tri predefinirane kote (*Plan* 225 *deg*, *Elevation* 35 *deg* in *Aperture* 60 *deg*), ki določajo predefiniran 3D-pogled konstrukcije (Slika 3.49 – ❹). V razdelku *Fast View* imamo na izbiro štiri predefinirane osnovne poglede (Slika 3.49 – ❺), ki lahko služijo tudi kot izhodiščna točka za nadaljnjo prilagoditev pogleda v prostoru.



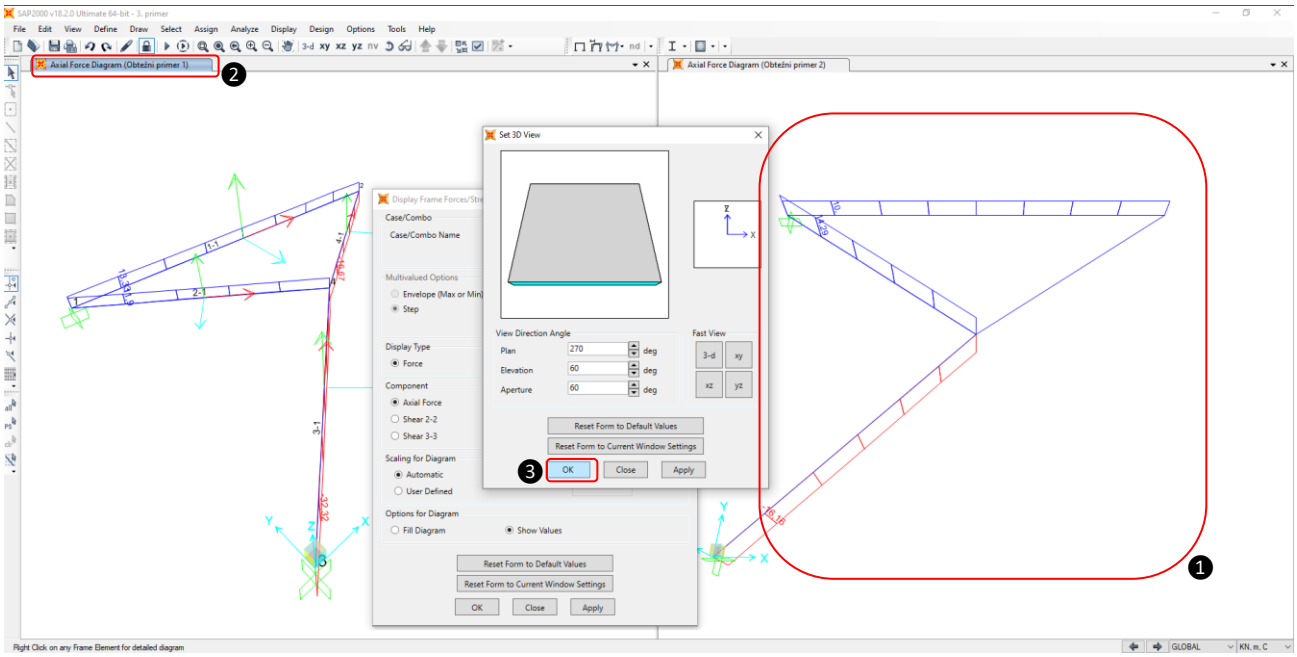
Slika 3.49: Nastavitve 3D-pogleda

Ker je konstrukcija v ravnini X–Y, smo za izhodiščno točko v razdelku *Fast View* izbrali ikono xy (Slika 3.50 – ❶). Pogled smo še nekoliko prilagodili tako, da smo v okno poleg *Elevation* namesto 35 *deg* vpisali na primer 60 *deg* (Slika 3.50 – ❷) in potrdili še s klikom na *Apply* (Slika 3.50 – ❸).



Slika 3.50: Nastavitve 3D-pogleda

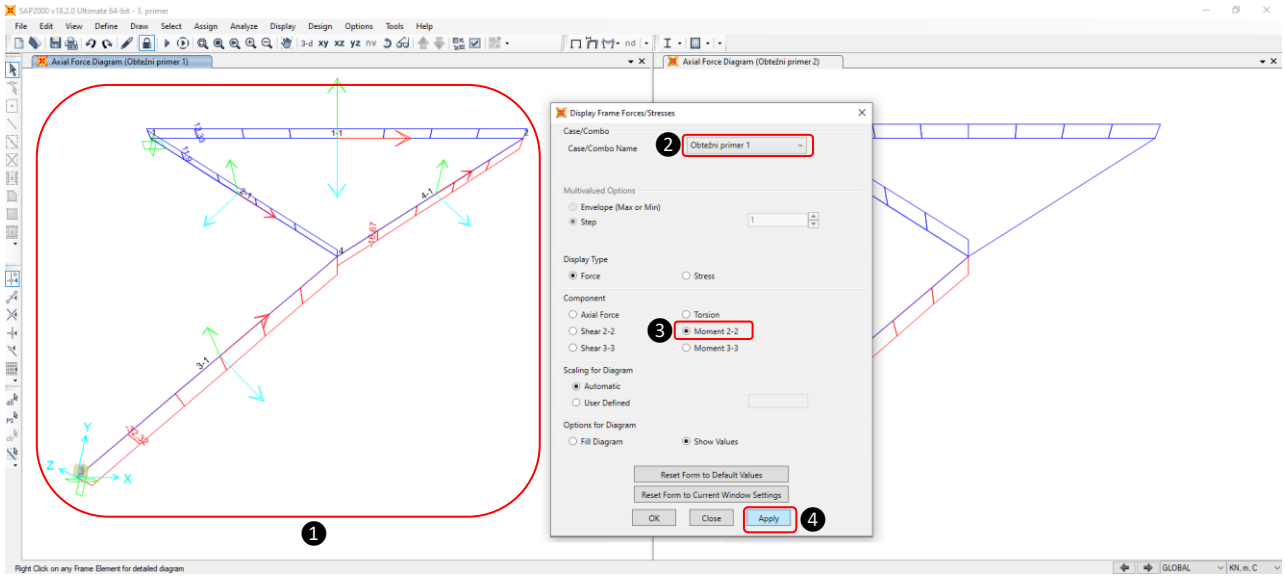
V desnem prikaznem oknu, ki je bilo ob kliku na *Apply* aktivno, so se diagrami osnih sil za drugi obtežni primer izrisali v novem 3D-pogledu (Slika 3.51 – ❶). Enako lahko spremenimo pogled v levem oknu, tako da ga aktiviramo (Slika 3.51 – ❷) in potrdimo s klikom na *OK* (Slika 3.51 – ❸).



Slika 3.51: Nastavitve novega 3D-pogleda

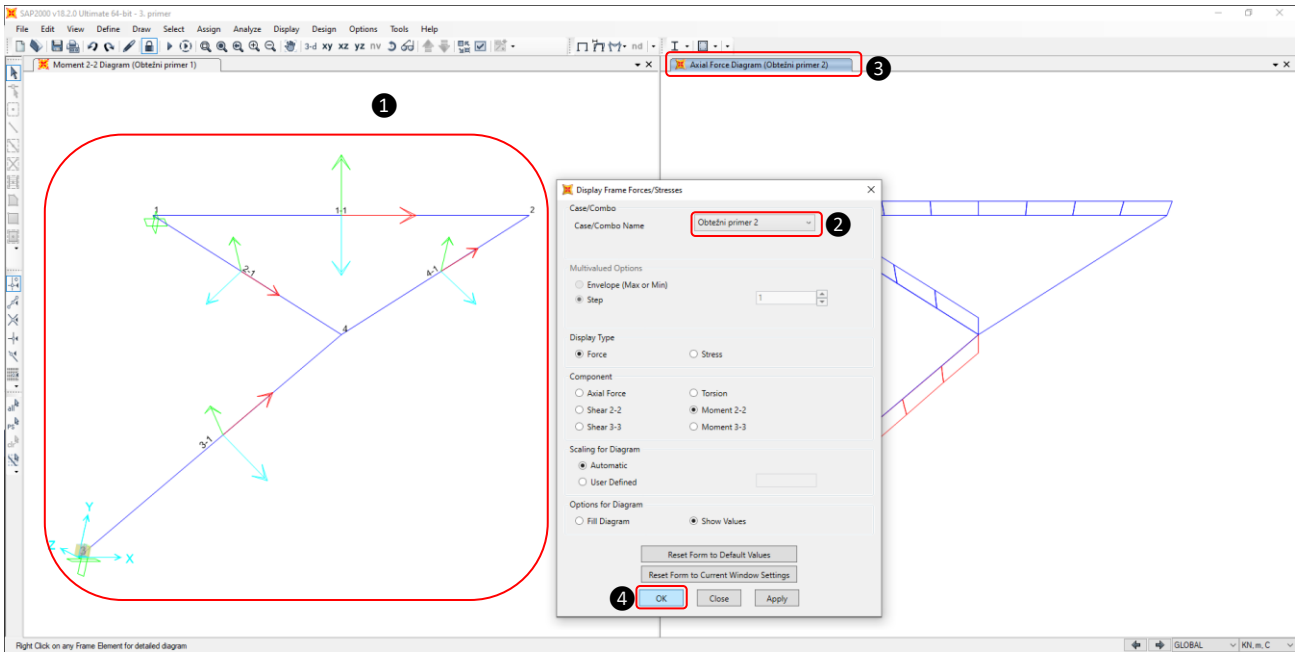
Ob kliku na ikono *OK* se tudi v levem (aktiviranem) prikaznem oknu izriše diagram osnih sil za prvi obtežni primer v enakem 3D-pogledu kot v desnem oknu (Slika 3.52 – ❶). Čeprav v paličju

upogibnih momentov ni, jih je vseeno smiselno preveriti zaradi morebitne napake pri vnašanju podatkov. Za prikaz diagramov upogibnih momentov za prvi obtežni primer v razdelku *Case/Combo* izberemo *Obtežni primer 1* (Slika 3.52 – ❷). Nato v razdelku *Component* (glede na smer delujoče obtežbe in lokalni koordinatni sistem elementov) označimo *Moment 2-2* (Slika 3.52 – ❸). Za potrditev prikaza v že aktiviranem levem oknu kliknemo še na *Apply* (Slika 3.52 – ❹).



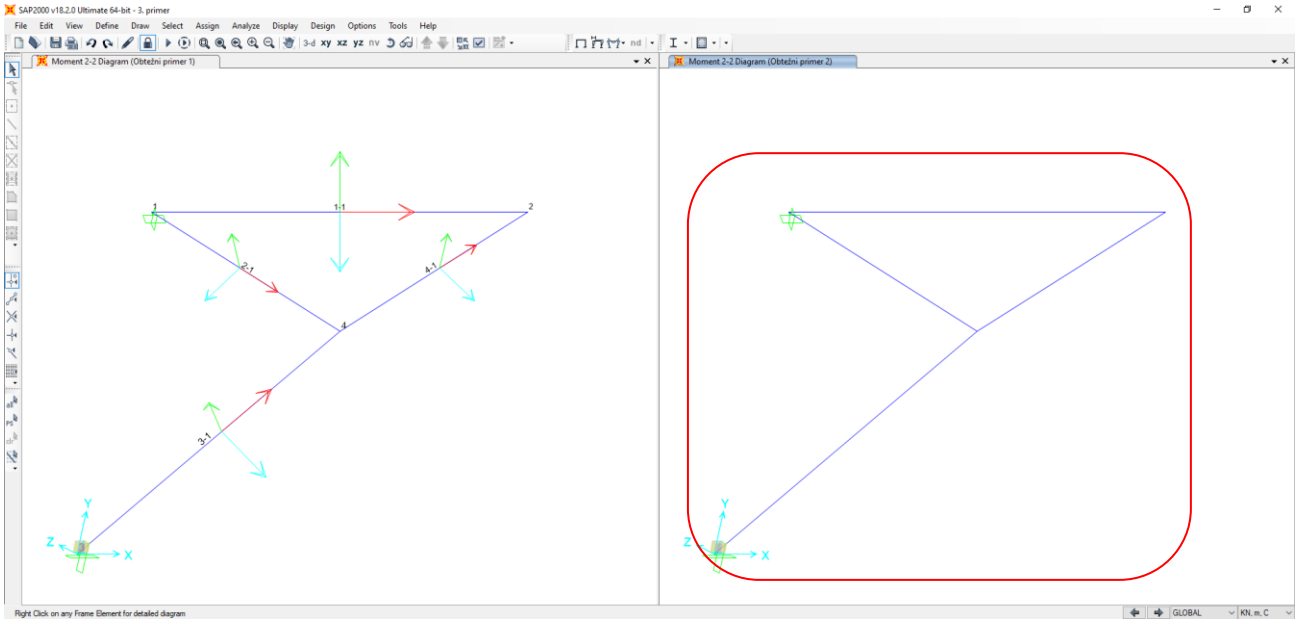
Slika 3.52: Nastavitve prikaza diagrama upogibnih momentov

V levem prikaznem oknu lahko vidimo, da upogibnih momentov v paličju ni (Slika 3.53 – ❶). Enako lahko torej pričakujemo tudi za drugi obtežni primer. Vseeno pa se prepričamo tako, da v razdelku *Case/Combo* tokrat izberemo *Obtežni primer 2* (Slika 3.53 – ❷). Aktiviramo desno prikazno okno (Slika 3.53 – ❸) in potrdimo z *OK* (Slika 3.53 – ❹), saj smo z izrisom notranjih statičnih količin zaključili.



Slika 3.53: Prikaz diagrama upogibnih momentov za prvi obtežni primer

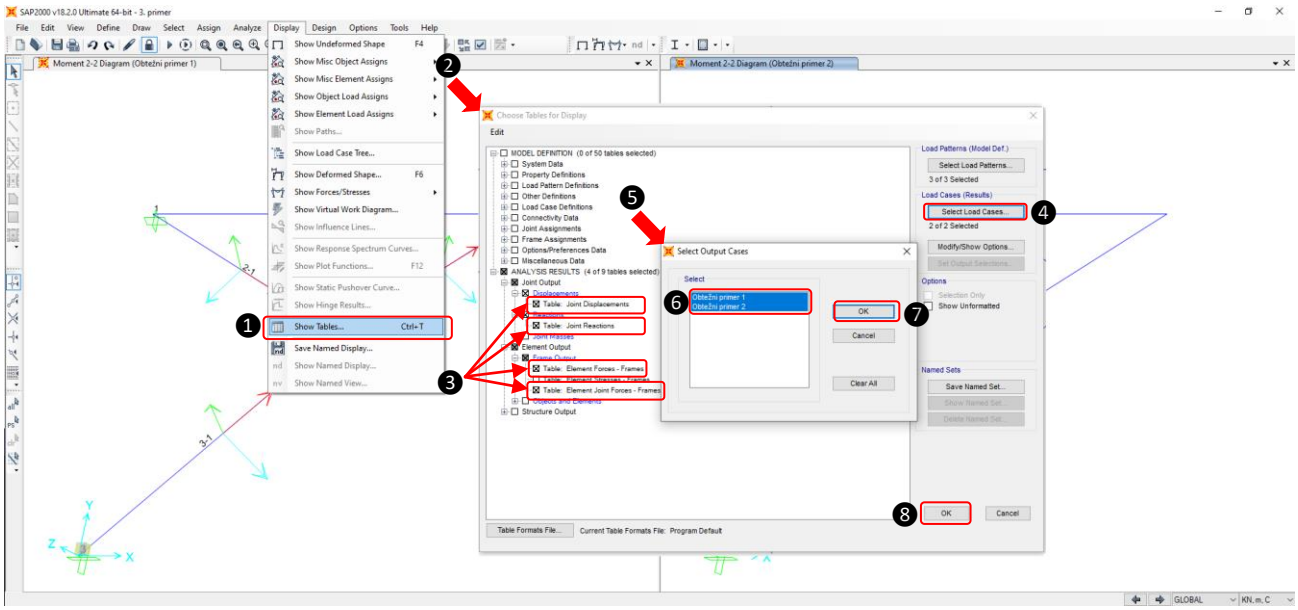
Okno *Display Frame Forces/Stresses* se zapre, hkrati pa se v desnem prikaznem oknu lahko prepričamo, da upogibnih momentov v paličju ni tudi pri drugem obtežnem primeru (Slika 3.54).



Slika 3.54: Prikaz diagramov upogibnih momentov za oba obtežna primera

– Tabelirani prikaz rezultatov

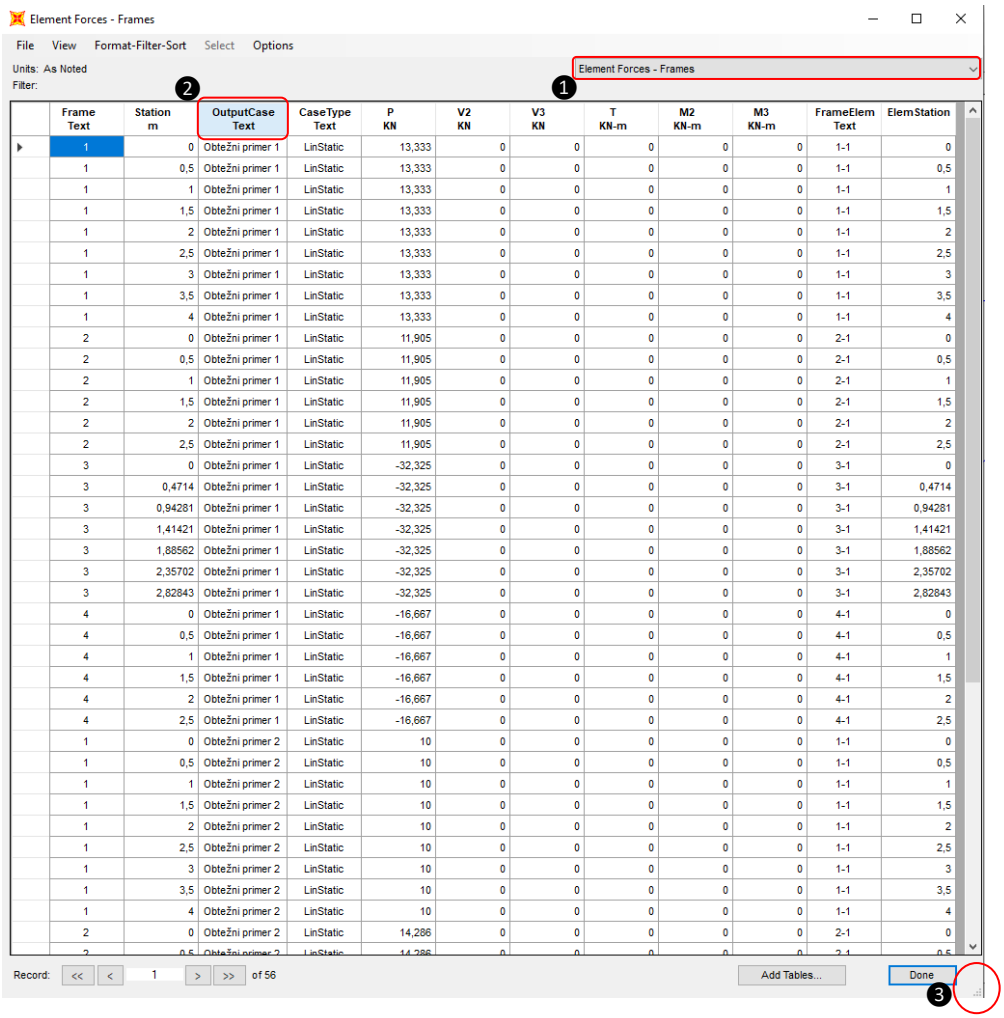
Vse grafično prikazane rezultate (vozliščne pomike, reakcije, notranje statične količine) lahko prikažemo tudi v tabelirani obliki. V glavnem meniju najprej kliknemo na *Display* in nato v visečem meniju še enkrat na *Show Tables* ... (Slika 3.55 – ❶). Nato se odpre okno *Choose Tables for Display* (Slika 3.55 – ❷). Za izpis rezultatov vozliščnih pomikov, reakcij, notranjih statičnih količin v končnih elementih in vozliščnih sil na koncih elementov označimo *Joint Displacements*, *Joint Reactions Element Forces – Frames* in *Element Joint Forces – Frames* (Slika 3.55 – ❸).



Slika 3.55: Izbor količin za izpis rezultatov

V razdelku *Load Cases (Results)* imamo možnost, da s klikom na ikono *Select Load Cases ...* (Slika 3.55 – ❹) odpremo okno *Select Output Cases* (Slika 3.55 – ❺). Na seznamu izmed vseh procesiranih obtežnih primerov izberemo tiste, za katere želimo, da program izpiše rezultate označenih veličin. Tako za izpis rezultatov obeh obtežnih primerov pazimo, da sta oba označena (Slika 3.55 – ❻), in to potrdimo s klikom na *OK* (Slika 3.55 – ❼). Pri označevanju večjega števila obtežnih primerov si pomagamo tudi s tipkama *Shift* ali *Ctrl*, kot je že znano iz operacijskega sistema Windows. Dokončni izpis rezultatov izbranih količin v oknu *Choose Tables for Display* potrdimo še s klikom na *OK* (Slika 3.55 – ❽).

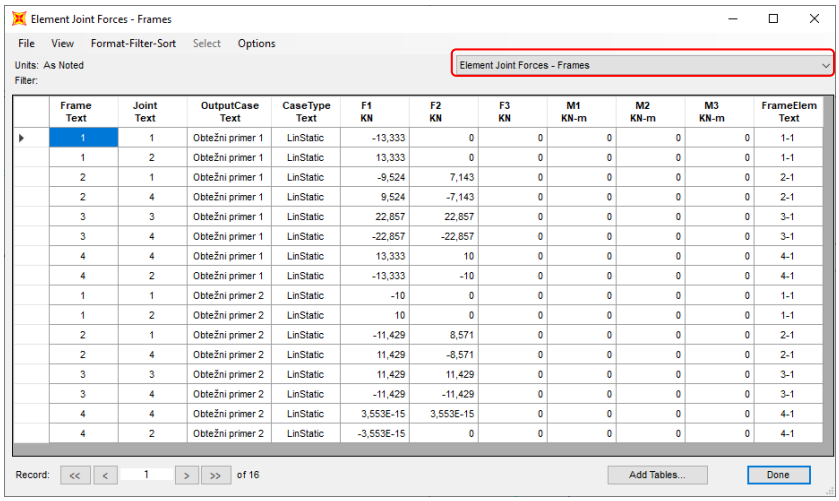
Za izbrane količine se glede na abecedni vrstni red njihovih imen najprej odpre okno *Element Forces – Frames* (Slika 3.56 – ❶) z rezultati vseh notranjih statičnih količin za oba obtežna primera. Rezultati so najprej razvrščeni po oznakah elementov (*Frame Text*) od 1 do 4. Za razvrstitev rezultatov po obtežnih primerih pa kliknemo na *Output Case Text* (Slika 3.56 – ❷) in rezultati obtežnih primerov se razvrstijo po abecednem in številčnem vrstnem redu. Prav tako lahko povečamo obseg prikaza tabele tako, da kliknemo na spodnji desni rob okna in držimo gumb (Slika 3.56 – ❸), hkrati pa pomikamo kazalec in na koncu, ko prilagodimo velikost tabele po meri, kazalec spustimo.



Frame Text	Station m	OutputCase Text	CaseType Text	P KN	V2 KN	V3 KN	T KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m	FrameElem Text	ElemStation
1	0	Obtežni primer 1	LinStatic	13,333	0	0	0	0	0	1-1	0
1	0,5	Obtežni primer 1	LinStatic	13,333	0	0	0	0	0	1-1	0,5
1	1	Obtežni primer 1	LinStatic	13,333	0	0	0	0	0	1-1	1
1	1,5	Obtežni primer 1	LinStatic	13,333	0	0	0	0	0	1-1	1,5
1	2	Obtežni primer 1	LinStatic	13,333	0	0	0	0	0	1-1	2
1	2,5	Obtežni primer 1	LinStatic	13,333	0	0	0	0	0	1-1	2,5
1	3	Obtežni primer 1	LinStatic	13,333	0	0	0	0	0	1-1	3
1	3,5	Obtežni primer 1	LinStatic	13,333	0	0	0	0	0	1-1	3,5
1	4	Obtežni primer 1	LinStatic	13,333	0	0	0	0	0	1-1	4
2	0	Obtežni primer 1	LinStatic	11,905	0	0	0	0	0	2-1	0
2	0,5	Obtežni primer 1	LinStatic	11,905	0	0	0	0	0	2-1	0,5
2	1	Obtežni primer 1	LinStatic	11,905	0	0	0	0	0	2-1	1
2	1,5	Obtežni primer 1	LinStatic	11,905	0	0	0	0	0	2-1	1,5
2	2	Obtežni primer 1	LinStatic	11,905	0	0	0	0	0	2-1	2
2	2,5	Obtežni primer 1	LinStatic	11,905	0	0	0	0	0	2-1	2,5
3	0	Obtežni primer 1	LinStatic	-32,325	0	0	0	0	0	3-1	0
3	0,4714	Obtežni primer 1	LinStatic	-32,325	0	0	0	0	0	3-1	0,4714
3	0,94281	Obtežni primer 1	LinStatic	-32,325	0	0	0	0	0	3-1	0,94281
3	1,41421	Obtežni primer 1	LinStatic	-32,325	0	0	0	0	0	3-1	1,41421
3	1,88562	Obtežni primer 1	LinStatic	-32,325	0	0	0	0	0	3-1	1,88562
3	2,35702	Obtežni primer 1	LinStatic	-32,325	0	0	0	0	0	3-1	2,35702
3	2,82843	Obtežni primer 1	LinStatic	-32,325	0	0	0	0	0	3-1	2,82843
4	0	Obtežni primer 1	LinStatic	-16,667	0	0	0	0	0	4-1	0
4	0,5	Obtežni primer 1	LinStatic	-16,667	0	0	0	0	0	4-1	0,5
4	1	Obtežni primer 1	LinStatic	-16,667	0	0	0	0	0	4-1	1
4	1,5	Obtežni primer 1	LinStatic	-16,667	0	0	0	0	0	4-1	1,5
4	2	Obtežni primer 1	LinStatic	-16,667	0	0	0	0	0	4-1	2
4	2,5	Obtežni primer 1	LinStatic	-16,667	0	0	0	0	0	4-1	2,5
1	0	Obtežni primer 2	LinStatic	10	0	0	0	0	0	1-1	0
1	0,5	Obtežni primer 2	LinStatic	10	0	0	0	0	0	1-1	0,5
1	1	Obtežni primer 2	LinStatic	10	0	0	0	0	0	1-1	1
1	1,5	Obtežni primer 2	LinStatic	10	0	0	0	0	0	1-1	1,5
1	2	Obtežni primer 2	LinStatic	10	0	0	0	0	0	1-1	2
1	2,5	Obtežni primer 2	LinStatic	10	0	0	0	0	0	1-1	2,5
1	3	Obtežni primer 2	LinStatic	10	0	0	0	0	0	1-1	3
1	3,5	Obtežni primer 2	LinStatic	10	0	0	0	0	0	1-1	3,5
1	4	Obtežni primer 2	LinStatic	10	0	0	0	0	0	1-1	4
2	0	Obtežni primer 2	LinStatic	14,286	0	0	0	0	0	2-1	0

Slika 3.56: Rezultati NSK

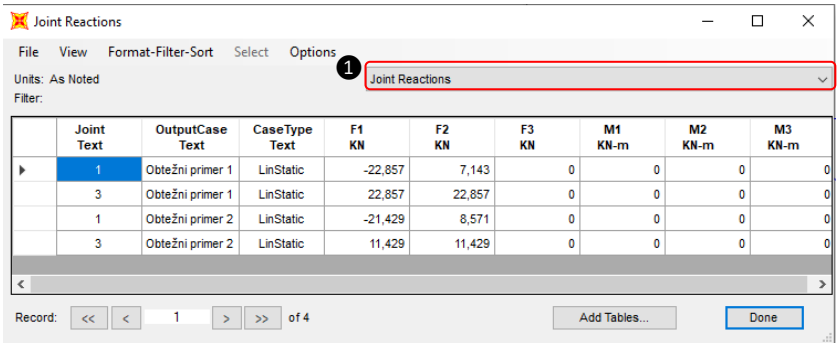
Za prikaz vozliščnih sil in momentov na seznamu izberemo *Element Joint Forces – Frames* (Slika 3.57).



Frame Text	Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	F1 KN	F2 KN	F3 KN	M1 KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m	FrameElem Text
1	1	Obtežni primer 1	LinStatic	-13,333	0	0	0	0	0	1-1
1	2	Obtežni primer 1	LinStatic	13,333	0	0	0	0	0	1-1
2	1	Obtežni primer 1	LinStatic	-9,524	7,143	0	0	0	0	2-1
2	4	Obtežni primer 1	LinStatic	9,524	-7,143	0	0	0	0	2-1
3	3	Obtežni primer 1	LinStatic	22,857	22,857	0	0	0	0	3-1
3	4	Obtežni primer 1	LinStatic	-22,857	-22,857	0	0	0	0	3-1
4	4	Obtežni primer 1	LinStatic	13,333	10	0	0	0	0	4-1
4	2	Obtežni primer 1	LinStatic	-13,333	-10	0	0	0	0	4-1
1	1	Obtežni primer 2	LinStatic	-10	0	0	0	0	0	1-1
1	2	Obtežni primer 2	LinStatic	10	0	0	0	0	0	1-1
2	1	Obtežni primer 2	LinStatic	-11,429	8,571	0	0	0	0	2-1
2	4	Obtežni primer 2	LinStatic	11,429	-8,571	0	0	0	0	2-1
3	3	Obtežni primer 2	LinStatic	11,429	11,429	0	0	0	0	3-1
3	4	Obtežni primer 2	LinStatic	-11,429	-11,429	0	0	0	0	3-1
4	4	Obtežni primer 2	LinStatic	3,553E-15	3,553E-15	0	0	0	0	4-1
4	2	Obtežni primer 2	LinStatic	-3,553E-15	0	0	0	0	0	4-1

Slika 3.57: Rezultati vozliščnih sil in momentov

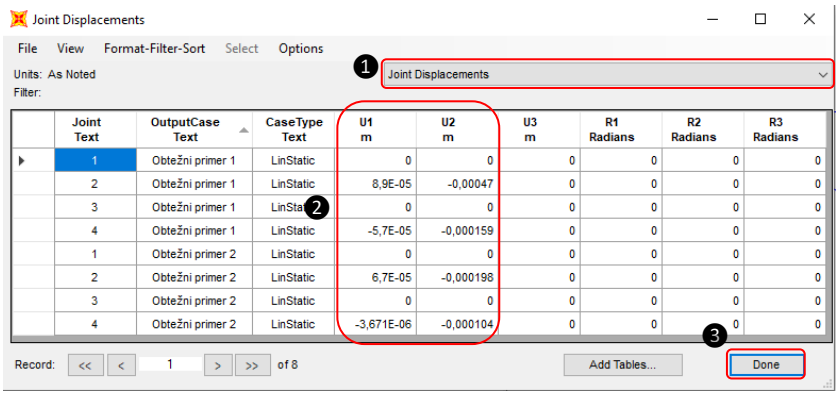
Za prikaz reakcij na seznamu izberemo *Joint Reactions* (Slika 3.58).



Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	F1 KN	F2 KN	F3 KN	M1 KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m
1	Obtežni primer 1	LinStatic	-22,857	7,143	0	0	0	0
3	Obtežni primer 1	LinStatic	22,857	22,857	0	0	0	0
1	Obtežni primer 2	LinStatic	-21,429	8,571	0	0	0	0
3	Obtežni primer 2	LinStatic	11,429	11,429	0	0	0	0

Slika 3.58: Rezultati reakcij

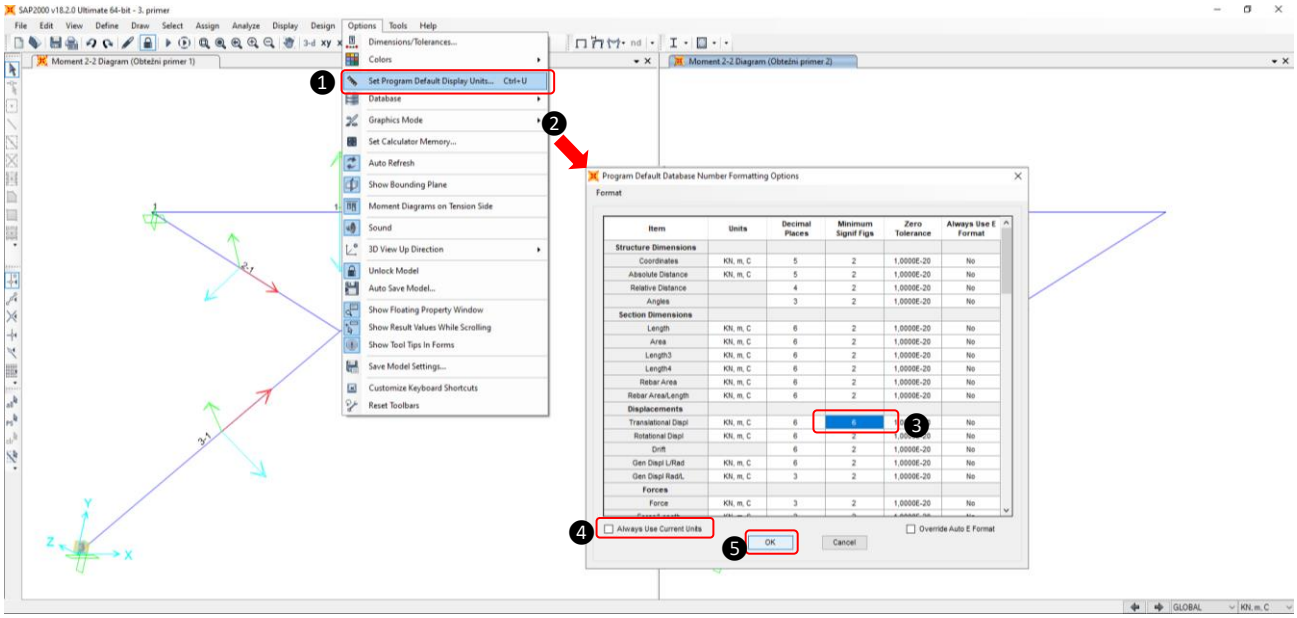
Za prikaz vozliščnih pomikov in zasukov na seznamu izberemo *Joint Displacements* (Slika 3.59 – ❶). V tabeli so prikazani vsi vozliščni pomiki paličja, ki izkazujejo najmanjšo natančnost izpisa v primerjavi z ostalimi količinami (Slika 3.59 – ❷). Po pregledu rezultatov okno zapremo s klikom na *Done* (Slika 3.59 – ❸).



Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	U1 m	U2 m	U3 m	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
1	Obtežni primer 1	LinStatic	0	0	0	0	0	0
2	Obtežni primer 1	LinStatic	8,9E-05	-0,00047	0	0	0	0
3	Obtežni primer 1	LinStatic	0	0	0	0	0	0
4	Obtežni primer 1	LinStatic	-5,7E-05	-0,000159	0	0	0	0
1	Obtežni primer 2	LinStatic	0	0	0	0	0	0
2	Obtežni primer 2	LinStatic	6,7E-05	-0,000198	0	0	0	0
3	Obtežni primer 2	LinStatic	0	0	0	0	0	0
4	Obtežni primer 2	LinStatic	-3,671E-06	-0,000104	0	0	0	0

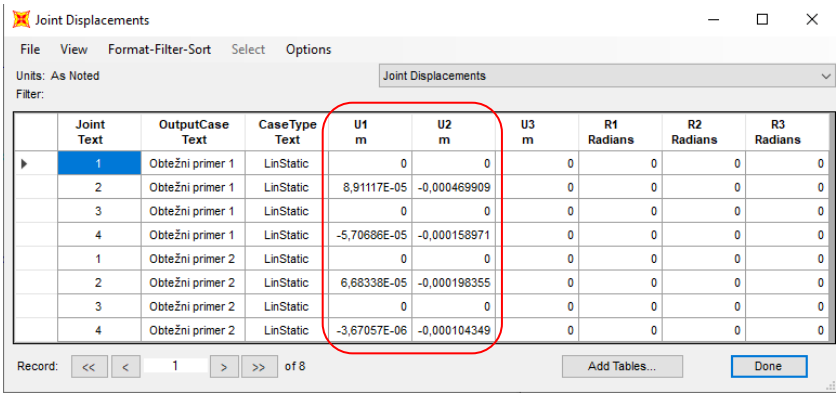
Slika 3.59: Rezultati vozliščnih pomikov

Za natančnejši izpis rezultatov vozliščnih pomikov v glavnem meniju kliknemo na *Options* in v visečem meniju še enkrat na Set *Default Display Units* ... (Slika 3.60 – ❶). Odpre se okno *Program Default Database Number Formatting Options* (Slika 3.60 – ❷), v katerem lahko nastavimo natančnost izpisa (dimenzij, pomikov, sil, napetosti itd.). Da lahko sploh spreminjamo predefirane natančnosti izpisa za katerokoli količino na seznamu, moramo najprej s klikom odznačiti ikono ☑, ki leži poleg zapisa *Always Use Current Units* (Slika 3.60 – ❸). Nato lahko minimalno število decimalnih mest pri izpisu vozliščnih pomikov povečamo iz dveh na na primer šest mest natančno, tako da v vrstici z napisom *Translational Displ* v pripadajoči stolpec z napisom *Minimum Signif Figs* vpišemo število 6 namesto 2 (Slika 3.60 – ❹). Izbrane spremembe še potrdimo s klikom na *OK* (Slika 3.60 – ❺).



Slika 3.60: Natavitve natančnosti izpisa vozliščnih pomikov

Ob ponovnem odprtju tabele z izpisom vozliščnih pomikov lahko vidimo, da so vsi pomiki izpisani na šest (neničelnih) decimalnih mest natančno (Slika 3.61).



Joint Displacements

File View Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted

Filter:

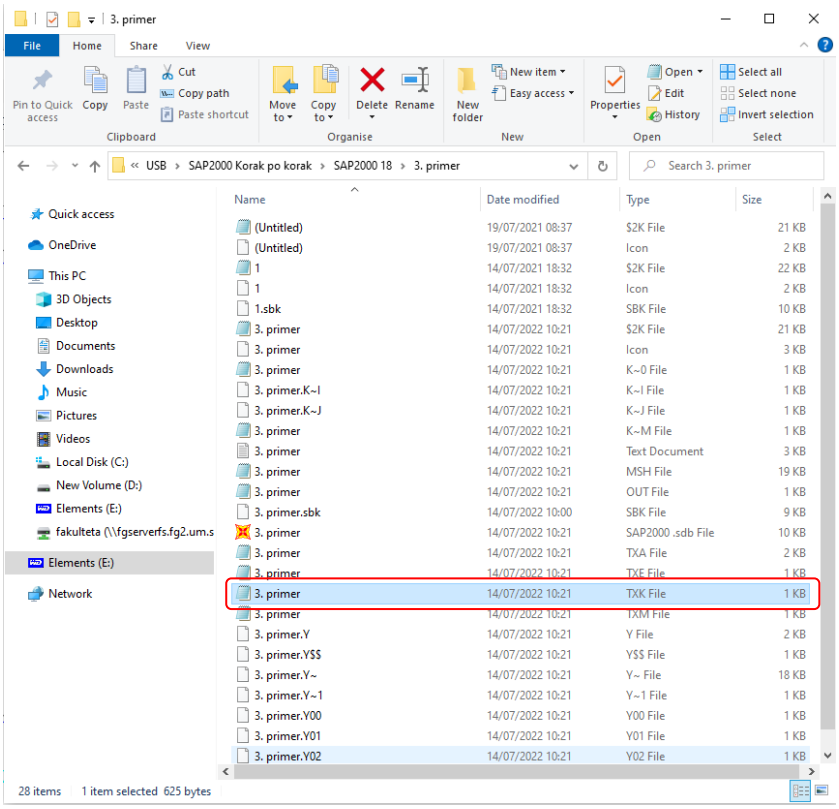
Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	U1 m	U2 m	U3 m	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
1	Obtežni primer 1	LinStatic	0	0	0	0	0	0
2	Obtežni primer 1	LinStatic	8,91117E-05	-0,000469909	0	0	0	0
3	Obtežni primer 1	LinStatic	0	0	0	0	0	0
4	Obtežni primer 1	LinStatic	-5,70686E-05	-0,000158971	0	0	0	0
1	Obtežni primer 2	LinStatic	0	0	0	0	0	0
2	Obtežni primer 2	LinStatic	6,68338E-05	-0,000198355	0	0	0	0
3	Obtežni primer 2	LinStatic	0	0	0	0	0	0
4	Obtežni primer 2	LinStatic	-3,67057E-06	-0,000104349	0	0	0	0

Record: 1 of 8 Add Tables... Done

Slika 3.61: Rezultati vozliščnih pomikov, zaokroženi na šest neničelnih decimalnih mest natančno

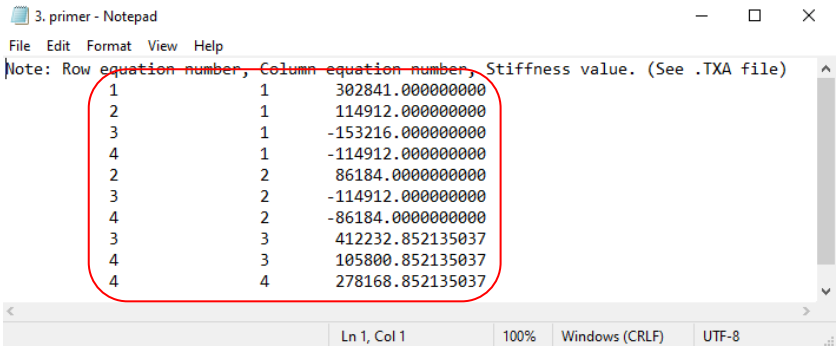
3.5 Izpis reducirane togostne matrike konstrukcije

Izpis togostne matrike konstrukcije ne bi bil mogoč, če ne bi predhodno v nastavitvah analize tega omogočili (glej Slika 3.32 – ❼, str. 117). Za izpis togostne matrike konstrukcije na disku poiščemo lokacijo, kjer je dokument shranjen, in v Beležnici odpremo tip datoteke TXK (Slika 3.62).



Slika 3.62: Lokacija datoteke primera 3

Odpre se Beležnica z izpisanimi členi spodnjega trikotnika reducirane togostne matrike 4 x 4 za izračun skupno štirih neznanih pomikov v vozliščih 2 in 4 (Slika 3.63).



Slika 3.63: V Beležnici izpisani členi spodnjega trikotnika togostne matrike

Univerza v Mariboru

Fakulteta za gradbeništvo,
prometno inženirstvo in arhitekturo