

Fakulteta za strojništvo
Laboratorij za numerično modeliranje in simulacije



Gradivo za vaje iz predmeta Računalniška analiza konstrukcij

Trdnostna analiza paličja v programu Abaqus

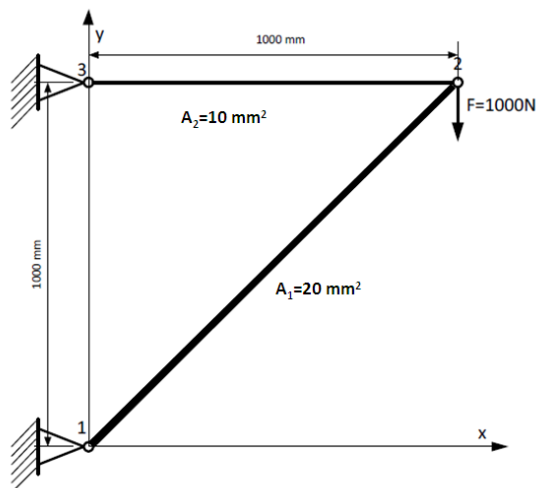
Nosilec predmeta: prof. dr. Boris Štok

Avtor: as. dr. Marko Vrh

Ljubljana, 2014

1 Vsebina vaje

S pomočjo programskega paketa ABAQUS je potrebno analizirati paličje, ki je prikazano na sliki 1.



Slika 1: Primer paličja

Potrebno je določiti pomike krajišč obeh palic, napetosti v palicah ter reakcije v podporah.¹

2 Povzetek teoretičnih osnov

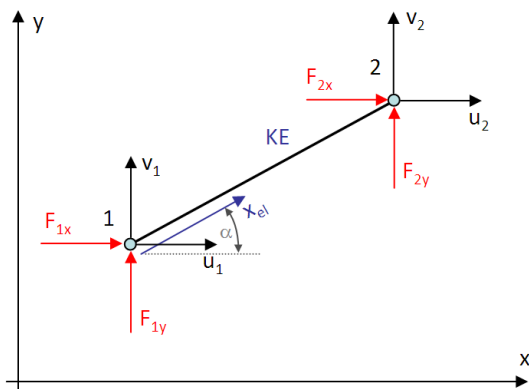
2.1 Končni element

Paličje bomo obravnavali z metodo končnih elementov (MKE), ki je vgrajena v programski paket Abaqus. Dvovozliščni končni element (KE), ki ga bomo uporabili, smo izpeljali in podrobno obravnavali na predavanjih in vajah. Enačba KE je sledeče oblike:

$$\frac{EA}{L} \begin{bmatrix} c^2 & cs & -c^2 & -cs \\ cs & s^2 & -cs & -s^2 \\ -c^2 & -cs & c^2 & cs \\ -cs & -s^2 & cs & s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{1x} \\ F_{1y} \\ F_{2x} \\ F_{2y} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

¹ Pričujoče gradivo nikakor ni nadomestek za obisk vaje, saj ne povzema vsebine vaje dovolj podrobno. Prav tako ne vsebuje teoretičnih vsebin in dodatnih razlag, ki so podane na vaji. Namen gradiva je prikaz bistvenih korakov pri gradnji numeričnega modela v programu Abaqus, da študentje lažje izvedejo vajo na računalnikih. Prav tako je gradivo namenjeno kot pripomoček za pripravo na izpit.

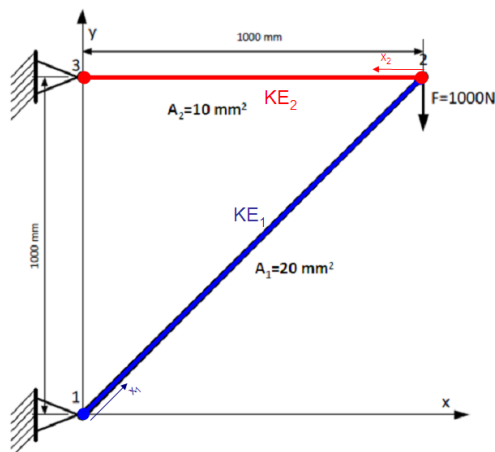
pri čemer je $c = \cos(\alpha)$, $s = \sin(\alpha)$, α pa kot med osema lokalnega in globalnega koordinatnega sistema. E je elastični modul gradiva, A prerez palice, L dolžina končnega elementa, u_1 in v_1 pomika prvega vozlišča v (globalni) x in y smeri, u_2 in v_2 pomika drugega vozlišča v (globalni) x in y smeri, F_{1x} , F_{1y} , F_{2x} in F_{2y} pa sile v vozliščih, kot prikazuje slika 2.



Slika 2: Dvovozliščni končni element v ravnini

2.2 Zlaganje končnih elementov

Za narisano paličje je potrebno uporabiti dva končna elementa, za vsako palico svojega, kot prikazuje slika 3.



Slika 3: Aplikacija dveh končnih elementov na paličje

Ker za vsak končni element poznamo elastični modul E , presek A , dolžino L ter kot med lokalnim in globalnim koordinatnim sistemom ($\alpha_1=45^\circ$, $\alpha_2=180^\circ$) lahko za vsak končni

element izračunamo togostno matriko. Z razširitvijo na vse prostostne stopnje in seštetjem obeh sistemov enačb dobimo sistem:

$$\begin{bmatrix} k_{11}^1 & k_{12}^1 & k_{13}^1 & k_{14}^1 & 0 & 0 \\ k_{21}^1 & k_{22}^1 & k_{23}^1 & k_{24}^1 & 0 & 0 \\ k_{31}^1 & k_{32}^1 & k_{33}^1 + k_{11}^2 & k_{34}^1 + k_{12}^2 & k_{13}^2 & k_{14}^2 \\ k_{41}^1 & k_{42}^1 & k_{43}^1 + k_{21}^2 & k_{44}^1 + k_{22}^2 & k_{23}^2 & k_{24}^2 \\ 0 & 0 & k_{31}^2 & k_{32}^2 & k_{33}^2 & k_{34}^2 \\ 0 & 0 & k_{41}^2 & k_{42}^2 & k_{43}^2 & k_{44}^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{1x}^1 \\ F_{1y}^1 \\ F_{2x}^1 + F_{2x}^2 \\ F_{2y}^1 + F_{2y}^2 \\ F_{3x}^2 \\ F_{3y}^2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

pri čemer so členi togostne matrike prvega elementa označeni z nadpisanim indeksom 1, členi togostne matrike drugega elementa pa z nadpisanim indeksom 2.

Z upoštevanjem robnih pogojev dobimo rešljiv sistem enačb

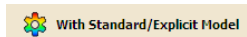
$$\begin{bmatrix} k_{11}^1 & k_{12}^1 & k_{13}^1 & k_{14}^1 & 0 & 0 \\ k_{21}^1 & k_{22}^1 & k_{23}^1 & k_{24}^1 & 0 & 0 \\ k_{31}^1 & k_{32}^1 & k_{33}^1 + k_{11}^2 & k_{34}^1 + k_{12}^2 & k_{13}^2 & k_{14}^2 \\ k_{41}^1 & k_{42}^1 & k_{43}^1 + k_{21}^2 & k_{44}^1 + k_{22}^2 & k_{23}^2 & k_{24}^2 \\ 0 & 0 & k_{31}^2 & k_{32}^2 & k_{33}^2 & k_{34}^2 \\ 0 & 0 & k_{41}^2 & k_{42}^2 & k_{43}^2 & k_{44}^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ u_2 \\ v_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{1x}^1 \\ F_{1y}^1 \\ 0 \\ -F \\ F_{3x}^2 \\ F_{3y}^2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

z neznankami u_2 in v_2 , ki so pomiki drugega vozlišča. Prav tako iz sistema enačb pridobim vrednosti F_{1x}^1 , F_{1y}^1 , F_{3x}^2 , in F_{3y}^2 , ki so velikosti reakcijskih sil v prvem in tretjem vozlišču.

3 Gradnja modela v programskem paketu ABAQUS

Računalniški program Abaqus vsebuje t.i. predprocesor (CAE), ki je namenjen izgradnji numeričnega modela in pripravi izhodne datoteke (.inp). CAE je razdeljen na module (Part, Property, ...), ki uporabnika sistematično vodijo skozi process izgradnje modela. Te module bomo sledili tudi pri izgradnji modela za obravnavano paličje. Program zaženemo iz startne vrstice *Start*→*Programi*→*Abaqus*→*Abaqus CAE*.

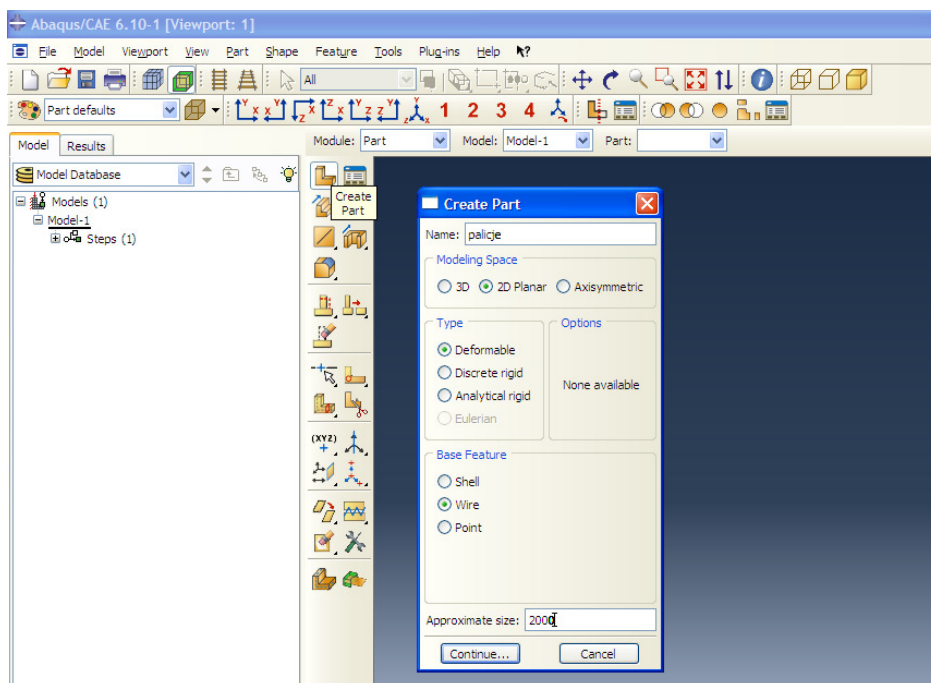
Izberemo gumb Standard/Explicit



3.1 Part

Ob zagonu programa se nahajamo v prvem modulu "Part". Modul je namenjen definiranju geometrije posameznih območij Ω_i , ki bodo vključena v simulacijo.

Geometrije lahko v program uvozimo iz zunanjih datotek (*File*→*Import*→*Part*) ali pa jo generiramo znotraj programa. Ker je geometrija paličja enostavna, jo bomo definirali znotraj programa z ukazom *Create part*. Odpre se meni, v katerega vpišemo poljubno ime geometrije. Nato pa je potrebno v meniju “Modeling Space” izbrati razsežnost modela. Izbira je vezana na prostostne stopnje, ki naj jih model ima in korenito vpliva na vse nadaljnje definicije. Ker je obravnavani primer ravninski, izberemo opcijo “2D Planar”. Tip modela je “Deformabilni”, saj želimo izračunati pomike in deformacije paličja zaradi obremenitve. Pri linijskih konstrukcijah pa je za definicijo geometrije dovolj, da narišemo težiščnico prereza, zato kot “Base Feature” izberemo Wire.



Slika 4: Izdelava geometrije

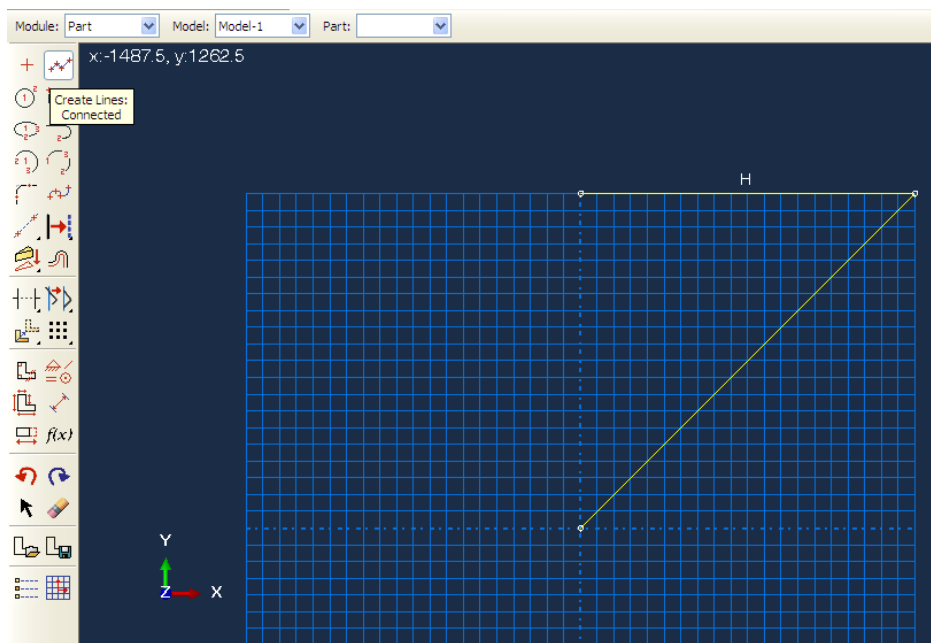
Že na začetku gradnje modela se je potrebno odločiti za sistem enot, ki ga bomo uporabili. Abaqus nikjer ne zahteva vpis izbire enot in le to prepušča uporabniku. Paziti moramo, da je izbrani sistem enot konsistenten. Primeri konsistentnih enot so prikazani v Tabeli 1.

Tabela 1: Primeri konsistentnih enot

MASA	DOLŽINA	ČAS	SILA	NAPETOST	ENERGIJA
kg	m	s	N	Pa	J
kg	mm	ms	kN	GPa	kNmm
g	mm	ms	N	MPa	Nmm
tona	mm	s	N	MPa	Nmm

Opozoriti velja, da je podatke potrebno podati v izbranem konsistentnem sistemu enot, prav tako pa so vsi dobljeni rezultati podani v enakem (izbranem) sistemu enot. Izberimo sistem, kjer podajamo dimenzije v mm, silo pa v N. Zato naj bo velikost risalne površine 2000 (mm).

V nadaljevanju (*Continue...*) se odpre risalna površina, kjer z orodjem *Create Lines: Connected* narišemo težiščnico prereza paličja.



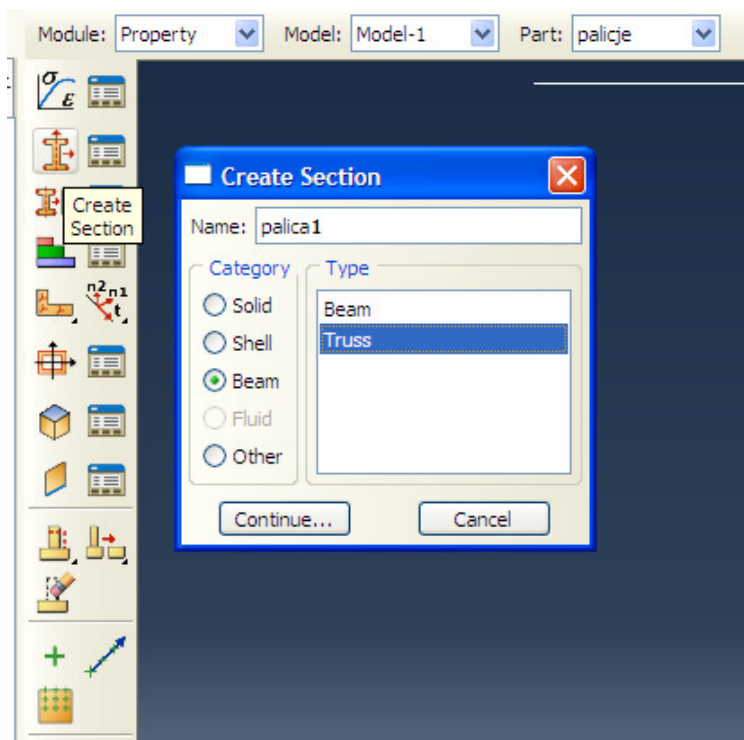
Slika 5: Risanje težiščnice

Ukaz *Create Lines: Connected* zapustimo s tipko »esc« na tipkovnici in potrdimo narisano z ukazom *Done*.

Geometrija paličja je s tem definirana.

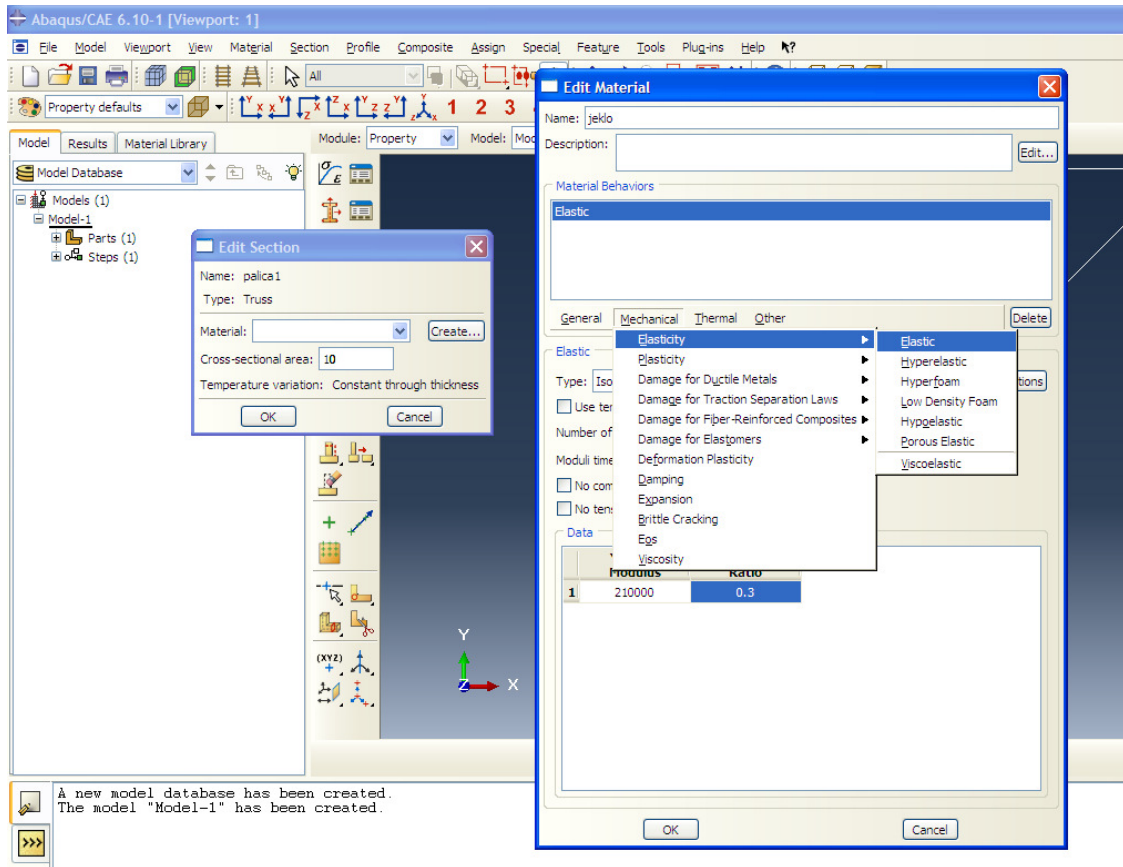
3.2 Property

V modulu property definiramo lastnosti območij Ω_i , ki jih program imenuje »Sections«. Lastnosti lahko razumemo v smislu vodilnih enačb problema, ki veljajo na geometrijskih območjih Ω_i . V programu najprej definiramo lastnost prve palice ukazom *Create Section*. V meniju izberemo kategorijo *Beam*, ki jo je potrebno razumeti kot kategorijo za linijske konstrukcije, nato pa še podkategorijo *Truss*, ki pomeni lastnost palice.




Slika 6: Definiranje lastnosti

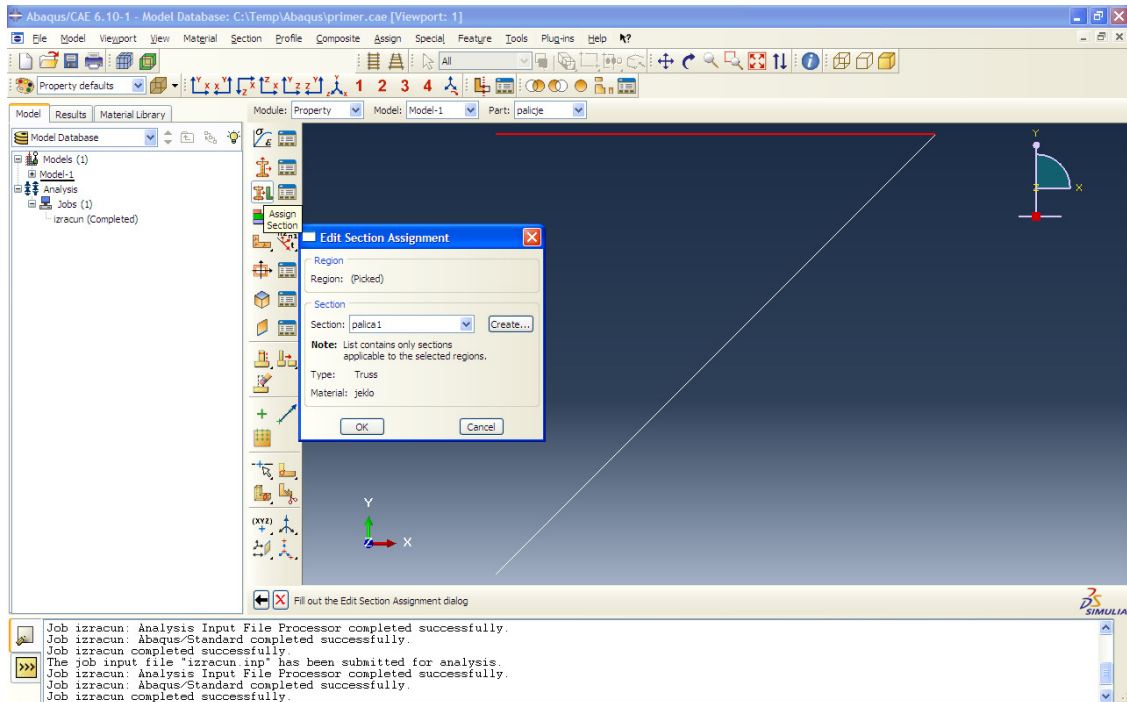
V nadaljevanju predpišemo material, ki naj sledi linearnemu izotropnemu Hookeovemu zakonu s konstantama E in ν .



Slika 7: Definiranje materiala

Poleg tega vpišemo podatek še o preseku palice (Cross-sectional area) in vnos potrdimo z gumbom *OK*. Na identični način ustvarimo še eno lastnost (razumemo jo kot diferencialno enačbo) za drugo palico, ki ima sicer enak material (lahko uporabimo material jeklo) a drugačen presek.

Lastnosti, ki smo jih ustvarili na abstraktni ravni je potrebno še predpisati na geometrijska območja Ω_i . Za ta namen uporabimo gumb *Assign section*  ter z miško izberemo vodoravno palico. Potrdimo izbiro z ukazom *Done*, v meniju izberemo lastnost »palica1« ter potrdimo izbiro s tipko *Ok*. Vodoravna palica se je obarvala zeleno, kar pomeni, da ima sedaj geometrijsko območje tudi neko lastnost – na njem velja območna enačba problema.

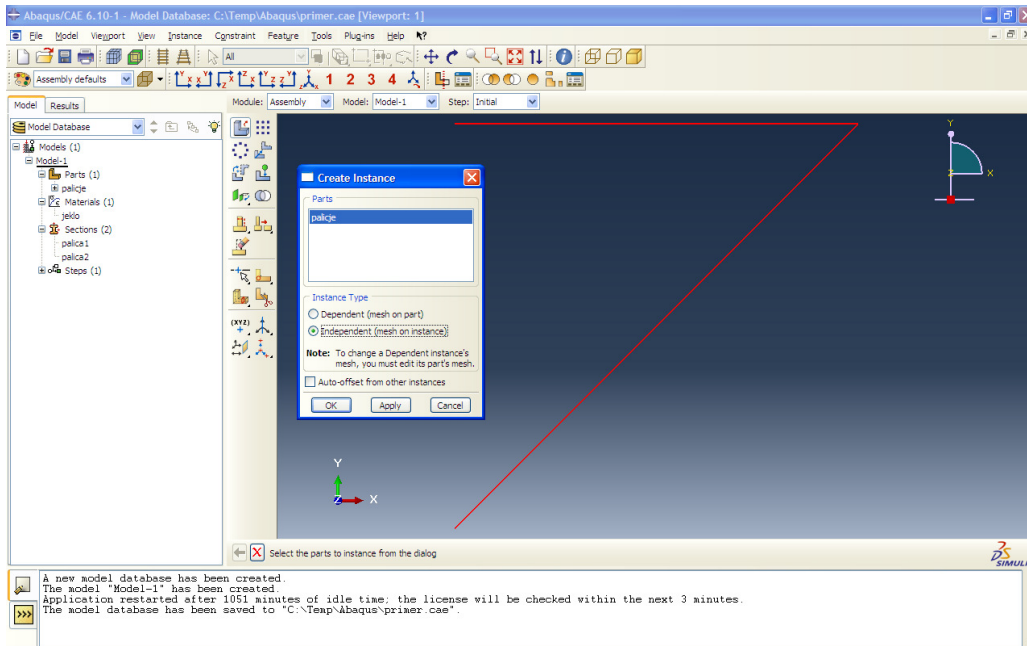


Slika 8: Aplikacija lastnosti na geometrijo

Postopek ponovimo še za drugo palico. Z miško izberemo vodoravno palico, potrdimo z *Done*, izberemo lastnost »palica2« ter potrdimo z *OK*. S tem zaključimo definicijo lastnosti.

3.3 Assembly

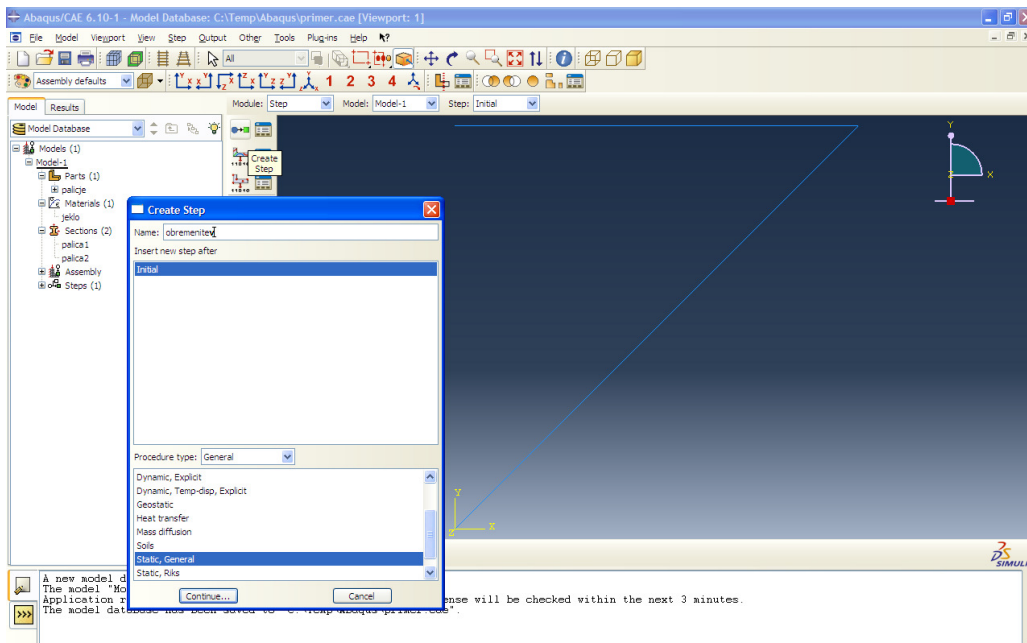
V modul *Assembly* uvažamo in medsebojno pozicioniramo predhodno pripravljene parte. Ker imamo v našem primeru le en part, uvozimo le-tega z ukazom *Create instance*, izberemo *Independent*, in zaključimo z *OK*.



Slika 9: Uvoz parta v Assembly

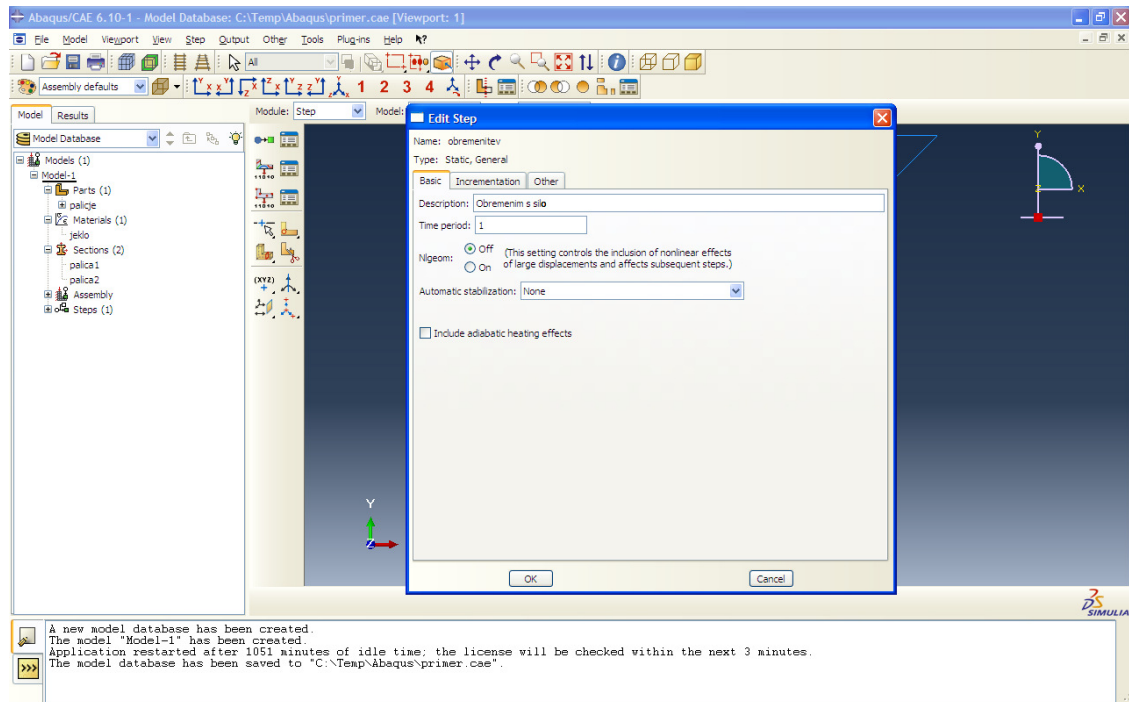
3.4 Step

V modulu *Step* definiramo zaporedne korake analize ter tip analize. Korak ustvarimo z gumbom *Create step*. Poimenujemo ga naprimer “obremenitev” ter izberemo tip analize Static, General.



Slika 10: Kreiranje stepa (koraka)

V nadaljevanju lahko dodamo opis koraka. “Time period” za statično analizo ni pomemben. Ukaz “Nlgeom” pustimo na off, saj nam zaradi majhnih pomikov zadošča linearna statična analiza, kjer upoštevamo majhne pomike in obremenitev na začetni geometriji.



Slika 11: Nadalnje definiranje stopa (koraka)

Kreiranje koraka končamo z *Ok*.

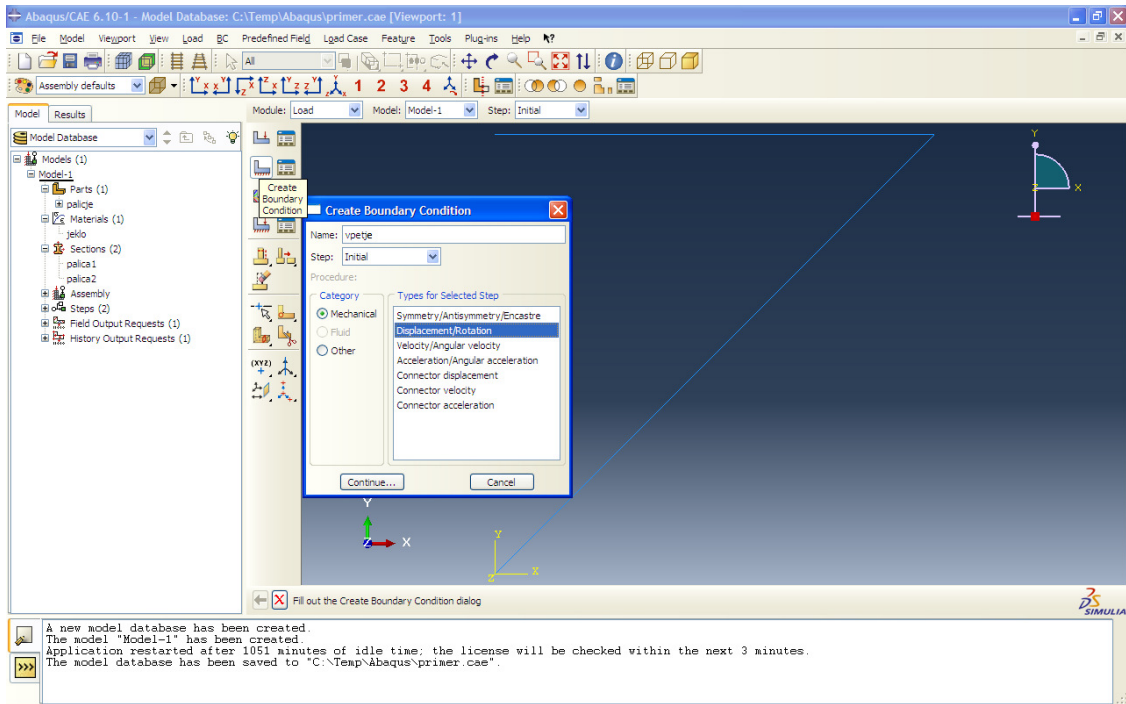
3.5 Interaction

V modulu Interaction definiramo interakcije med parti, kot so kontakti, kinematične vezi in podobno. V našem primeru imamo samo ena part, zato lahko ta modul preskočimo.

3.6 Load

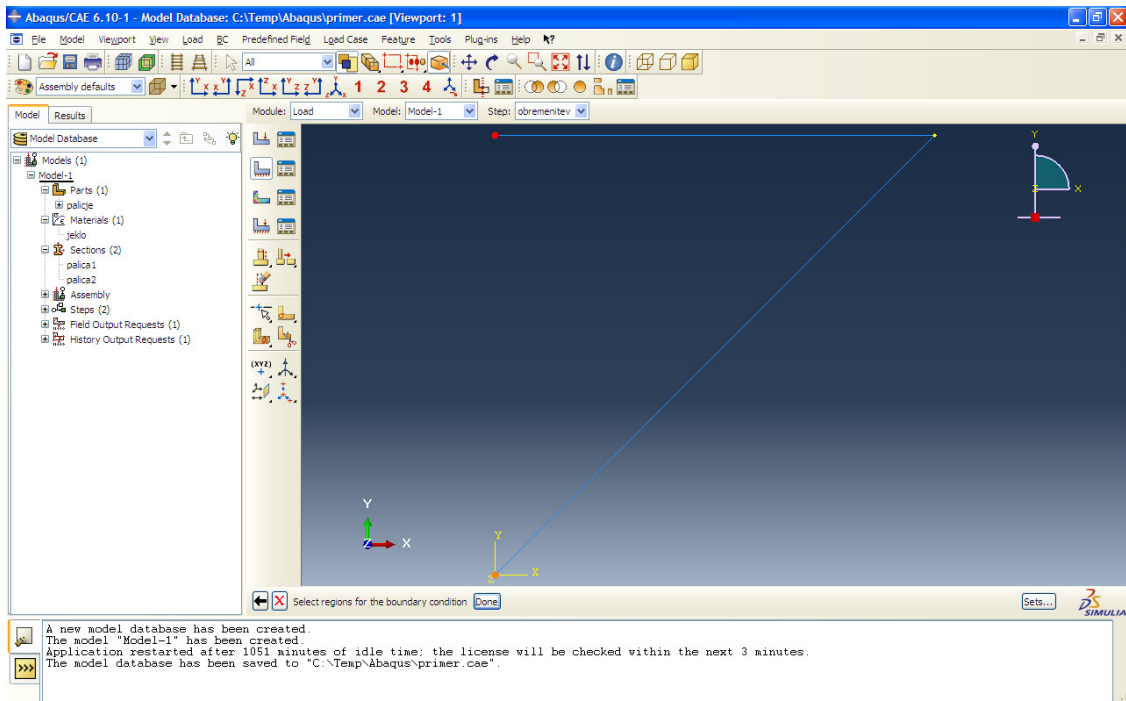
V modulu Load definiramo robne pogoje in sicer simetrije, vpetja in aktivne obremenitve, kot so sile, tlaki itd.

Kjer sta v paličju členu je potrebno fiksirati prostostne stopnje pomika v x in y smeri. Uporabimo gumb *Create Boundary condition*, izberemo *Initial* in opcijo *Displacement/Rotations*.



Slika 12: Določevanje vpetja

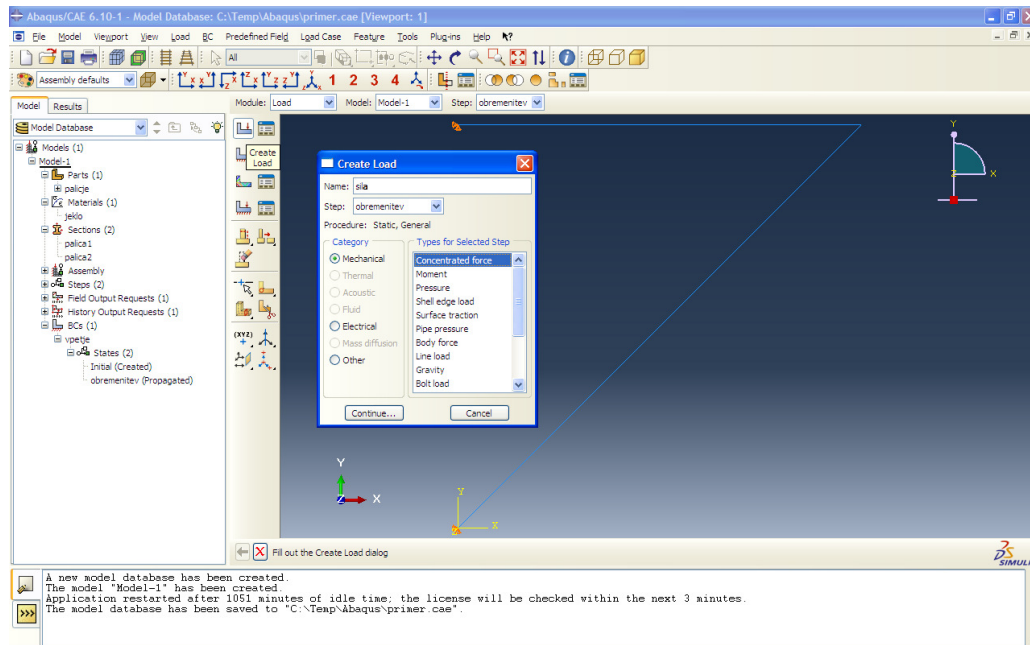
Z uporabo tipke *Shift* izberemo krajišči (točki) kjer je paličje vpeto in potrdimo izbiro.



Slika 13: Izbira točk vpetja

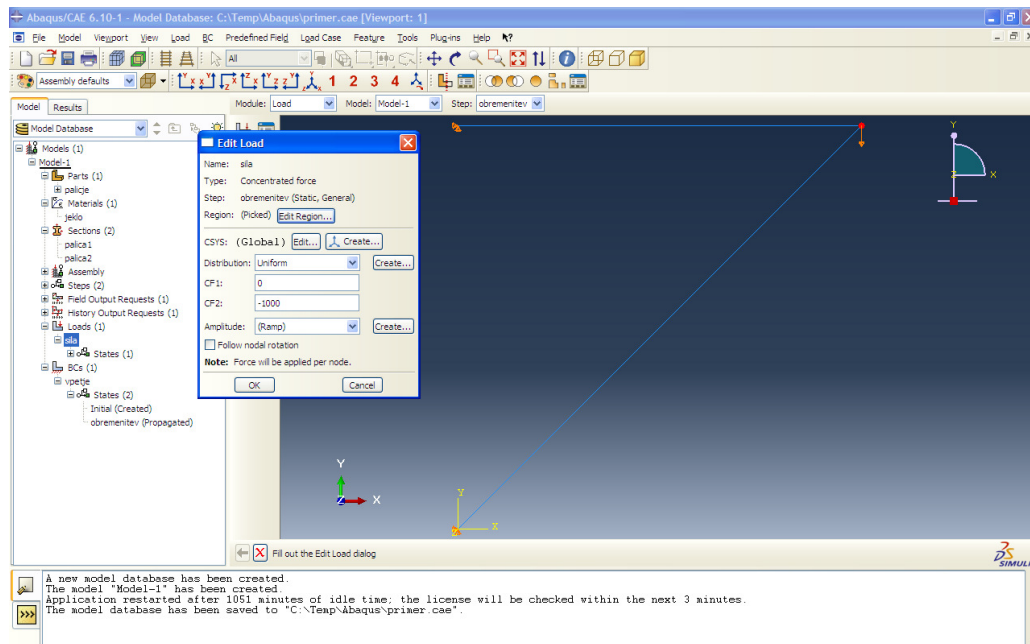
Nato obkljukamo prostostni stopnju U1 (pomik v smeri x) in U2 (pomik v smeri y) in s tem preprečimo pomike v obeh smereh. Potrdimo izbiro.

Za definicijo sile uporabim gumb *Create Load*.



Slika 14: Definiranje sile


Izberem stičišče obeh palic in potrdim izbiro. V meniju definiram komponenti sile ter zaključim z gumbom *OK*.

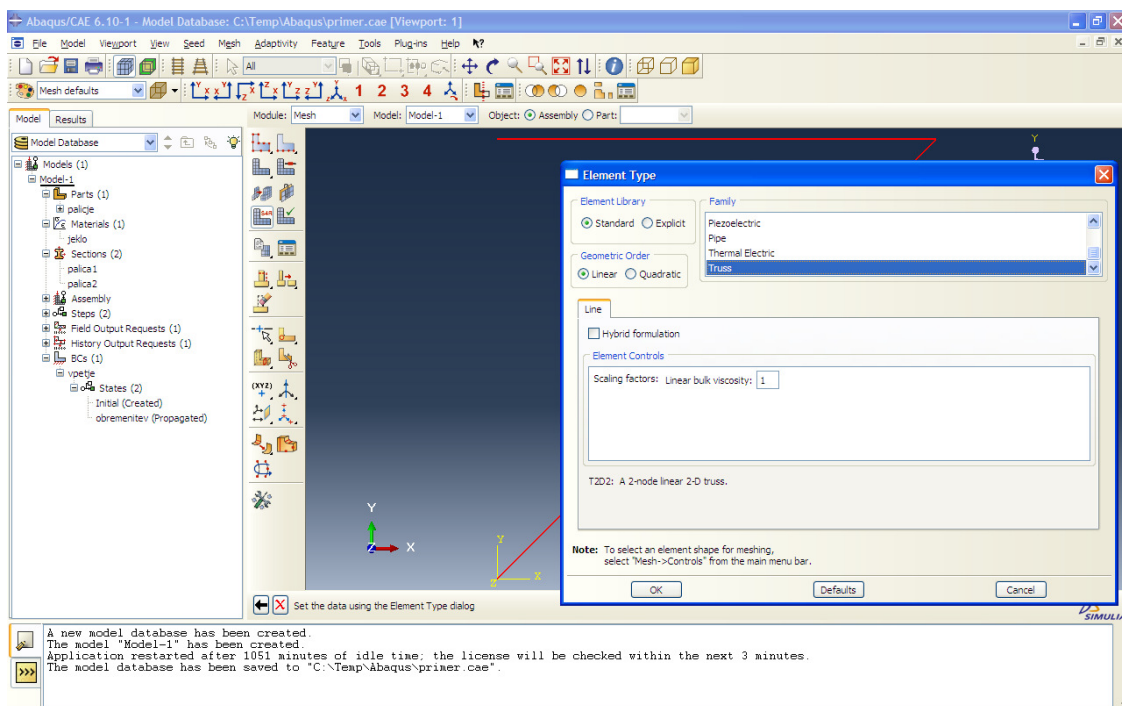


Slika 15: Vpis komponent sile

S tem zaključim definicijo robnega problema.

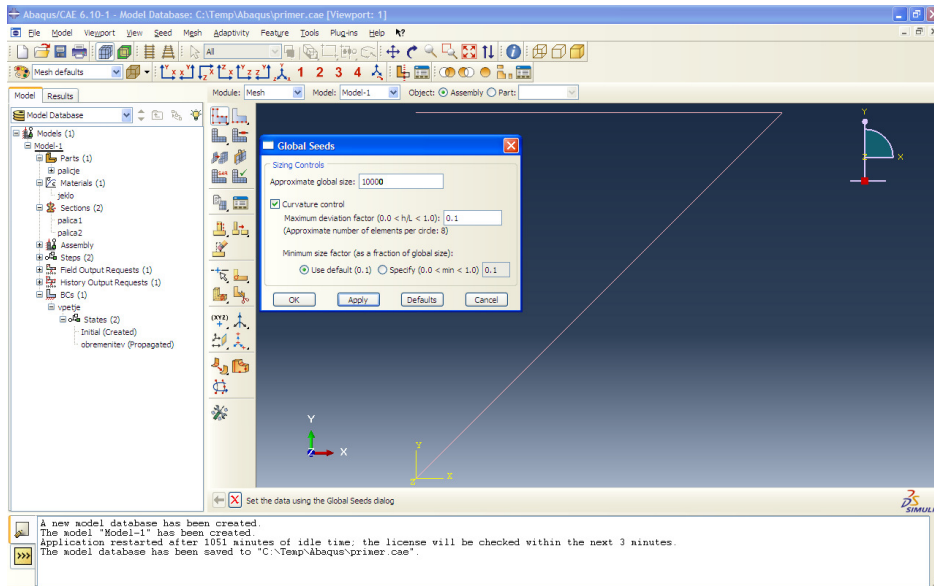
3.7 Mesh

V meniju Mesh območje pomrežimo z ustreznimi končnimi elementi in s tem zaključimo numerični model. Najprej izberemo tip elementa z ukazom Assign Element Type  ter izberemo obe palici. Nato izberemo končni element za Truss in zaključim izbiro z *Ok*.




Slika 16: Izbira tipa končnega elementa

Predno pomrežimo je potrebno na geometrijo postaviti še vozlišča. Z gumbom *Seed Part Instance* pomrežim paličje tako, da za vsako palico vzamem samo en element. Takšen pristop je pri paličju nujno potreben, saj je zaradi nezmožnosti prenašanja momenta med vsakima sosednjima elementoma po definiciji vrinjen členek. Zato kot velikost elementa vpišemo številko, ki je večja od dolžine največje palice in zaključim z gumbom *OK*.

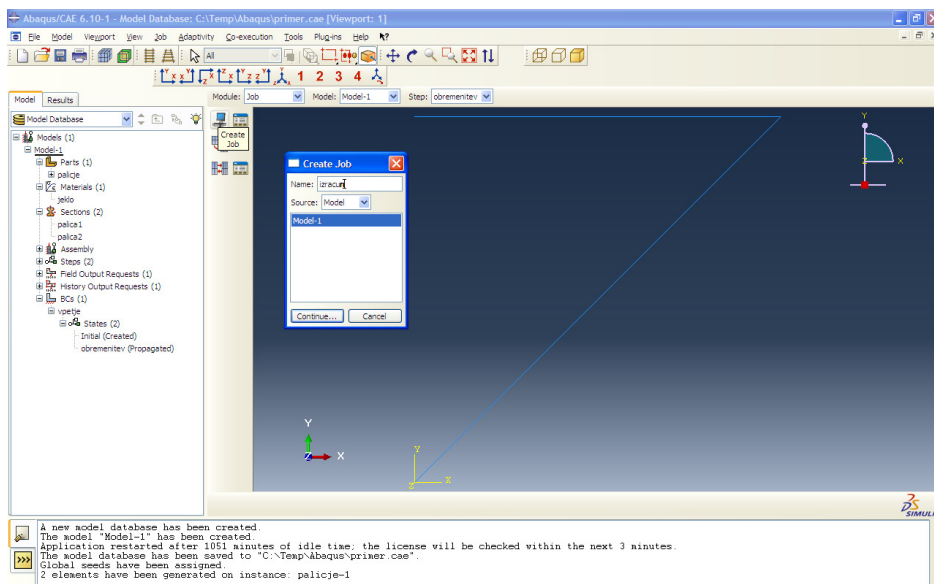


Slika 17: Definiranje semen (vozlišč)

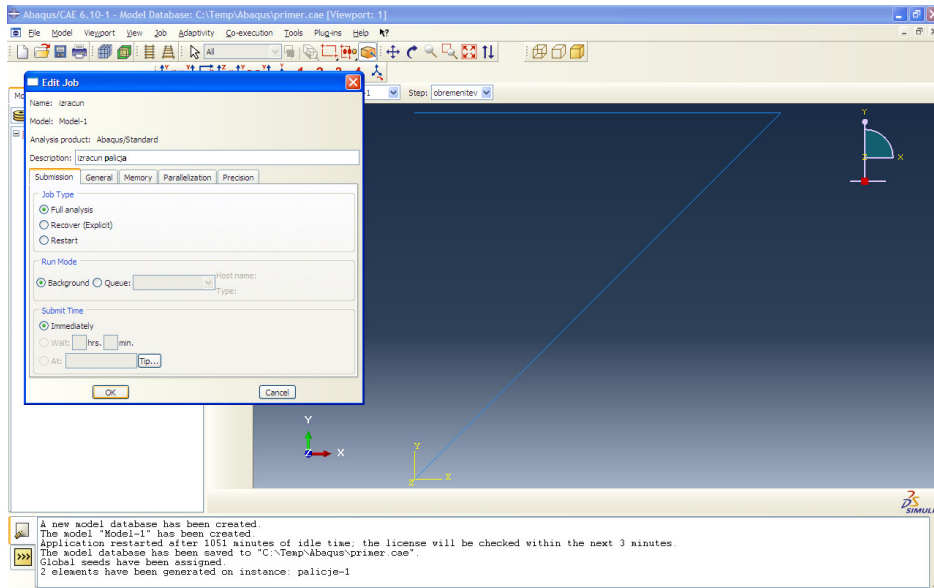
Nato sledi mreženje z gumbom *Mesh Part Instance* , kjer samo potrdim mreženje z gumbom *Yes*. V oknu pod modelom se pojavi napis “2 elements have been generated on instance: palicje-1” in s tem smo zaključili gradnjo modela.

3.8 Job

V modulu Job ustvarimo datoteko za izračun z gumbom *Create job*. Nadaljujem z *Continue...* in *OK*.

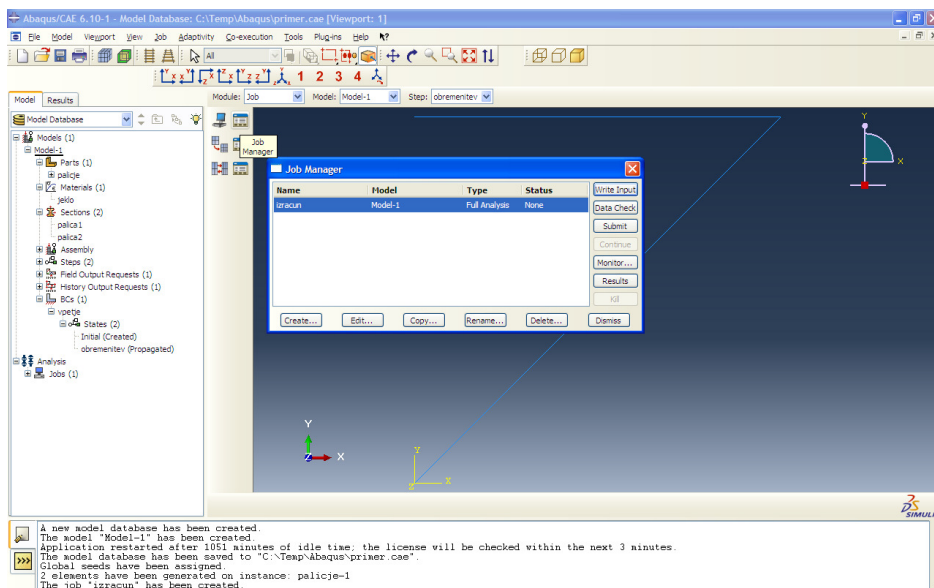


Slika 18: Kreiranje Job-a



Slika 19: Meni pri ustvarjanju Job-a

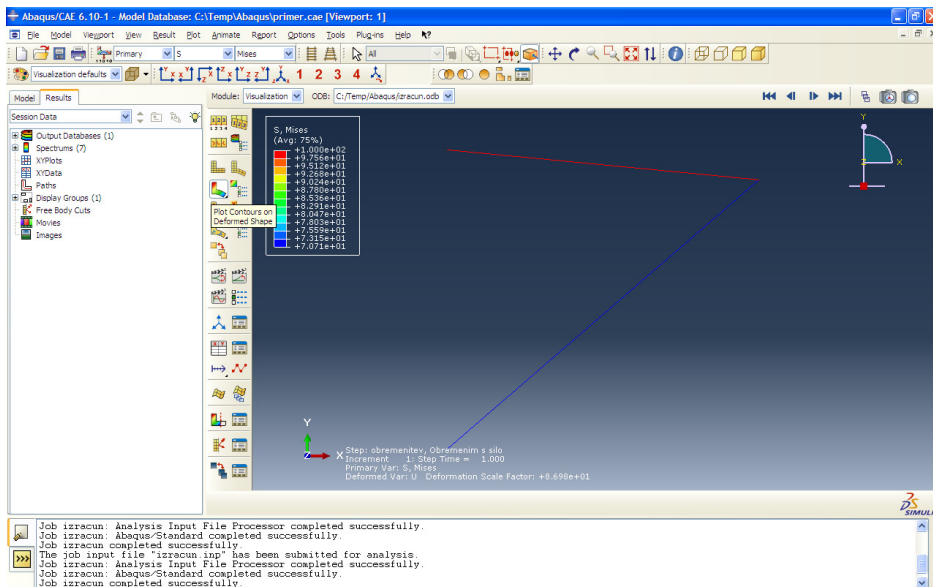
Ko je Job ustvarjen, ga lahko preko menija *Job manager*, ki se nahaja poleg gumba *Create job*, pošljemo v izračun z gumbom *Submit*.



Slika 20: Job manager

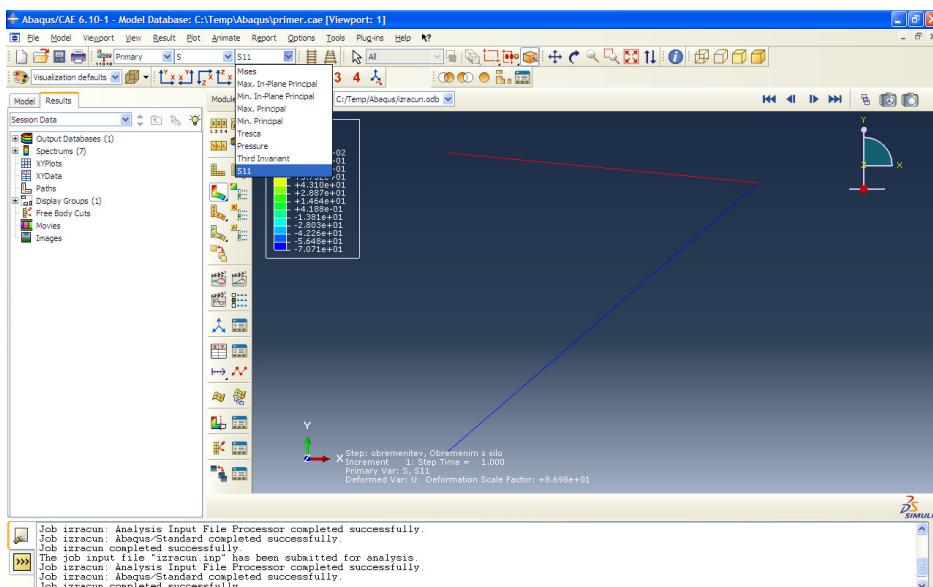
4 Branje rezultatov

Rezultate analize prikažemo tako, da v meniju *Job manager* uporabimo gumb *Results*. Najpogostejši prikaz rezultatov je prikaz "Field" na deformirani geometriji, ki ga vključim z gumbom *Plot Contours on Deformed Shape*.



Slika 21: Prikaz rezultatov

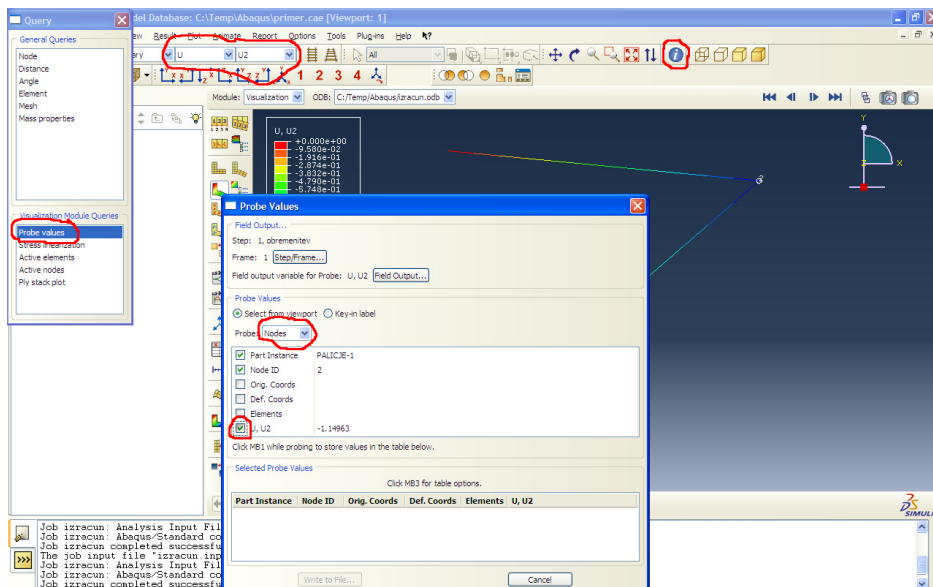
Program nam prikaže Misesovo primerjalno napetost v vsaki palici. V kolikor želimo prikazati osno komponento napetosti, v meniju izberemo S11, kot prikazuje slika.



Slika 22: Prikaz komponente napetosti v osni smeri

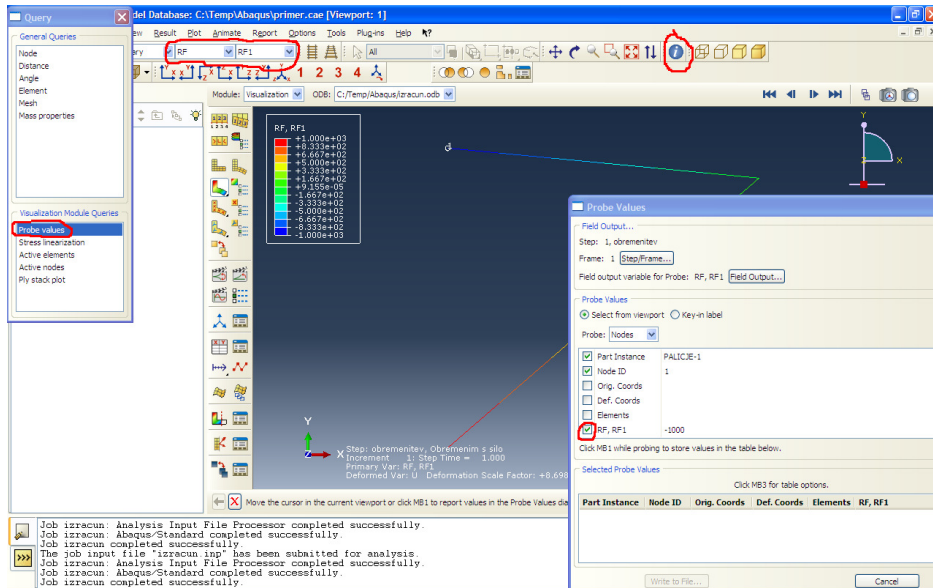
Ugotovimo lahko, da je v horizontalni palici napetost 100 MPa, v poševni palici pa -70.71 MPa. Napetosti program izračuna iz deformacij, le te pa dobi z odvodom polja pomikov v lokalnih koordinatnih sistemih.

V kolikor želimo iz rezultatov razbrati pomike paličja v smeri x in y, izberemo kot prikaz veličin U in $U1$ oziroma $U2$. Za natančnejšo analizo pomika pod silo lahko uporabimo gumb *Query*, izberemo *Probe values*, *Nodes* in obkljukamo $U2$ (na sliki). Nato lahko z miško potujemo po vozliščih. V vozlišču pod silo razberemo vertikalni pomik -1.4963 mm, kot prikazuje slika. Pomike v vozliščih program pridobi kot neznanke sistema enačb.



Slika 23: Branje rezultatov z ukazom Query

Reakcije v podporah lahko razberemo če za prikaz izberemo spremenljivko RF in RF1 za smer x, RF2 pa za smer y. Nato pa z ukazom *Query* odčitamo natančne vrednosti reakcij v vozliščih, ki so vpeta, kot prikazuje slika.



Slika 24: Izpis reakcij v podporah

Ugotovimo lahko, da je vrednost reakcije v zgornjem členku v x smeri enaka -1000 N. Na enak način razberemo še druge reakcije v podporah. Tako smo s programskim paketom Abaqus odgovorili na vsa vprašanja, ki so postavljena v definiciji naloge.