

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Klemenčič, T., 2013. Analiza obnašanja leseno steklenega panela pri horizontalni obtežbi. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Brank, B., somentor Ber, B.): 28 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Klemenčič, T., 2013. Analiza obnašanja leseno steklenega panela pri horizontalni obtežbi. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Brank, B., co-supervisor Ber, B.): 28 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo

Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
Telefon (01) 47 68 500
Faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si



**PRVOSTOPENJSKI
ŠTUDIJSKI PROGRAM
GRADBENIŠTVO (UN)**

**MODUL
KONSTRUKCIJE**

Kandidat:

TONI KLEMENČIČ

**ANALIZA OBNAŠANJA LESENO STEKLENEGA PANELA PRI
HORIZONTALNI OBTEŽBI**

Diplomska naloga št.: 25/B-GR

**ANALYSIS OF A TIMBER-GLASS PANEL BEHAVIOUR AT
HORIZONTAL LOADINGS**

Graduation thesis No.: 25/B-GR

Mentor:

prof. dr. Boštjan Brank

Somentor:

u.d.i.g., Boštjan Ber

Predsednik komisije:

Izr. prof. dr. Janko Logar

Ljubljana, 16. 07. 2013

Izjava o avtorstvu

Podpisan Toni Klemenčič izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Analiza obnašanja leseno steklenega stenastega montažnega elementa«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 5.5.2013

Toni Klemenčič

Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček

UDK:	519.63:624.042(043.2)
Avtor:	Toni Klemenčič
Mentor:	prof. dr. Boštjan Brank
Somentor:	Boštjan Ber, u.d.i.g.
Naslov:	Analiza obnašanja leseno steklenega panela pri horizontalni obtežbi
Obseg in oprema:	28 str., 34 sl., 4 tab., 9 graf.
Ključne besede:	metoda končnih elementov, leseno stekleni paneli, horizontalna sila

Izvleček

V diplomski nalogi smo simulirali laboratorijski preskus na leseno steklenem montažnem stenastem konstrukcijskem elementu (ki ga v nadaljevanju imenujemo panel), proizvajalca Kager Hiša d.o.o., ki so ga izvedli na Fakulteti za gradbeništvo Univerze v Mariboru. Simulacijo smo izvedli z nelinearno metodo končnih elementov s pomočjo računalniškega programa Abaqus. Uporabili smo prostorske (3d) končne elemente za trdno telo. Ugotavljali smo, kakšen je primeren tip končnega elementa in kakšna je primerna mreža končnih elementov za uspešno numerično analizo obravnavanega panela. Poseben poudarek je bil na izbiri ustreznega materialnega modela za vezivo med steklom in lesom, ki je tanek sloj silikona. Iz Abaqusove knjižnice materialnih modelov smo izbrali skoraj nestisljiv Arruda-Boyce hiper elastični materialni model. Na koncu smo skušali čim boljše modelirati pogoje podpiranja in obremenjevanja panela med laboratorijskim preskusom. Rezultati naših analiz smo primerjali z rezultati preskusov.

Bibliographic-documentalistic information and abstract

UDK: 519.63:624.042(043.2)

Author: Toni Klemenčič

Supervisor: prof. Boštjan Brank PhD

Co-supervisor: Boštjan Ber, B.Sc.

Title: Analysis of timber-glass panel behaviour at horizontal loadings

Notes: 28 p., 34 fig., 4 tab., 9 graph.

Keywords: finite element method, wooden-glass panel, horizontal force

Abstract

In my bachelor thesis we simulated laboratory experiment on a prefabricated wooden-glass frame structural element (in short we will name it the panel) fabricated by Kager Hiše d.o.o. The experiment was carried out at the Faculty of Civil Engineering in the University of Maribor. Simulation was conducted with non-linear finite element method on a computer programme Abaqus. We used 3D finite elements for solids. The purpose was to find out the appropriate type of elements and the type of mesh needed to successfully analyse the panel. Special consideration was made on the type of material model that would be suitable as an adhesive between wooden frame and a glass pane. Abaqus library of material models offers a number of material models for hyper elastic materials. We chose nearly incompressible material model Arruda-Boyce. On the end we tried to model the supports and the load of the real model. We compared the results of our analysis with the experiment.

Zahvala

Za nasvete in pomoč pri diplomski se zahvaljujem mentorju prof. dr. Boštjanu Branku.

Posebna zahvala gre očetu in materi, sestri Janji ter Vesni, ki so mi stali ob strani cel čas študija.

Kazalo vsebine

1	Uvod	1
2	Obravnavani leseno stekleni stenasti konstrukcijski element (panel)	2
3	Priprava modela za račun z metodo končnih elementov	4
3.1	Risanje geometrije	4
3.2	Priprava mreže končnih elementov	6
3.3	Uporabljeni končni elementi	8
3.4	Izbrani materialni model za les	9
3.5	Izbrani materialni model za steklo	10
3.6	Izbrani materialni model za silikon	11
4	Izbira primerne mreže končnega elementa in primerne mreže	14
4.1	Način podpiranja	14
4.2	Nanos obtežbe	14
4.3	Mreže končnih elementov za heksaedre	15
4.4	Rezultati analiz s heksaedri pri različnih mrežah in načinih integracije	16
4.5	Rezultati analize s heksaedri pri modificirani geometriji veziva	18
4.6	Primerjava heksaedrov s tetraedri	19
4.7	Vpliv vrste lesa na obnašanje panela	21
4.8	Vpliv stisljivosti veziva na obnašanje panela	21
4.9	Uporaba hibridnih elementov in elementov z nekompatibilnimi oblikami	22
4.10	Najustreznejši model	23
5	Primerjava z eksperimenti	23
5.1	Podpiranje v skladu z eksperimentom	23
7	Zaključki	26
Viri		27

Kazalo slik

Slika 1: leseno stekleni panel med preskusom (fotografija je pridobljena od B. Bera).....	3
Slika 2: Proces analize inženirskega problema z metodo končnih elementov.	4
Slika 3: Postopek ustvarjanja geometrije modela v programu Abaqus.	5
Slika 4: Postopek določitve končnega elementa v programu Abaqus.	7
Slika 5: Določitev vrste in lastnosti končnega elementa.	7
Slika 6: C3D4	8
Slika 7: C3D8R	8
Slika 8: C3D8	8
Slika 9: Tri pravokotne osi, v katerih so pri lesu podane konstante ortotropnega materiala. [6]	10
Slika 10: Podokno za urejanje materialnih lastnosti.	12
Slika 11: Podokno za vnos testnih enoosnih podatkov za material.	12
Slika 12: Skica načina podpiranja.	14
Slika 13: Podokno za vnos sile gravitacije.	15
Slika 14: Podokno za vnos koncentrirane sile.	15
Slika 15: Podokno za urejanje podpor	15
Slika 16: Deformacija veziva v prerezu (M1/P1/S2).	18
Slika 17: Mreža tetraedrov v prerezu v nedeformiranem stanju (M4).....	20
Slika 18: Deformirana oblika detajla mreže M4	20
Slika 19: Slika celotne mreže računskega modela.	24

Kazalo grafikonov

Grafikon 1: Sigma-epsilon diagram za hiperelastičen silikon po modelu Arruda-Boyce.....	13
Grafikon 2: Diagram odziva silikona v primeru striga.	13
Grafikon 3: Primerjava različnih mrež in načinov integracije. Grafikoni prikazujejo vneseno silo 40 kN z lastno težo v odvisnosti od pomika na dnu (vezivo je silikon).	17
Grafikon 4: Odziv panela pri dveh različnih geometrijah silikonskega veziva.	19
Grafikon 5: Primerjava med rezultati tetraedrov ($M^2/K2$) in heksaedrov ($M2/K2$).	21
Grafikon 6: Krivulji sila pomik ($M2/P2$) za macesen in smreko.	21
Grafikon 7: Vpliv Poissonovega količnika na pomike ($M2/P2$).	22
Grafikon 8: Primerjava različnih mrež in načinov integracije s hibridnimi elementi. Krivulje prikazujejo vneseno silo 40 kN z lastno težo v odvisnosti pomika na dnu (vezivo je silikon)	24
Grafikon 9: Primerjava pomikov računskih modelov z eksperimentom.	25

1 Uvod

Veliko arhitektov načrtuje transparentne in prehodne objekte. To pomeni, da je vse več poslovnih objektov in stanovanjskih hiš z velikimi notranjimi prostori z veliko svetlobe. Takšni objekti imajo zastekljene velike površine svojega ovoja. Leseno stekleni montažni stenski elementi večjih dimenzij (imenovani tudi paneli) so lahko dobra arhitektonska rešitev za ta namen. Lahko se uporabijo za zasteklitev celotne zunanje stene. Vendar leseno stekleni paneli še niso del vsakdanje gradbene prakse. Med drugim se pojavlja vprašanje njihovega delovanja pri prenašanju različnih zunanjih vplivov (obtežb). Obnašanje steklenih panelov še ni toliko raziskano, da bi lahko bilo njihovo načrtovanje standardizirano. Zato se na njih večkrat izvajajo eksperimenti, z namenom, da se spozna, kako se obnašajo pri različnih obtežbah. Takšni eksperimenti so bili pred kratkim izvedeni tudi na Fakulteti za gradbeništvo Univerze v Mariboru [5]. Določevali so nosilnost in duktilnost leseno steklenih panelov, ki jih izdeluje podjetje Kager Hiše d.o.o. [7], pri obtežbi, ki deluje v ravnini panela.

Namen diplomske naloge je ponoviti nekaj omenjenih eksperimentov z računalniško simulacijo, ki temelji na nelinearni metodi končnih elementov. Pri tem se bomo naučili, kako je treba pripraviti numerični model za takšne konstrukcijske elemente, da bo njihovo obnašanje opisano realistično. V ta namen bomo uporabili komercialni računalniški program Abaqus [12] in naredili model panela s prostorskimi (3d) končnimi elementi za trdno telo. Les bomo modelirali kot ortotropni material, steklo kot izotropen, vezivo med lesom in steklom (silikon oziroma poliuretan) pa kot skoraj nestisljiv hiper elastični material. Upoštevali bomo tudi geometrijsko nelinearnost, saj lahko v takšen konstrukcijskem elementu pride do velikih pomikov preden popusti. Seveda so rezultati numeričnih analiz v celoti odvisni od kvalitete numeričnega modela in vhodnih podatkov. Zato bomo kritično analizirali dobljene rezultate, preden bomo izbrali najprimernejši numerični model, katerega rezultate bomo uporabili za primerjavo z eksperimentom.

2 Obravnavani leseno stekleni stenasti konstrukcijski element (panel)

Geometrija. Geometrija obravnavanega stekleno lesenega stenskega elementa (panela) je prikazana na sliki A1. Gre za panel tipa K2 po oznakah iz [5], ki ima eno samo stekleno ploščo. Panel je trenutno prototip za morebitno uporabo. Podjetje Kager Hiše d.o.o. sodeluje pri razvoju teh panelov. Dimenzije panela so 1250 mm x 2640 mm. Ogrodje panela je lesen okvir (iz smrekovega lesa), sestavljen in dveh daljših pokončnikov in dveh krajših in ožjih vodoravnih elementov. Pokončni in vodoravni leseni element (slednjega bomo imenovali tudi venec) med seboj nista zlepljena, ampak sta povezana z lesenimi vijaki HBS 2x6x160 (slika A10). Stik med pokončnim in vodoravnim elementom torej ni tog. Prerez lesenega okvirja ima L obliko, tako da vanj lahko nalega steklena plošča dimenzij 1100 mm x 2510 mm ter debeline 10 mm. Za vezivo med lesom in steklom je uporabljen silikon, poiluretan ali epoksi. Za dobro vpenjanje stekla v lesen okvir so nameščene robne lesene letvice, ki so privijačene na okvir (slika A2 in A3).

Materiali. Podatke o materialih smo dobili od Fakultete za gradbeništvo Univerze v Mariboru, kjer so načrtovali in izvedli laboratorijske preskuse. Podatki o lesu so podani v preglednici 1, podatki o steklu pa v preglednici 2. Steklo je dobavilo podjetje Reflex d.o.o. [8] Rezultati enosnega nateznega preskusa za silikon (Ködiglaze S) so privzeti od proizvajalca in so podani na sliki A4 (testi so bili izvedeni po standardu DIN 53504).

Preglednica 1: Podatki o lastnostih lesa uporabljenega za lesen okvir [4], [6].

	Trdnostni razred po EN 338:2003	E_1 [N/mm ²]	E_2 [N/mm ²]	E_3 [N/mm ²]	G_{12} [N/mm ²]	G_{13} [N/mm ²]	G_{23} [N/mm ²]	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	ρ [kg/m ³]
smreka	C22	10000	590	1280	1200	1240	100	0,462	0,422	0,255	410
macesen	C30	12000	780	948	828	765	84	0,276	0,355	0,389	460

Preglednica 2: Podatki o uporabljenem steklu [9]

	E [N/mm ²]	ν	ρ [kg/m ³]
Kaljeno steklo EN 12150	70000	0,2	2500

Laboratorijski preskus. Med preskusom je bil panel obrnjen za 90° glede na svojo lego v stavbi, kot je prikazano na sliki 1. Iz slike 1 se vidi, da je bila podpora na zgornjem levem robu izvedena z jeklenima ploščama, ki sta bili s tremi sorniki premera 16 mm pritrjeni na leseni okvir. Skica te podpore je prikazana na sliki A5. Panel je bil podprt še na spodnjem levem robu (glej sliko A6). Prav tako je bil panel podprt na krajšem robu na desni strani in sicer tako, da so bili preprečeni pomiki izven ravnine panela (slika A7). Obtežba, ki je delovala na panel med preskusom je bila lastna teža in sila, ki se je preko hidravličnega bata nanašala v panel na zgornjem desnem robu okvirja (slika A8).

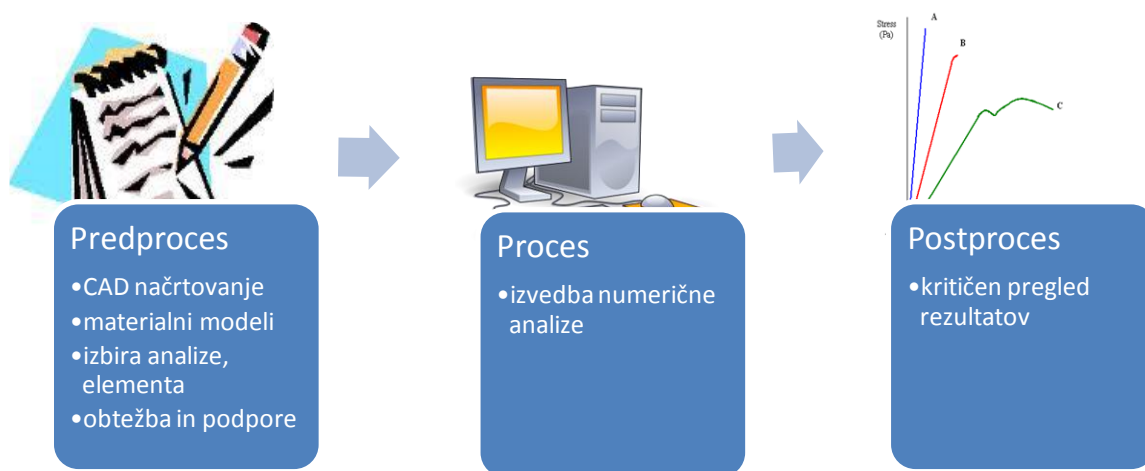
Rezultati preskusov. Na sliki A9 so podani rezultati preskusov za tri panele, ki so imeli za vezivo silikon.. Rezultati so podani v obliki grafikonov, ki kažejo odvisnost med vneseno silo in navpičnim pomikom panela na spodnjem desnem robu.



Slika 1: leseno stekleni panel med preskusom (fotografija je pridobljena od B. Bera)

3 Priprava modela za račun z metodo končnih elementov

V tem poglavju se osredotočamo na pripravo modela za numerično analizo. Pripravimo geometrijski model, določimo materialne modele ter izberemo pravilne končne elemente za izvedbo analize. Spodnja slika prikazuje diagram poteka dela od vhodnih podatkov do analize rezultatov.



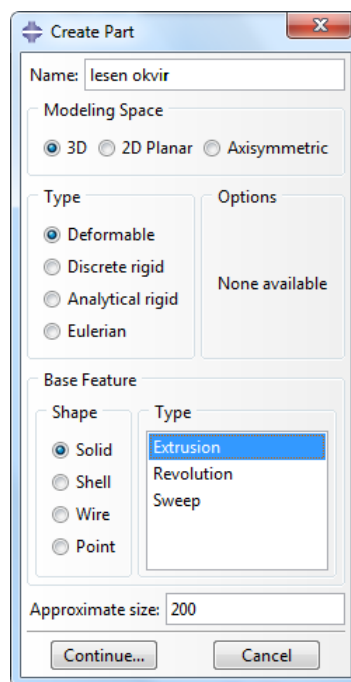
Slika 2: Proces analize inženirskega problema z metodo končnih elementov.

3.1 Risanje geometrije

V programu Abaqus smo pripravili geometrijo panela na podlagi tehničnih risb A1, A2 in A3. Vse dimenzije smo podali v milimetrih (pri podajanju dimenzij je potrebno biti konsistenten ter podajati številke vedno v istih enotah, saj program ne pretvarja enot). Program omogoča prvine CAD modeliranja, vendar smo za naš primer uporabili le vlečenje 2D skice. Za risanje modela uporabimo modul »Part« ter poiščemo ukaz »Create Part« (slika 3). Določimo tip geometrijskega elementa (3D trdno telo), nato zrišemo 2D načrt in posamezen geometrijski element vlečemo do želene globine ter tako dobimo 3D geometrijski element. Geometrijskemu elementu lahko dodamo referenčne točke, črte in ravnine, na katere lahko kasneje prilepimo druge geometrijske elemente ali pa na tem mestu definiramo podporo ali obtežbo. Delujejo kot pomožna geometrijska orodja s katerimi lažje in natančneje definiramo

geometrijski model. Panel smo razdelili na 3 geometrijske dele in sicer na leseni okvir (ki smo ga še dodatno razdelili na dva venca in dva pokončnika), stekleno ploščo ter vezivo (silikon oziroma poliuretan). Vezivo smo modelirali kot kvader prereza 11 mm x 5 mm in takšne globine, da je zapolnil utor na notranji strani okvirja.

Ko narišemo posamezne geometrijske elemente, jih je potrebno še sestaviti skupaj. Za to uporabimo modul »Assembly«, kjer lahko posamezne geometrijske dele premikamo, sukamo in združujemo. V programu imamo lahko naenkrat le en »Assembly«, ki je sestavljen iz geometrijskih delov narisanih v modulu »Part«. Ti deli obstajajo v svojem lokalnem koordinatnem sistemu, nakar jih v modulu »Assembly« združimo v globalnem koordinatnem sistemu. Vse kar delamo od tu naprej se v programu navezuje na »Assembly«, zato je ga je nujno potrebno ustvariti, čeravno imamo samo en del in ni potrebno ničesar zlagati skupaj.



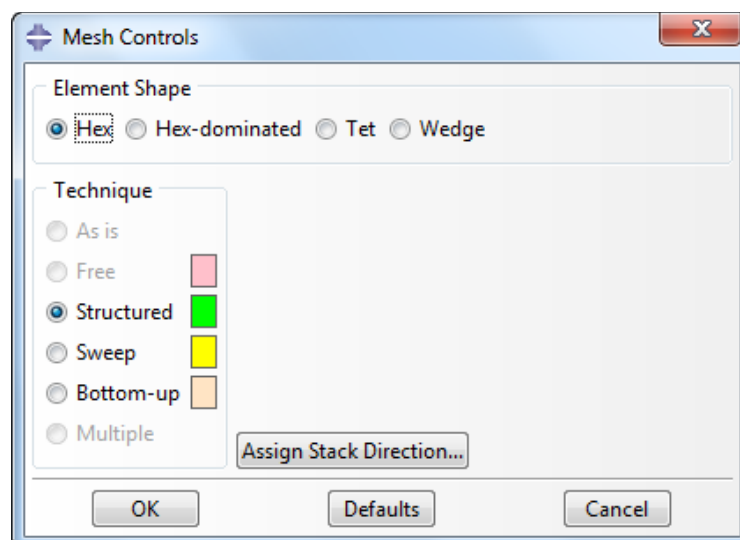
Slika 3: Postopek ustvarjanja geometrije modela v programu Abaqus.

3.2 Priprava mreže končnih elementov

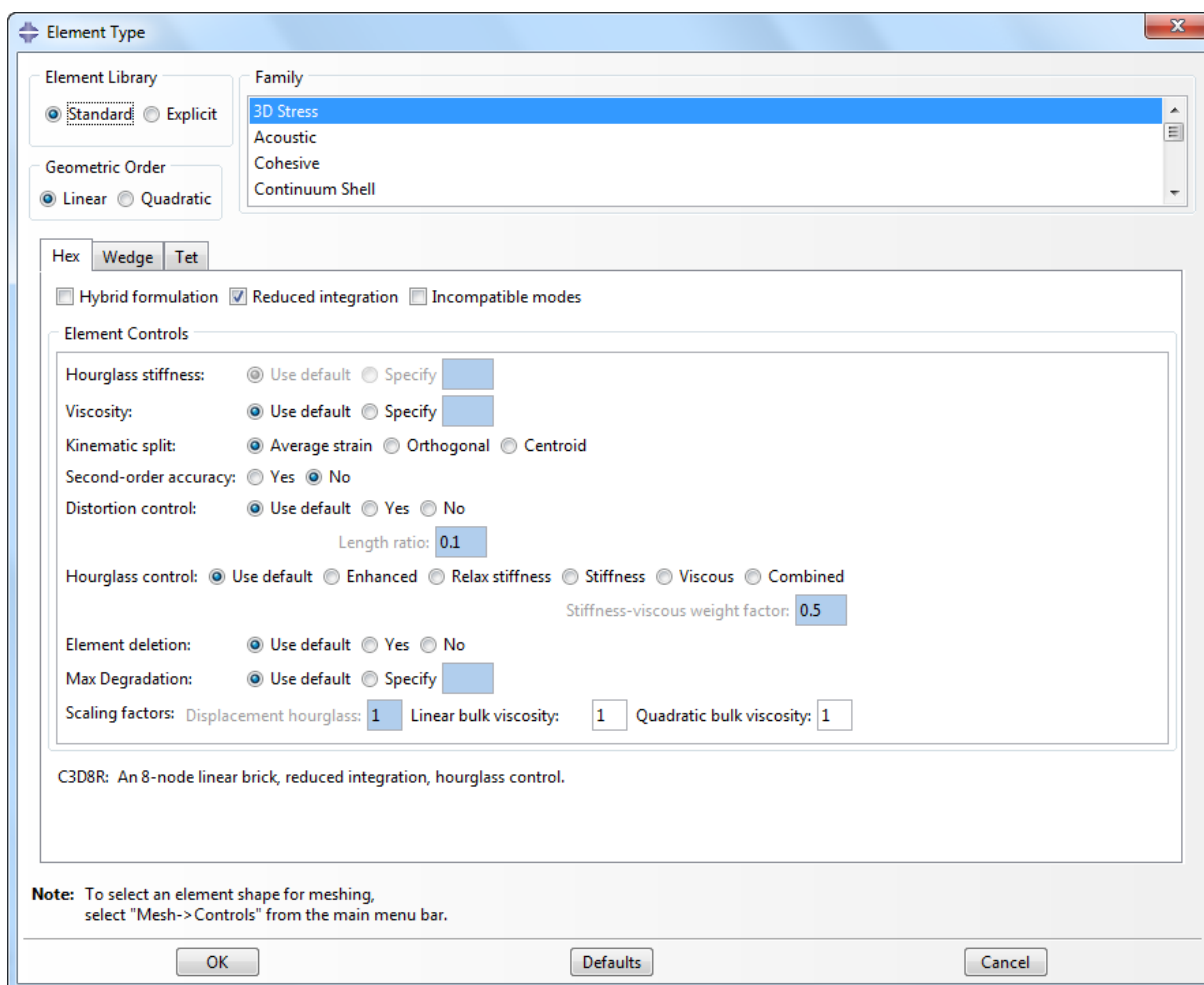
Mrežo končnih elementov, tip končnega elementa ter red numerično integracije izbiramo v modulu »Mesh«. V tem modulu lahko določamo:

- *Gostoto mreže na globalni in na lokalni ravni.* Določimo približno velikost enega končnega elementa, nato pa program avtomatsko razporedi končne elemente želene velikosti po celem območju. Gostoto mreže je možno tudi lokalno gostiti ali redčiti z lokalno uravnavo velikosti elementov.
- *Različne tehnike mreženja.* Lahko imamo mrežo z enim tipom končnega elementa ali pa uporabimo več različnih tipov. V veliki meri je tehnika mreženja odvisna od geometrije modela.
- *Orodja za zgoščevanje in izboljšanje mreže.* Program omogoča uvedbo pravil popravljanja mreže, t.i. »Remesh Rule«, ki jih lahko določimo tako, da program spreminja gostoto mreže na želeni lokaciji skozi potek analize. Sem lahko štejemo tudi uvedbo razdelkov, kar omogoča razčlenjevanje kompleksne geometrije na enostavnejše dele, ki jih je potem mogoče zamrežiti.
- *Orodje za preverjanje kvalitete mreže.* Pove nam koliko elementov je popačenih, t.j. nepravilnih oblik.

V modulu »Mesh« najdemo ukaze za urejanje mreže končnih elementov. Najprej izberemo tehniko ustvarjanja mreže, ki je na voljo pod ukazom »Mesh Controls«, glej sliko 4. Za naš primer smo izbrali strukturirano mrežo heksaedrov, ki pride v poštev le v primeru enostavne geometrije modela, ki pa jo lahko ustvarimo z uvedbo razdelkov ali z ostalimi orodji za urejanje geometrije modela. Sledi izbira tipa končnega elementa, kjer izbiramo med linearno ali kvadratično interpolacijo ter polno ali reducirano integracijo. Ob tipih končnih elementov so ponujeni še različni dodatki k analizi, kot je pripomoček za uravnavo popačenosti elementov. Ukaz za določanje lastnosti končnega elementa najdemo prav tako v modulu »Mesh« pod »Element Type« (slika 5).



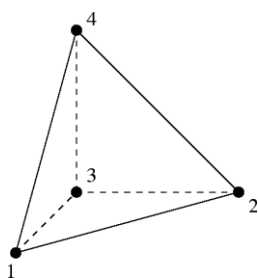
Slika 4: Postopek določitve končnega elementa v programu Abaqus.



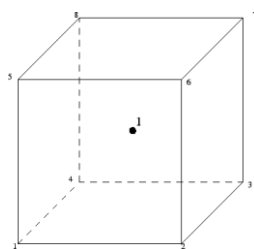
Slika 5: Določitev vrste in lastnosti končnega elementa.

3.3 Uporabljeni končni elementi

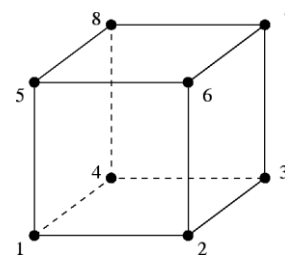
Program Abaqus ponuja vrsto različnih končnih elementov. Pri našem delu smo se omejili na družino prostorskih (3d) končnih elementov. Po obliki smo lahko izbirali med heksaedri ter tetraedri. Mreža heksaedrov omogoča krajši čas računanja. Tetraedri so se izkazali za uporabnejše pri kompleksnejši geometriji, saj so manj občutljivi na popačenje oblike končnega elementa. Heksaedri težijo k ohranjanju pravilnih kotov, ki pa jih ni vedno mogoče izpeljati, še posebej, če imamo grobo mrežo, ki se težko prilagaja nepravilnim oblikam modela. V takem primeru prihaja do pretirane popačenosti elementov. Z pravilno izbiro zgoraj omenjenih orodij za pripravo mreže končnih elementov, se je mogoče izogniti popačenim oblikam. Pri našem modelu smo se odločili za uporabo razčlenjevanja modela na mestih, kjer je program pokazal koncentracijo nepravilnih oblik elementov. Pogosto se je pojavil problem na in v okolici veziva, ker so dimenzije veziva zelo majhne v primerjavi z okvirjem in stekleno ploščo. Pri prvih mrežah M2 ter M3, ki smo ju naredili, je program ocenil, da je približno 25% vseh elementov popačenih. Z razčlenjevanjem silikonskega traka in okolice smo uspeli zmanjšati izkrivljenost na manj kot 1% vseh elementov. Analizo smo izvedli z heksaedri in z tetraedri. Poleg različnih oblik končnih elementov smo uporabili tudi različne integracije (polno oziroma reducirano integracijo) ter različne formulacije (hibridno in z nekompatibilnimi oblikami). C3D8R (slika 7) je oznaka 3d končnega elementa z osmimi vozlišči (heksaeder) in eno integracijsko točko na sredini telesa, ki se uporablja pri reducirani integraciji. C3D8 (slika 8) je oznaka 3d končnega elementa z osmimi vozlišči (heksaeder), ki uporablja polno integracijo. C3D4 (slika 6) je 3d končni element s štirimi vozlišči (tetraeder), ki uporablja polno integracijo.



Slika 6: C3D4



Slika 7: C3D8R



Slika 8: C3D8

3.4 Izbrani materialni model za les

Les lahko opišemo kot elastično ortotropni material, kar pomeni da ima neodvisne mehanske lastnosti v treh pravokotnih oseh (slika 10). Longitudinalna os je paralelna z smerjo vlaken. Radialna os je pravokotna na rastne obroče ter obenem pravokotna na smer vlaken. Tangencialna os je tangenta na rastne obroče ter pravokotna na smer vlaken. Potrebni je 9 neodvisnih elastičnih konstant (ki jih je potrebno dobiti z eksperimenti), da opišemo elastične značilnosti lesa [6]. Potrebujemo tri module elastičnosti, tri strižne module in tri Poissonove količnike. V preglednici 3 je podanih vseh 9 neodvisnih elastičnih konstant za smreko kvalitete C22 in macesen kvalitete C30 [4],[6].

Preglednica 3: Mehanske lastnosti smreke ter macesna [4], [6].

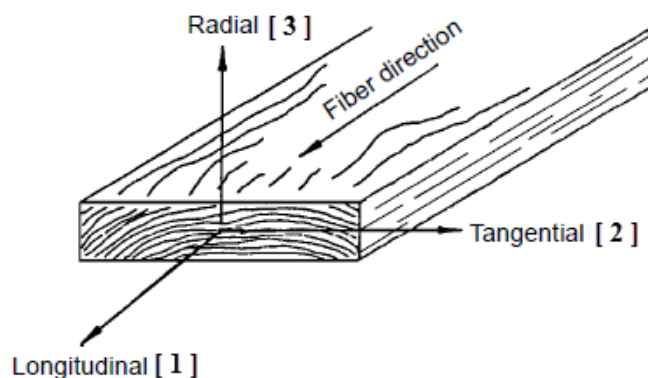
	Trdnostni razred po EN 338:2003	E_1 [N/mm ²]	E_2 [N/mm ²]	E_3 [N/mm ²]	G_{12} [N/mm ²]	G_{13} [N/mm ²]	G_{23} [N/mm ²]	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	ρ [kg/m ³]
smreka	C22	10000	590	1280	1200	1240	100	0,462	0,422	0,255	410
macesen	C30	12000	780	948	828	765	84	0,276	0,355	0,389	460

Pri ortotropnih materialih se odnos med napetostmi in deformacijami predstavi v sledeči obliki:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (2)$$

kjer velja:

$$\frac{\nu_{21}}{E_2} = \frac{\nu_{12}}{E_1}; \quad \frac{\nu_{32}}{E_3} = \frac{\nu_{23}}{E_2}; \quad \frac{\nu_{31}}{E_3} = \frac{\nu_{13}}{E_1} \quad (3)$$



Slika 9: Tri pravokotne osi, v katerih so pri lesu podane konstante ortotropnega materiala. [6]

Materialne lastnosti v Abaqusu vnašamo v modulu »Property« ter tam ustvarimo nov material. Anizotropne lastnosti materiala vnašamo tako, da za materialne lastnosti izberemo ukaz »Engineering constants«, ki ga najdemo v urejevalniku materialov pod anizotropnimi materiali, ter v program vnesemo tri module elastičnosti, tri strižne module ter Poissonove količnike podane v tabeli 3. Ortotropna narava lesa pomeni, da smo morali določiti smer vlaken v okvirju, da se bo model obnašal pravilno v določeni koordinatni smeri. To storimo tako, da uvedemo lokalni koordinatni sistem posebej za pokončnika in posebej za venca. Postavitev lokalnega koordinatnega sistema je razvidna iz slike 10. V tem istem modulu poiščemo ukaz za določitev orientacije materiala ter s pomočjo tega ukaza določimo orientacije v smislu že vnaprej ustvarjenih lokalnih koordinatnih sistemih.

3.5 Izbrani materialni model za steklo

Steklo je izotropen elastičen material, kar pomeni da ima enake mehanske lastnosti v vseh smereh ter da se, ko ga razbremenimo, povrne v svoje prvotno stanje. Velja za krhek material, torej ko presežemo največjo normalno napetost, ki jo material še prenese, pride do nenadne porušitve. Pri pojavu prve razpoke, se ta z veliko hitrostjo razširi po celotni površini steklene ploskve. Steklo prenese velike tlačne napetosti, vendar pa slabo prenaša natezne napetosti. Pri

panelu, ki ga obravnavamo, je bilo uporabljeno kaljeno steklo, tabela 4 (s procesom kaljenja zmanjšamo velikost in število lomov na površini steklene ploskve).

Lastnosti materiala prav tako vnašamo kot smo to storili pri lesu, le da izberemo izotropen elastičen materialni značaj ter vnesemo konstante podane v preglednica 4.

Preglednica 4: Mehanske lastnosti stekla [9]

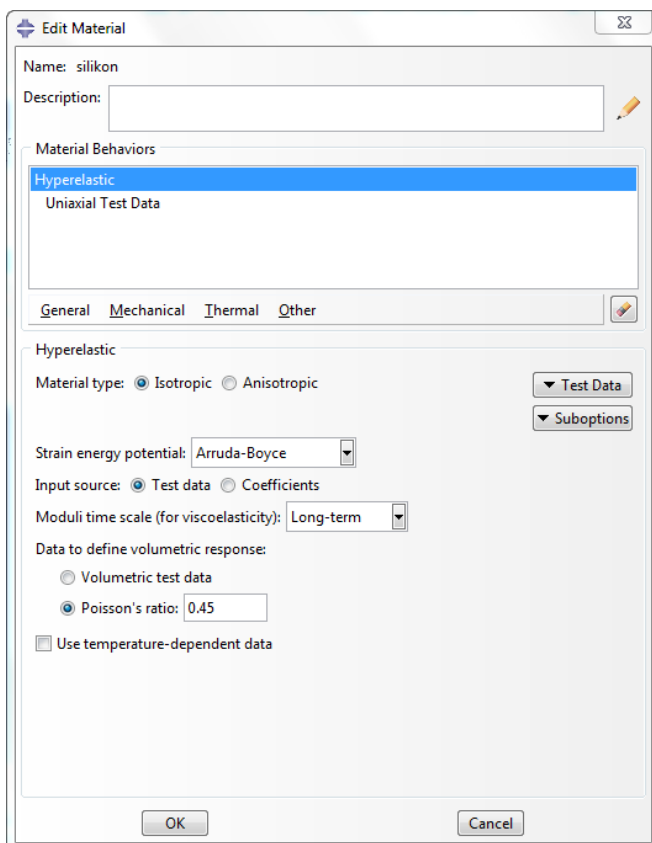
	E [N/mm ²]	ν	ρ [kg/m ³]
Kaljeno steklo EN 12150	70000	0,2	2500

3.6. Izbrani materialni model za silikon

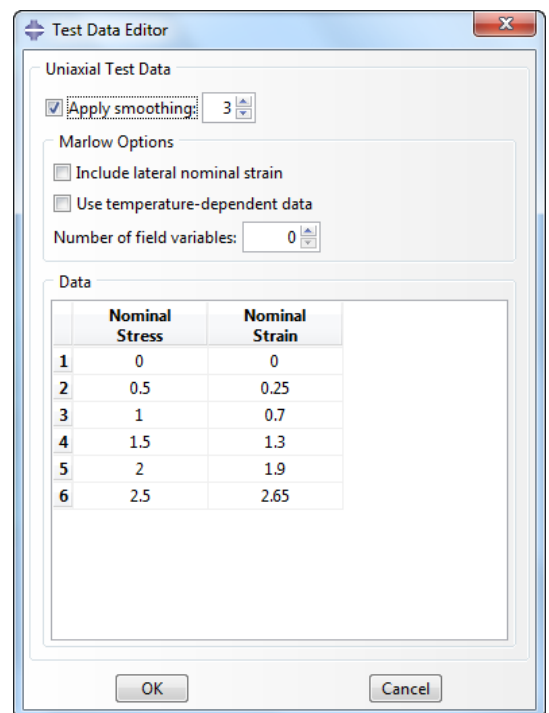
Za vezivo med stekleno ploščo in lesenem okvirjem je bil uporabljen silikon. Prednosti silikonov v primerjavi z drugimi vezivi je njihova odpornost na vremenske vplive: so odporni na vlago, kemikalije, oksidacijo in vročo vodo. Njihova hiper elastična narava nam omogoča, da jih lahko raztegujemo, tlačimo ali udarjamo, vendar se bodo (skoraj povsem) vrnil nazaj v svoje prvotno stanje.

V programu Abaqus smo uporabili materialni model Arruda-Boyce za približek obnašanja silikona. Model Arruda-Boyce se uporablja za opisovanje hiper elastičnih materialov, kot so gume in podobni polimerni materiali. V program smo vnesli podatke enoosnega nateznega preizkusa (to so bili edini materialni podatki, ki smo jih imeli na voljo), program pa nam je na podlagi teh podatkov izračunal konstante Arruda-Boyce modela (vrednosti konstant so: $D=0,19623482$; $\lambda_m=11510,3204$; $\mu_o=0,412787098$; $\mu=0,412787096$). Ta model smo izbrali zato, ker je bil izmed vseh ostalih, ki so v Abaqusu na voljo, edini stabilen za vnesene podatke. Stabilen pomeni, da v vsakem primeru pri pozitivnem prirastku deformacij dobimo pozitiven prirastek napetosti (oziroma pri negativnem prirastku deformacij negativen prirastek napetosti).

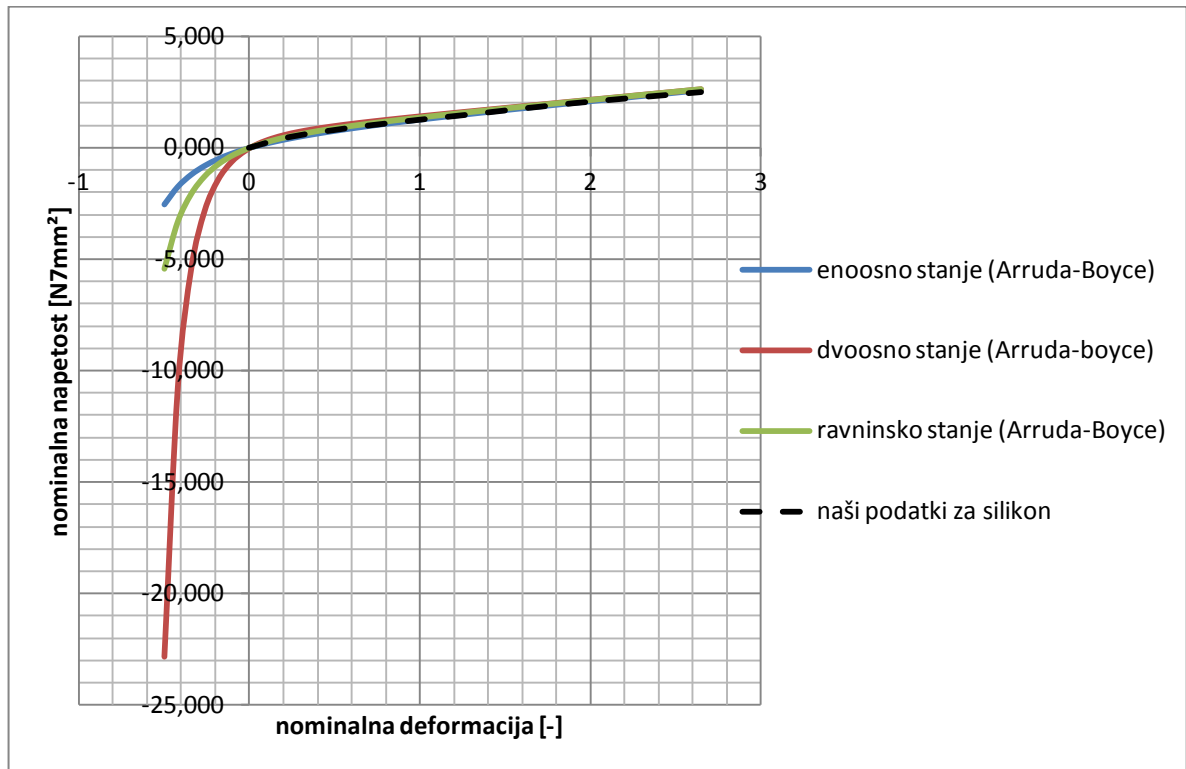
Ukaze za urejanje materialnih lastnosti najdemo pod modulom »Property«. Izberemo » Create Material«, odkljukamo hiper elastično snov ter vnesemo naše podatke o materialu. Del postopka je razviden iz slik 10 in 11. Grafikon 1 in grafikon 2 prikazujeta obnašanje silikona po materialnem modelu Arruda-Boyce. Iz grafov je razvidno, da vneseni testni podatki lepo sovpadajo z aproksimacijo modela.



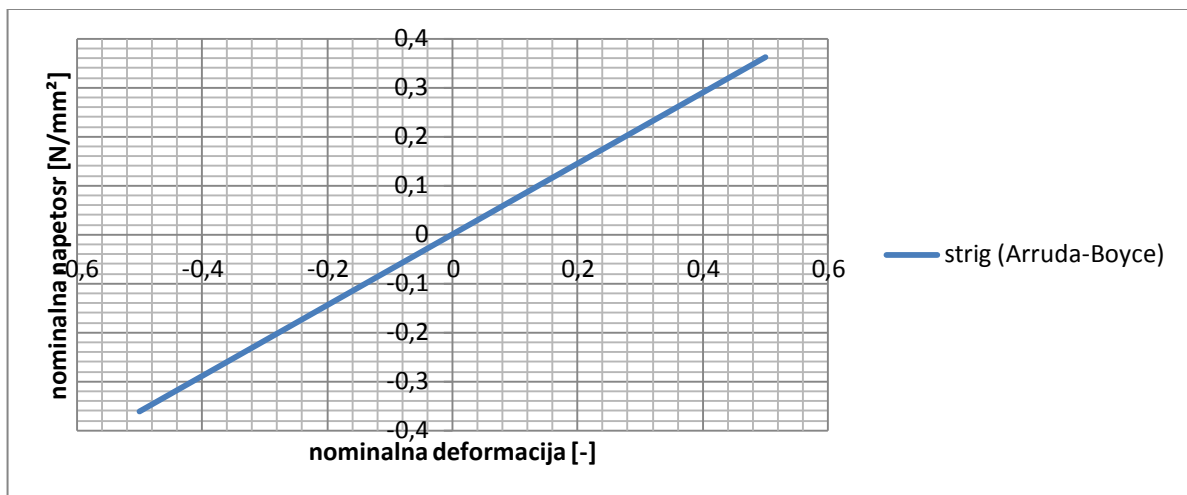
Slika 10: Podokno za urejanje materialnih lastnosti.



Slika 11: Podokno za vnos testnih enosnih podatkov za material.



Grafikon 1: Sigma-epsilon diagram za hiperelastičen silikon po modelu Arruda-Boyce.

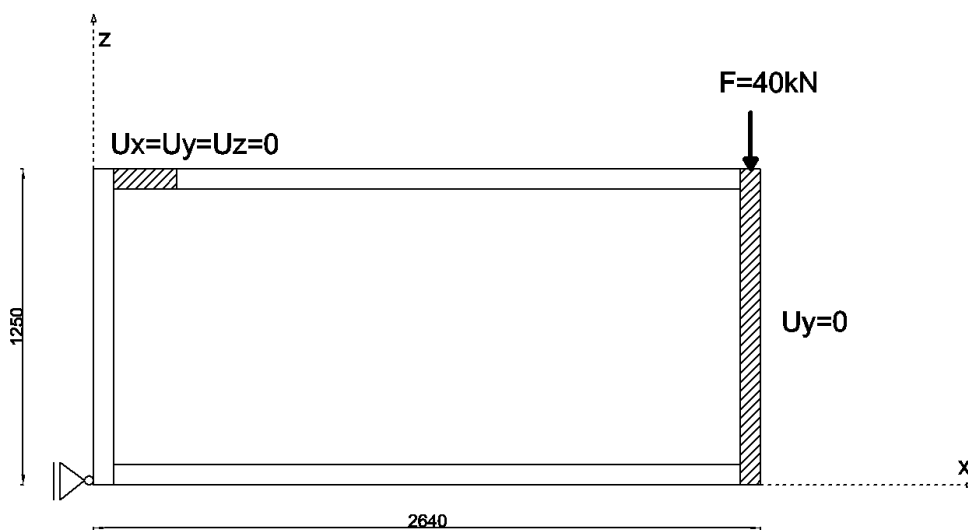


Grafikon 2: Diagram odziva silikona v primeru striga.

4 Izbira primernega končnega elementa in primerne mreže

4.1 Način podpiranja

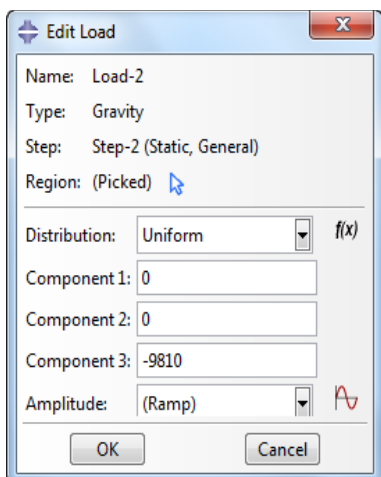
Za namen izbire primernega končnega elementa in primerne mreže končnih elementov smo panel podprli le približno tako, kot je bil podprt med laboratorijskim preskusom. Podprli smo ga na treh mestih (slika 12). Za prvo podporo smo na zgornjem levem delu okvirja preprečili pomike v x , y in z smeri. Drugo podporo smo določili na celi ploskvi desne krajše stranice okvirja (preprečili smo pomik v smeri y oziroma pomik izven ravnine panela). S tretjo podporo smo preprečili pomike v x smeri na majhni ploskvi na spodnjem delu okvirja.



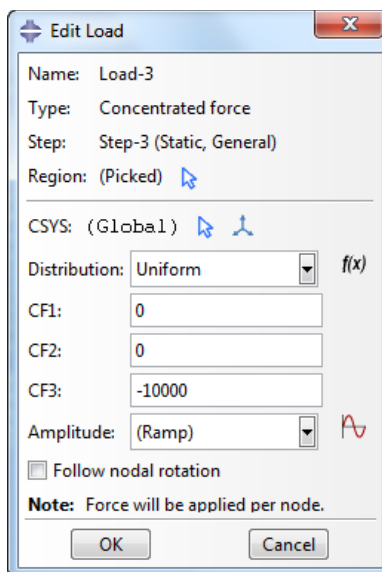
Slika 12: Skica načina podpiranja.

4.2 Nanos obtežbe

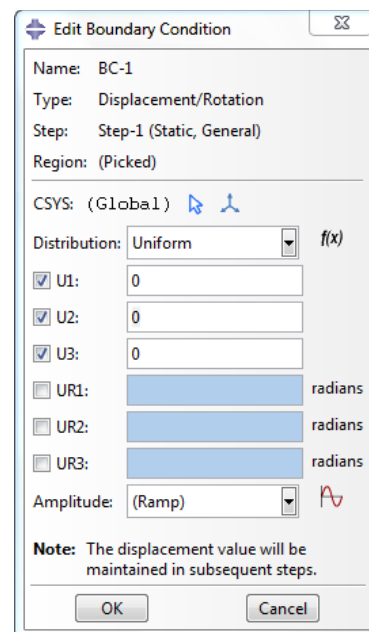
Poleg lastne teže smo nanegli še koncentrirano silo na ploskvi 90 mm x 80 mm na zgornjem delu okvirja. Obtežbo smo razdelili na dva koraka, in sicer smo sprva nanegli le lastno težo (v negativni smeri z) ter s tem zaključili prvi korak analize. Sledil je drugi korak z nanosom koncentrirane sile. Silo smo nanašali postopoma do vrednosti 40 kN. Tukaj je program sam izbral velikost posameznega inkrementalnega nanosa sile glede na obnašanje modela med analizo (dovolili smo maksimalno 100 inkrementov). Prevelika inkrementalna sila lahko povzroči prekinitev analize, zato program med analizo po potrebi zvišuje ali znižuje vrednost inkrementalne sile.



Slika 13: Podokno za vnos sile gravitacije.



Slika 14: Podokno za vnos koncentrirane sile.



Slika 15: Podokno za urejanje podpor

Iz slik 13 do 15 je razviden postopek določevanja nanosa obtežbe ter podpor v programu. Ukaze najdemo pod modulom »Load«. Pri določanju lastne teže je potrebno določiti gravitacijski pospešek, vendar pa moramo paziti, da že prej vnesemo gostoto materiala za izračun mase. Gravitacijski pospešek vnesemo z enakimi enotami kot smo jih doslej uporabljali, torej v našem primeru $g=9810 \text{ mm/s}^2$. Koncentrirano silo 40 kN naneseemo v model preko 4 bližnjih točk, da ne pride do prevelikih napetosti na majhni površini okoli točkovne sile. Iz slike 14 je razvidno, da smo vnesli na eno točko silo 10000 N. Slika 16 nam kaže robne pogoje na površini okvirja, ki ji omejimo gibanje v vseh treh smereh.

4.3. Mreže končnih elementov za heksaedre

Uporabili smo naslednje tri mreže končnih elementov za heksaedre:

M1 (mreža 1) - 3 končni elementi po prerezu veziva (1 po debelini) slika B1 in B5.

M2 (mreža 2) - 8 končnih elementov po prerezu veziva (2 po debelini), slika B2.

M3 (mreža 3) - 16 končnih elementov po prerezu veziva (4 po debelini), slika B3.

Najmanj popačenih elementov dobimo pri mreži M3, ker je ta najbolj zgoščena v silikonu ter njegovi okolici. Še vedno se pojavi nekaj popačenih elementov na vogalih na stiku med lesenim okvirjem ter lepilom.

Uporabili smo naslednja reda numeričnih integracij:

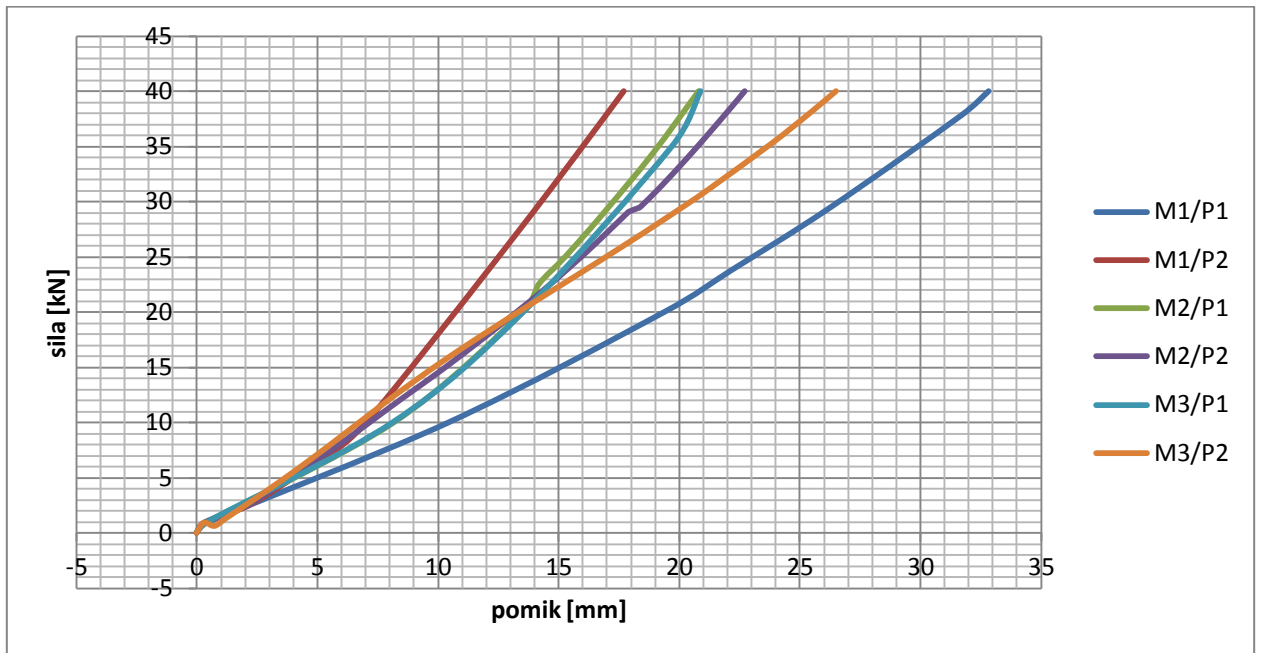
P1-reducirana integracija - vsak končni element ima le eno integracijsko točko.

P2- polna integracija - vsak končni element ima optimalno število integracijskih točk.

4.4. Rezultati analiz s heksaedri pri različnih mrežah in načinih integracije

Na grafikonu 3 so prikazane krivulje, ki prikazujejo odvisnost pomika na dnu od nanesene sile. Na vseh spodnjih krivuljah na Grafikonu 3 so bili uporabljeni končni elementi v obliki heksaedra. Razlika med rezultati je zelo velika. Vse analize so bile izvedene za silikonsko vezivo.

Pri reducirani integraciji P1 z mrežo M1 so največji pomiki. Opazimo, da ima izbira tipa integracije zelo velik vpliv pri M1. Pomik 17 mm, ki ga dobimo pri polni integraciji, skoči na 33 mm pri uporabi reducirane integracije (model je pri polni integraciji veliko bolj tog kot pri reducirani). Rezultati med P1 in P2 odstopajo tudi pri mrežah M2 in M3, čeprav je razlika mnogo manjša kot pri M1. V tabeli 5 smo primerjali analize časovno. Pri grobi mreži končnih elementov imamo manj elementov in zato prej hitrejša analize. Najkrajši čas analize dobimo pri mreži M1 z reducirano integracijo P1. V prilogi C so podane slike mrež v okolici silikona v deformirani legi za vse tri mreže v kombinaciji z obeh integracijah.



Grafikon 3: Primerjava različnih mrež in načinov integracije. Grafikoni prikazujejo vneseno silo 40 kN z lastno težo v odvisnosti od pomika na dnu (vezivo je silikon).

Tabela 5: Preglednica števila končnih elementov v prerezu silikona v odvisnosti od izbire integracije.

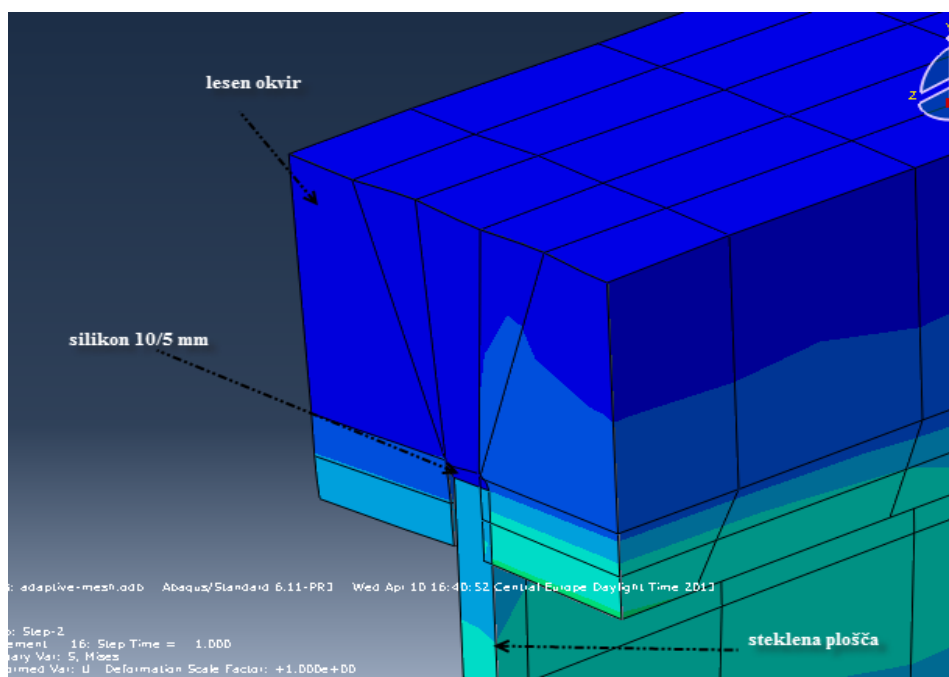
	M1	M2	M3
P1	40 s Kratek čas računanja; največji pomik	2 min	10 min *najdaljši čas med reduciranimi integracijami
P2	2 min *najmanjši pomik	15 min	25 min *najdaljši čas računanja

Čas računanja

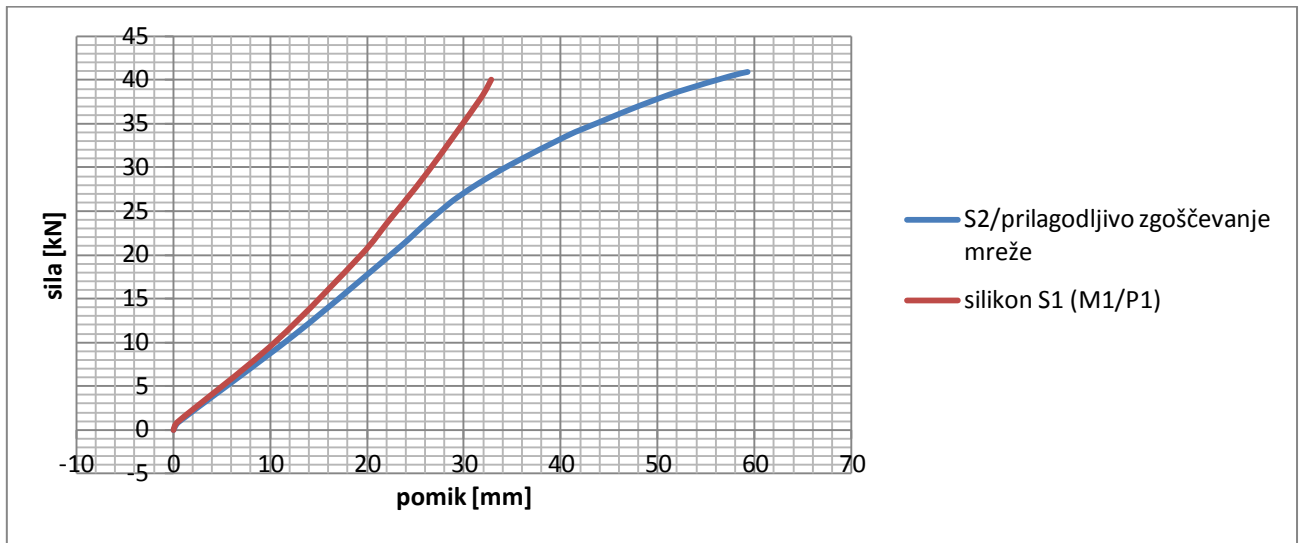
Čas računanja

4.5. Rezultati analize s heksaedri pri modificirani geometriji veziva

Izvedena je bila tudi analiza za modificirano geometrijo silikonskega veziva (označimo jo s S2). Dimenzije prereza silikonskega veziva so 5 x 10 mm, kar pomeni, da ima na robnih ploskvah ob stranicah utora na vsaki strani še 0,5 mm prostora za deformiranje. Izkaže se, da so v tem primeru pomiki pri enaki obtežbi občutno večji kot pri silikonu S1, s katerim zapolnimo celoten utor na okvirju. Končni pomik se je ustavil pri 59 mm pri sili 40 kN (grafikon 4). Tukaj smo imeli probleme s popačenjem celotne mreže končnih elementov, zaradi velikih deformacij. Pri preveliki popačenosti mreže, nam model ne daje pravih rezultatov ali pa se analiza celo prekine, zato smo uporabili postopek »Adaptive mesh«, ki prilagaja mrežo med potekom analize. V programu določimo območje, na kateri deluje metoda ter frekvenco preverjanja kvalitete mreže med samo analizo. Gre za postopek ustvarjanja nove mreže na podlagi začetne mreže, pri tem pa se popravljajo razmerja med stranicami elementa. Težimo k čim manjšem razmerju stranic. Na tak način se pri velikih deformacijah uspešno izognemo popačenju mreže. V našem primeru je bila začetna mreža M1, integracija je bila P1, končni element je bil heksaeder (C3D8R). Deformiran prereza veziva je podan na sliki 16.



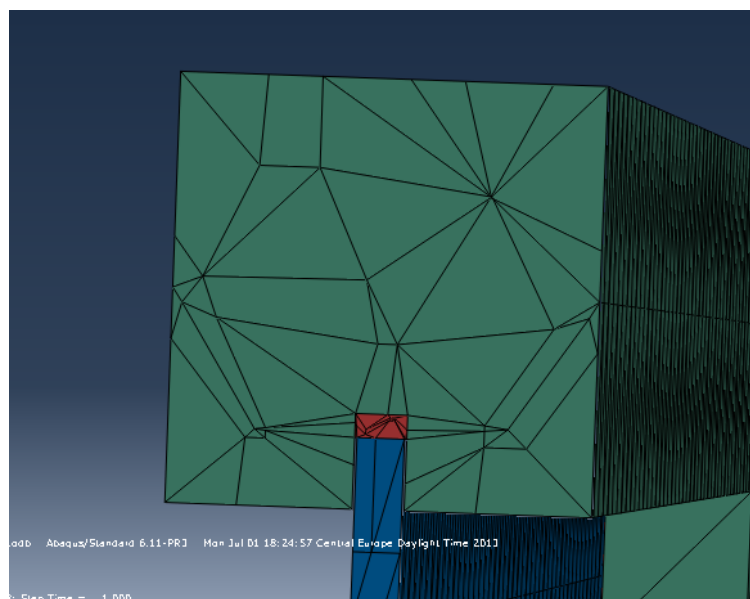
Slika 16: Deformacija veziva v prerezu (M1/P1/S2).



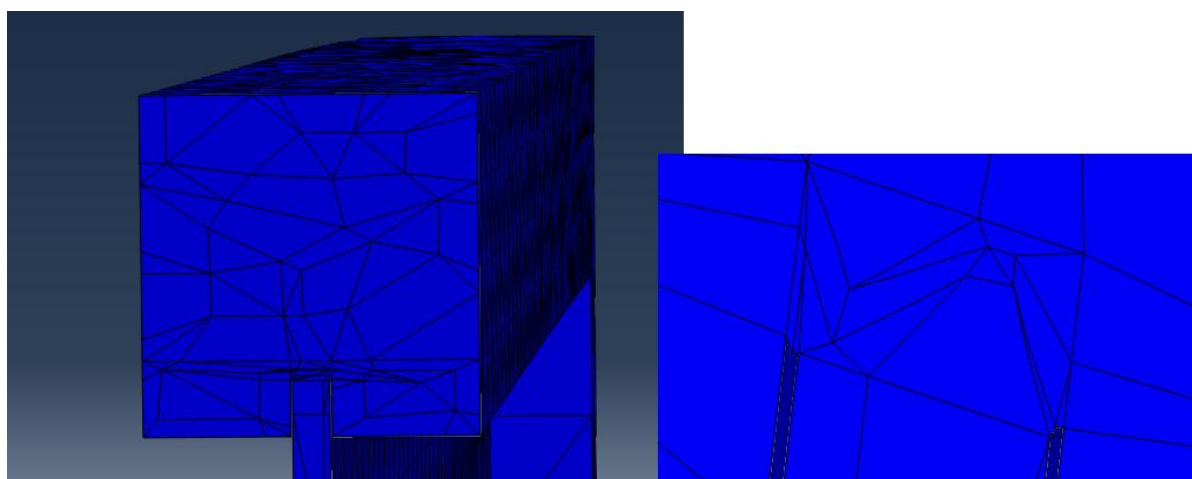
Grafikon 4: Odziv panela pri dveh različnih geometrijah silikonskega veziva.

4.6. Primerjava heksaedrov s tetraedri

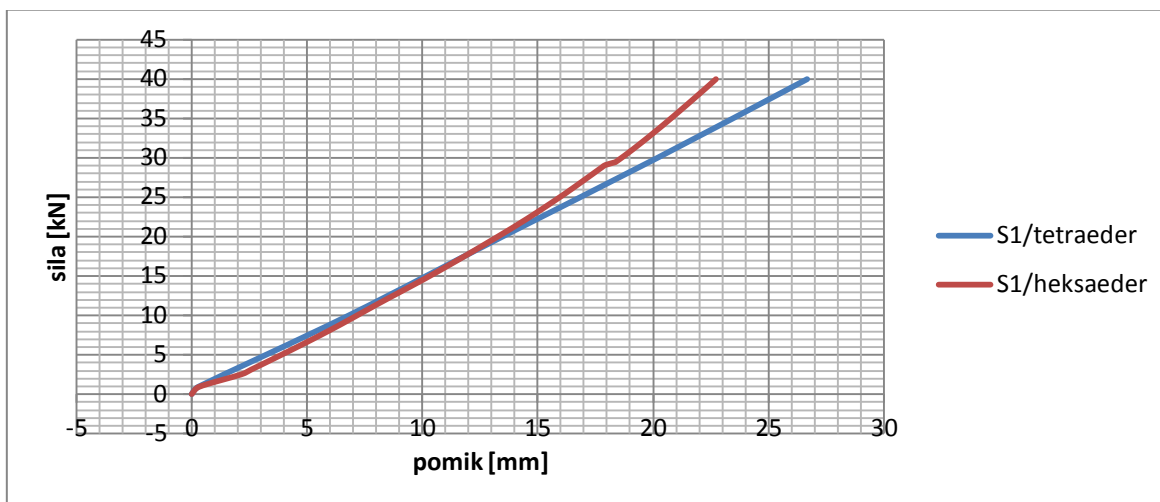
Primerjali smo vpliv heksaedrov in tetraedrov na rezultate analize. Analiza je bila izvedena za koncept S1, kjer imamo silikon zalit po celotnem utoru. Primerjamo mrežo M2 in integracijo P2. Analizo s tetraedrom smo prav tako izvedli s polno integracijo P2, ter uporabili gosto mrežo tetraedrov M4, ki ima približno 10 elementov po prerezu silikona (slika 17). Iz rezultatov na Grafikonu 5 opazamo, da krivulji pretežno sovpadata. Razlike se pojavijo le na koncu, kjer ima model z mrežo tetraedrov nekoliko večji končni pomik. Deformirana oblika detajla veziva je za mrežo tetraedrov prikazana na sliki 18.



Slika 17: Mreža tetraedrov v prerezu v nedeformiranem stanju (M4).



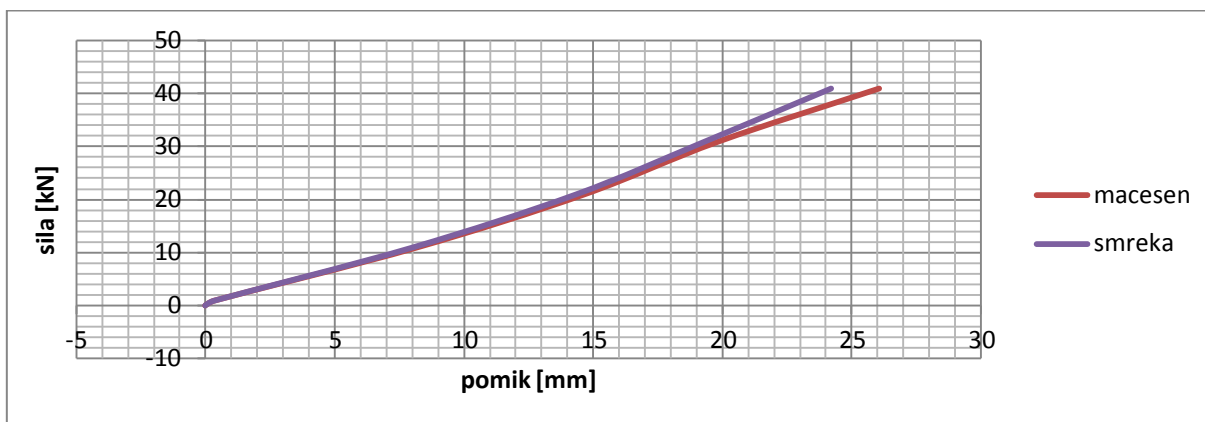
Slika 18: Deformirana oblika detajla mreže M4



Grafikon 5: Primerjava med rezultati tetraedrov (M2/K2) in heksaedrov (M2/K2).

4.7. Vpliv vrste lesa na obnašanje panela

Vpliv vrste lesa na obnašanje panela ne vpliva znatno (grafikon 6). Primerjali smo macesen in smreko, vendar imata skoraj identične pomike ter togost modela. Pri macesnu opazimo nekoliko večji pomik na koncu, vendar pa krivulji večinoma sovpadata.

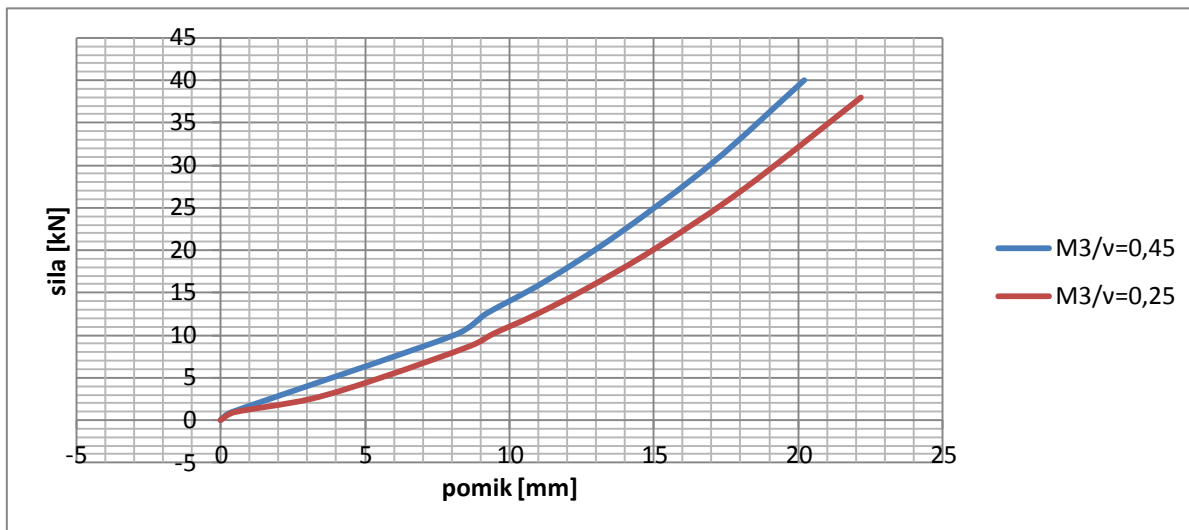


Grafikon 6: Krivulji sila pomik (M2/P2) za macesen in smreko.

4.8. Vpliv stisljivosti veziva na obnašanje panela

Poissonov količnik za vezivo (silikon) smo postavili pri vseh analizah na 0,45, torej smo silikon modelirali kot skoraj nestisljivo snov. Nestisljiva snov v utoru se pokaže v veliki togosti panela, saj se silikon nima prostora raztegovati. Silikon v utoru ima le 0,5 mm dolžine na vsaki strani steklene plošče za raztegovanje, kajti z vseh ostali stranic je silikonski trak zaprt. Pri zmanjšanju Poissonovega količnika smo pričakovali manjšo togost ter posledično

večje pomike. V primeru zmanjšanja z $\nu=0,45$ na $\nu=0,25$ dobimo dodatne pomike na račun stisljivosti silikona (Grafikon 7), saj se tako silikon deformira nekoliko bolj kot skoraj nestisljiva različica.



Grafikon 7: Vpliv Poissonovega količnika na pomike (M2/P2).

4.9. Uporaba hibridnih elementov in elementov z nekompatibilnimi oblikami

Uporaba hibridnih elementov ne prispeva veliko k spremembi rezultatov. Uporabili smo jih pri **P1/M1**, **P1/M2** ter **P2/M3**. Hibridni elementi so primerni za nestisljive oblike. V naših analizah smo določili Poissonov količnik veziva na $\nu=0,45$, kar predstavlja skoraj nestisljivo snov. V tem primeru se panel z navadnimi elementi obnaša podobno kot s hibridnimi.

Izvedli smo analize z nekompatibilnimi elementi pri **P1/M3** enkrat v kombinaciji s hibridnimi elementi ter enkrat brez. Elementi z nekompatibilnimi oblikami so primerni za analize z upogibnimi problemi. Pri uporabi opazamo, da so veliko bolj občutljivi na popačenost elementov kot ostale formulacije. Pri reducirani integraciji se pojavi med analizo maksimalno 5% popačenih elementov, medtem ko pri analizi z nekompatibilnimi oblikami ta odstotek naraste do 20%. Analiza izvedena z nekompatibilnimi oblikami elementov skupaj z hibridnimi elementi (**C3D8IH**) pride do sile 10kN od vnesenih 40kN, preden jo prekine. Pri sili 10kN se formira linearen pomik 15mm.

4.10. Najustrežnejši model

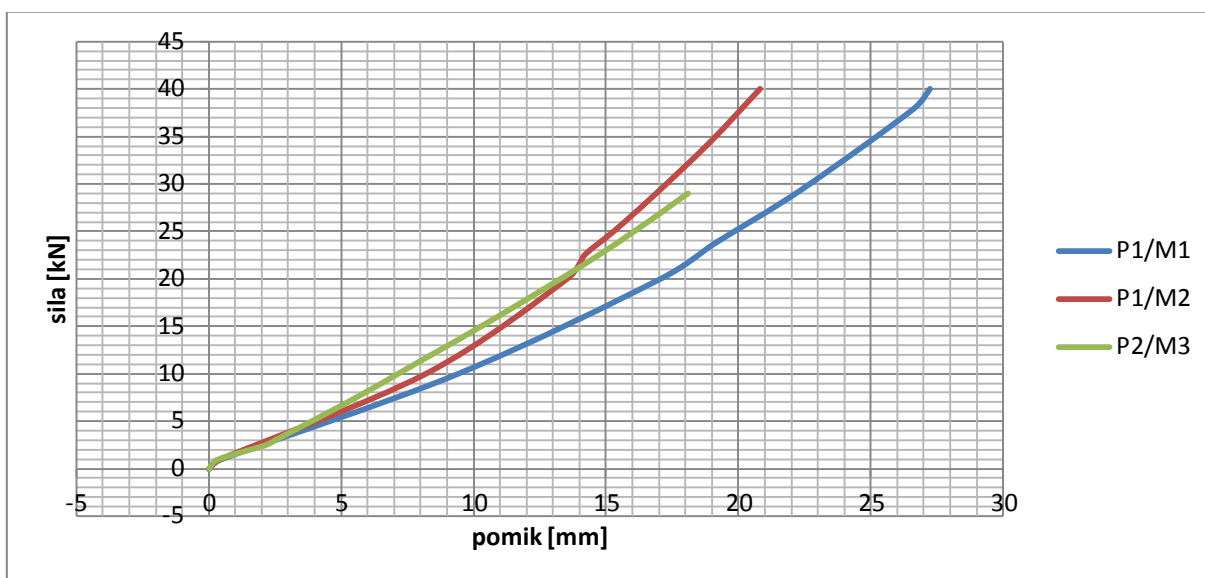
Najbolj zanesljive rezultate podajajo gostejše mreže. Menimo, da je najustrežnejša kombinacija gosta mreža heksaedrov M3 skupaj z prilagodljivo mrežo pri polni integraciji. Lahko uporabimo tudi tetraedre vendar je potrebno mrežo nekoliko bolj z gostiti ter uporabiti element s kvadratno interpolacijo. Mrežo uporabimo na modelu s silikonom S1 ali S2.

5. Primerjava z eksperimenti

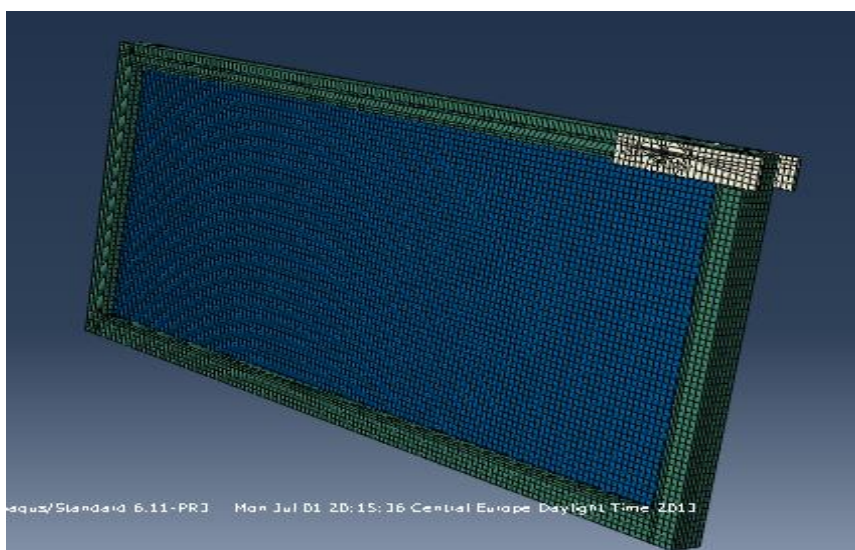
5.1 Podpiranje v skladu z eksperimentom

Naredili smo računski model, ki se bolj približa realnemu modelu. Pri prejšnjih analizah smo namesto jeklene podpore na zgornjem robu uvedli le ploskev s predpisanimi robnimi pogoji (navedeno v poglavju 4.1). Tukaj smo pa uvedli jeklene pločevine debele 8mm na vsaki strani okvirja ter z vijaki pritrdili lesen okvir na pločevino. Jeklene ploskve so na koncu členkasto podprte (slika A5). Les se na spodnjem robu ob realni podpori nekoliko stisne, zato smo na spodnjem robu dodali vzmet s togostjo 66,83 kN/mm (slika A6). [13]

Za ta model smo uporabili silikon S1, ki zaobjame celoten utor v okvirju. Menimo, da je takšen koncept bolj podoben realnemu stanju. Uporabili smo mrežo M3 sestavljeno iz heksaedrov v kombinaciji s P2 (polno integracijo) ter hibridnimi oblikami elementov (C3D8RH). Rezultati z uporabo hibridnih elementov so podani v grafikonu 8. Celotna mreža končnih elementov je razvidna na sliki 19.



Grafikon 8: Primerjava različnih mrež in načinov integracije s hibridnimi elementi. Krivulje prikazujejo vneseno silo 40 kN z lastno težo v odvisnosti pomika na dnu (vezivo je silikon)



Slika 19: Slika celotne mreže računskega modela.

5.2. Primerjava z eksperimenti

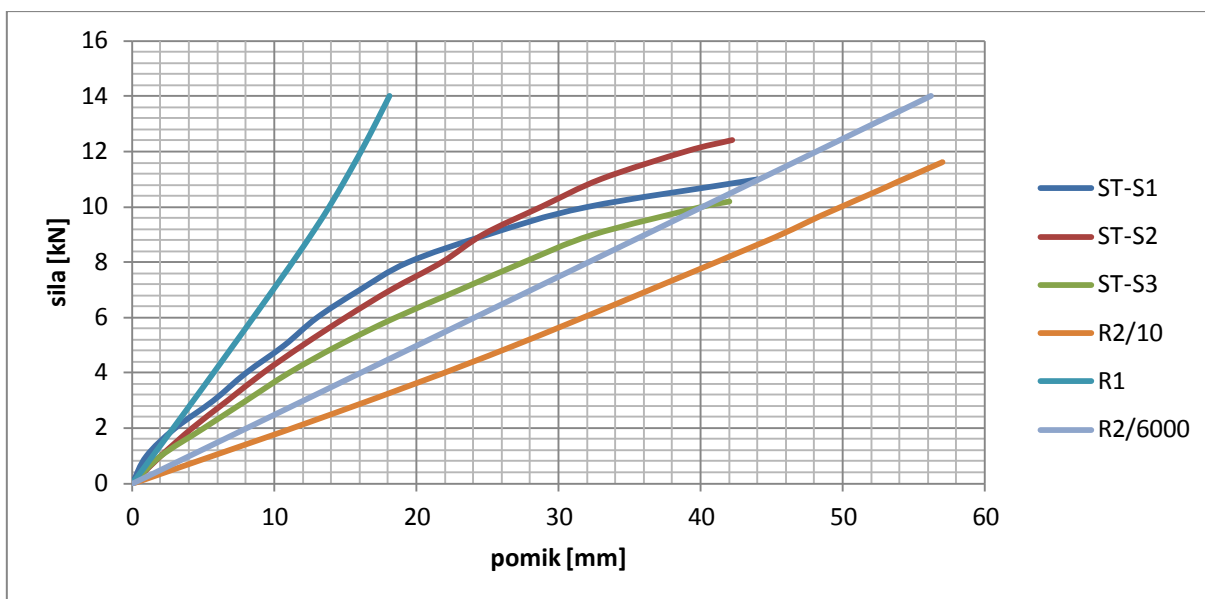
Med seboj smo primerjali več računskih modelov. Vsi so pa izhajali iz osnovnega modela podanega v poglavju 5.1.

ST-S1; ST-S2; ST-S3 so krivulje iz eksperimenta. Podane v prilogi (A6)

R1 – računski model z vijaki, ter s togimi stiki med letvami v okvirju

R2/10 – računski z vijaki, ter z manjšo togostjo stika med pokončnimi in vodoravnimi letvami okvirja. V stik med letvami je vnesen 5cm sloj izotropnega materiala s togostjo $E=10 \text{ N/mm}^2$

R2/6000 - računski z vijaki, ter z manjšo togostjo stika med pokončnimi in vodoravnimi letvami okvirja. V stik med letvami je vnesen 5cm sloj izotropnega materiala s togostjo $E=6000 \text{ N/mm}^2$)



Grafikon 9: Primerjava pomikov računskih modelov z eksperimentom.

Eksperiment kaže da se pri sili približno 7kN začne padati togost panela. Računski model s togimi stiki nam da višjo togost ter ta tudi ne upade. Z uvedbo manj togih stikov opazimo velik upad togosti celotnega panela (krivulje R2). Stiki s togostjo 10 N/mm^2 se pokaže v manjši togosti kot pri eksperimentu. Vez med pokončniki ter prečkami okvirja smo z 10 N/mm^2 povišali togost na 6000 kN/mm^2 . Takrat opazamo, da krivulja približno sovпада s krivuljami iz eksperimenta. Izkaže se, da smo najbližje pri računskih modelih z modifikacijo togosti stikov med lesenimi letvami v okvirju.

7 Zaključki

Največji vpliv na rezultate ima gostota mreže končnih elementov v silikonskem traku ter izbira vrste integracije. Optimalna mreža se je izkazala M2, kjer imamo v prerezu silikonskega sloja skupno 8 elementov. Z gostejšo mrežo ne dobimo znatno natančnejših rezultatov. Ostali parametri, kot so sprememba vrste lesa ter oblika končnega elementa ne vplivajo veliko. Pri spremembi Poissonovega količnika veziva se rezultati sicer spremenijo, vendar je realna vrednost Poissonovega količnika za silikon blizu $\nu=0,5$, t.j. skoraj nestisljiva snov. Vse analize smo zato izvajali z osnovno vrednostjo količnika $\nu=0,45$.

Pri kompleksnejši geometriji modela se pojavljajo t.i. »slabo oblikovani elementi«, kateri povzročijo preveliko popačenost elementov ter tako tudi slabe rezultate. V tem primeru se izkaže, da je primerna reducirana integracija, ki je manj občutljiva na popačene elemente. Popačenosti se lahko izognemo s pravilno razporeditvijo končnih elementov. Potrebno je ustrezno razdeliti model na več delov, posebej na mestih nagle spremembe geometrije, kjer se elementi težko prilagajajo obliki modela. Pri uporabi reducirane integracije je potrebna nekoliko bolj gosta mreža.

Primerjava numerične analize z eksperimentom je pokazala raztros rezultatov. Pri numerični analizi dobimo bolj tog model. Problem predstavljajo togi stiki med letvami, ki jih imamo v računskem modelu. Poskušali smo z modifikacijo stikov na manjšo togost. Rezultati so pokazali pravo smer razmišljanja. V eksperimentu stiki med letvami niso bili togo vpeti. Kritično točko v panelu predstavlja veziva, saj se vije okoli celotnega panela v zaprtem krogu in se zato nima prostora raztegovati, kar se pokaže v veliki togosti modela. Za nadaljnje analize se mi zdi smiselno se osredotočiti prav na modeliranje veziva za namene numeričnih analiz.

Viri

- [1] Abaqus/CAE User's Manual. 2011. Providence , Dassault Systemes: loč. pag.
- [2] Abaqus Analysis Manual. 2011. Providence , Dassault Systemes: loč. pag.
- [3] Abaqus Theory Manual. 2011. Providence, Dassault Systemes: loč. pag.
- [4] Beg D. (ur.), Pogačnik A. (ur.) 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: poglavje 5: Projektiranje lesenih konstrukcij
- [5] Ber, B., Premov, M., Kuhta , M. 2012. Horizontalna nosilnost stenskih elementov s steklenimi obložnimi ploščami v montažni leseni gradnji. Zbornik 34. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 211-218
- [6] Green, D. W., Winandy, J. E., Kretschmann, D. E. 1999. Mechanical Properties of Wood. Madison, Forest Product Laboratory: str 1-23
- [7] Kager Hiše d.o.o. 2013
<http://www.kager.si/hise-kager/> (pridobljeno 4. 7. 2013)
- [8] Reflex d.o.o. 2013
<http://www.reflex.si/si/> (pridobljeno 4. 7. 2013)
- [9] SIST EN 572-1:2004, Steklo v stavbah-osnovni proizvodi iz natrij-kalcijevega silikatnega stekla-1.del: Definicije in splošne fizikalne in mehanske lastnosti.
- [10] Klosowski, J. E. 1998. Science and Technology of Building Seals, Sealants, Glazing, and Waterproofing; 7th Volume. Society for testing and materials. loč. pag.
- [11] de Weck, O., Kim, I. Y. 2004. s. l., Predavanje: Finite Element Method. (12. Januar 2004), Massachusetts Institute of Tehnology.
http://web.mit.edu/16.810/www/16.810_L4_CAE.pdf (pridobljeno junij 2013)

[12] Dassault Systemes; Abaqus. 2013

<http://www.3ds.com/products-services/simulia/portfolio/abaqus/overview/> (pridobljeno junij 2013)

[13] Kocjan, M. 2013. Diplomski naloga. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za Gradbeništvo in Geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer. V pripravi

9 Priloge

Priloge A: Podatki o prerezu

Slika A 1: Tehnična risba obravnavanega panela

Slika A 2: Prerez A-A

Slika A 3: Prerez B-B

Slika A 4: Rezultati enosnega nateznega preizkusa za silikon (podatki proizvajalca, pridobljeno od B. Bera)

Priloge B: Različne mreže končnih elementov

Slika B 1: Mreža M1

Slika B 2: Mreža M2

Slika B 3: Mreža M3

Slika B 4: Cela mreža M1

Slika B 5: Mreža M1 po vezivu

Priloge C: Deformirane mreže končnih elementov

Slika C 1: Deformirana mreža M1/P1

Slika C 2: Deformirana mreža M1/P2

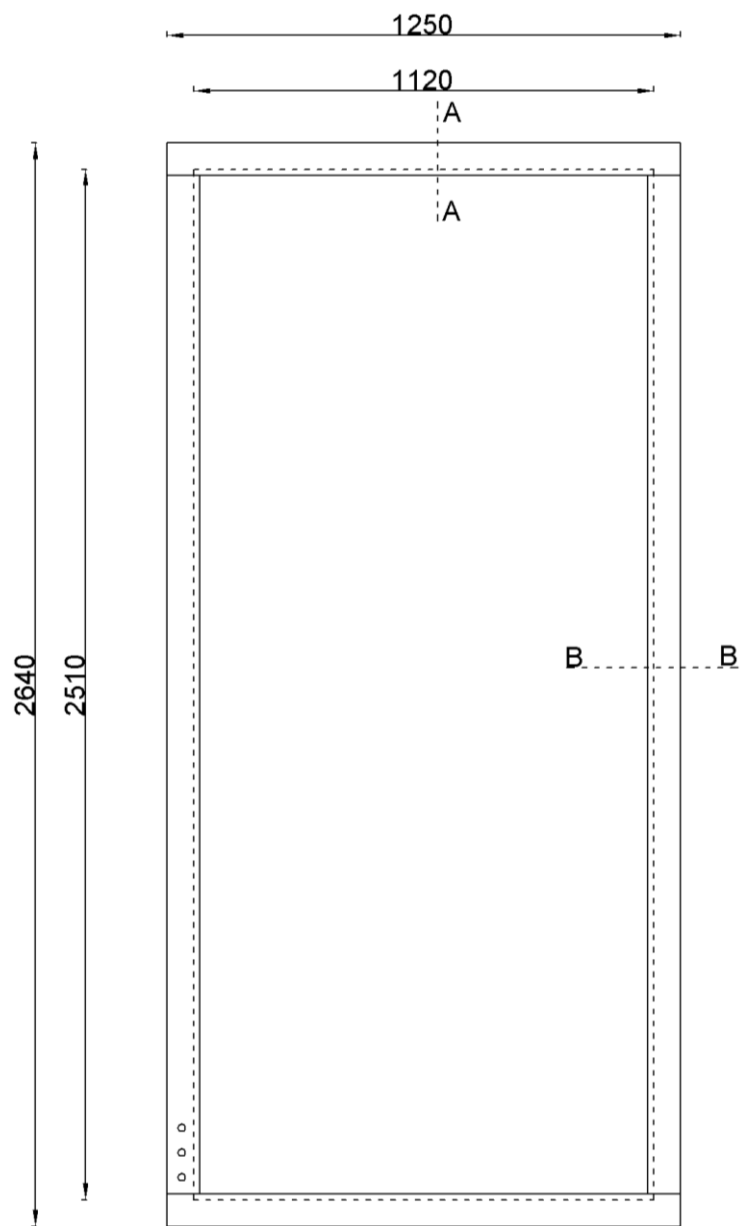
Slika C 3: Deformirana mreža M2/P1

Slika C 4: Deformirana mreža M2/P2

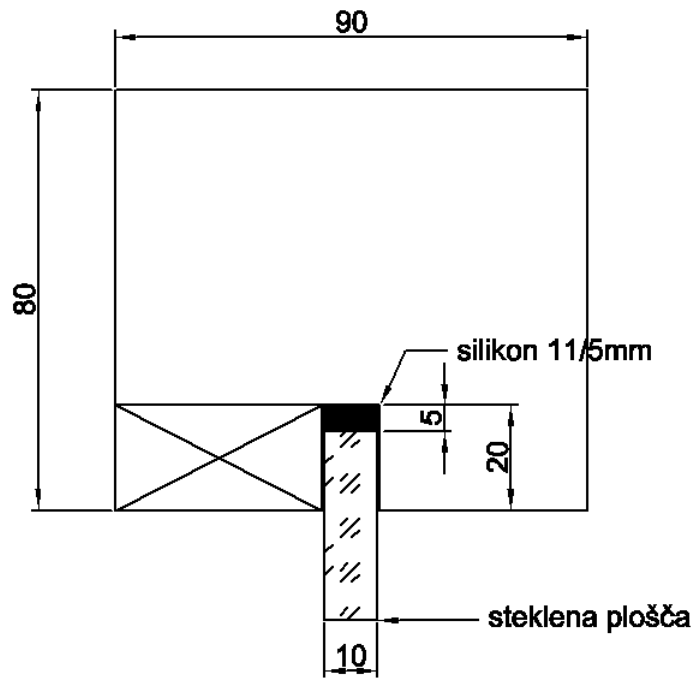
Slika C 5: Deformirana mreža M3/P1

Slika C 6: Deformirana mreža M3/P2

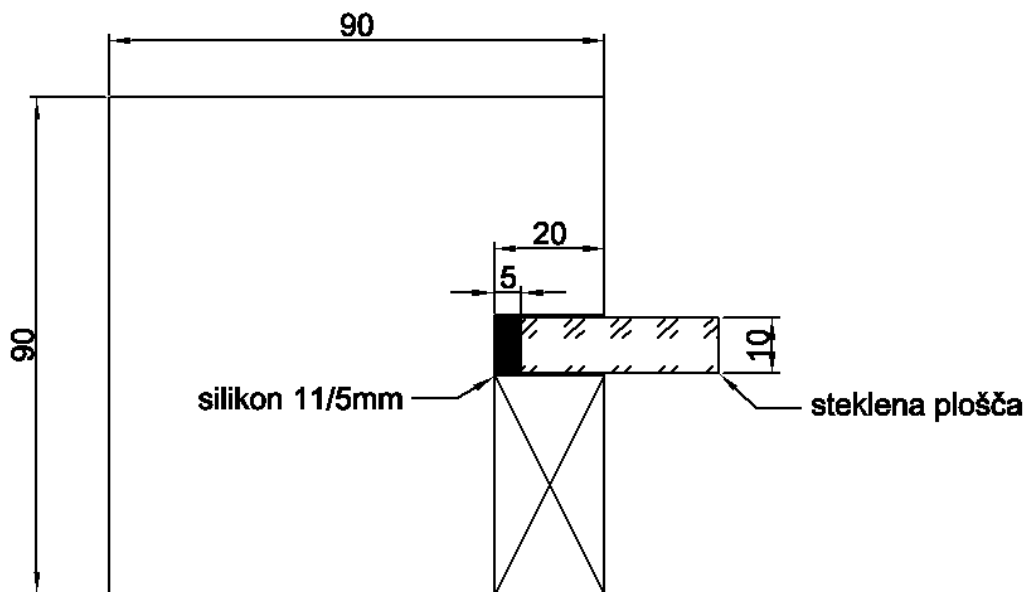
Priloga A: Podatki o prerezu



Slika A 1: Tehnična risba obravnavanega panela



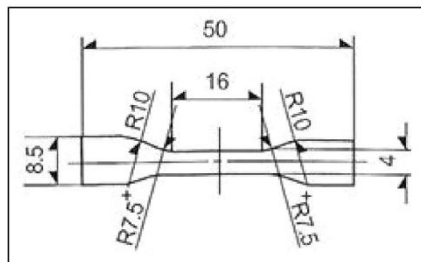
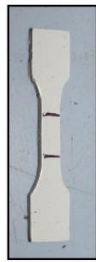
Slika A 2: Prerez A-A



Slika A 3: Prerez B-B

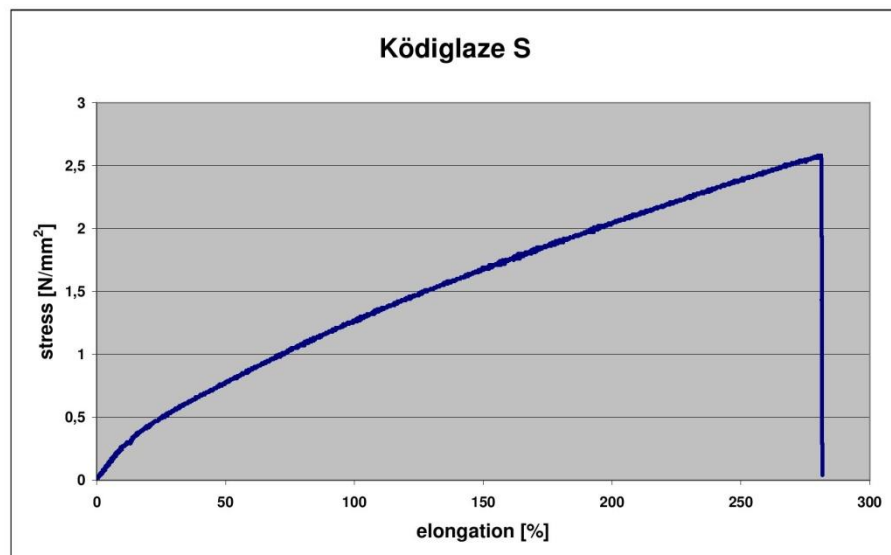
Stress-elongation-curve Ködiglaze S

- Test according to DIN 53504, specimen geometry: S3A

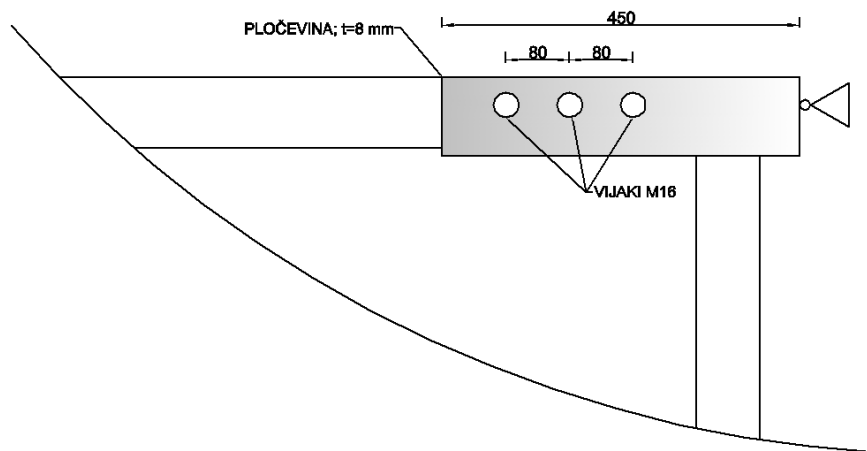


- Testing speed: 200 mm/min; Temperature: 23°C

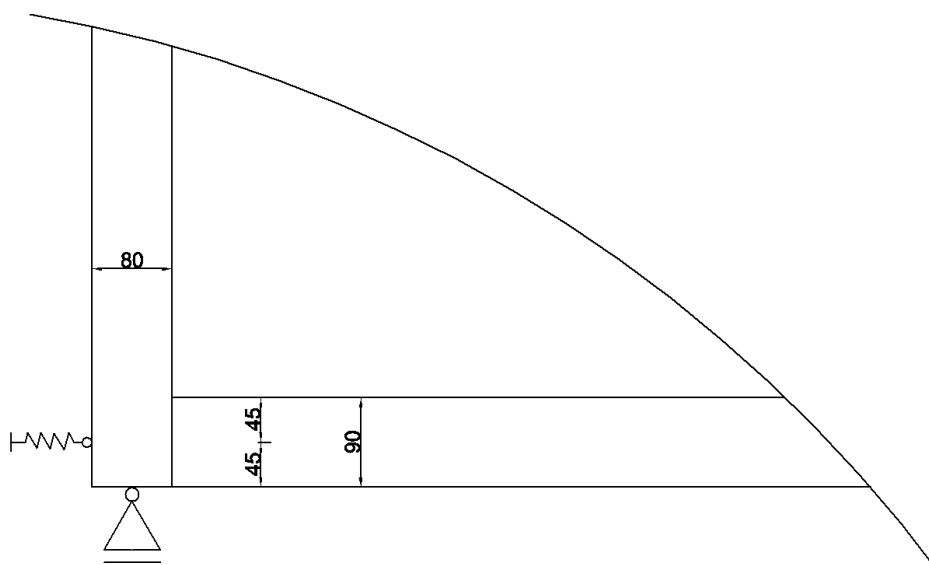
- Results:



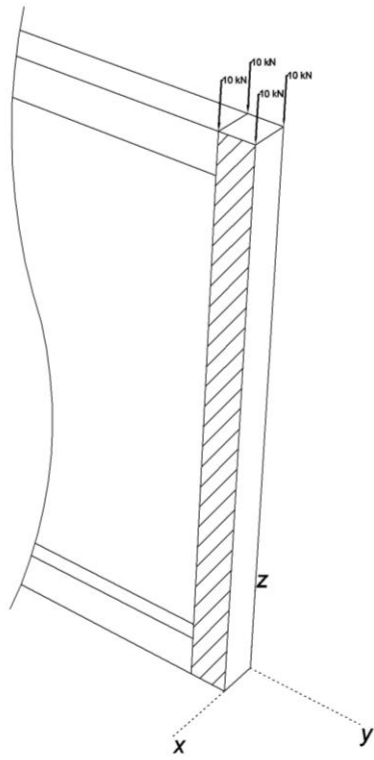
by: Dr. Christian Scherer
F&E Kömmerling Chemische Fabrik GmbH
13.12.2011



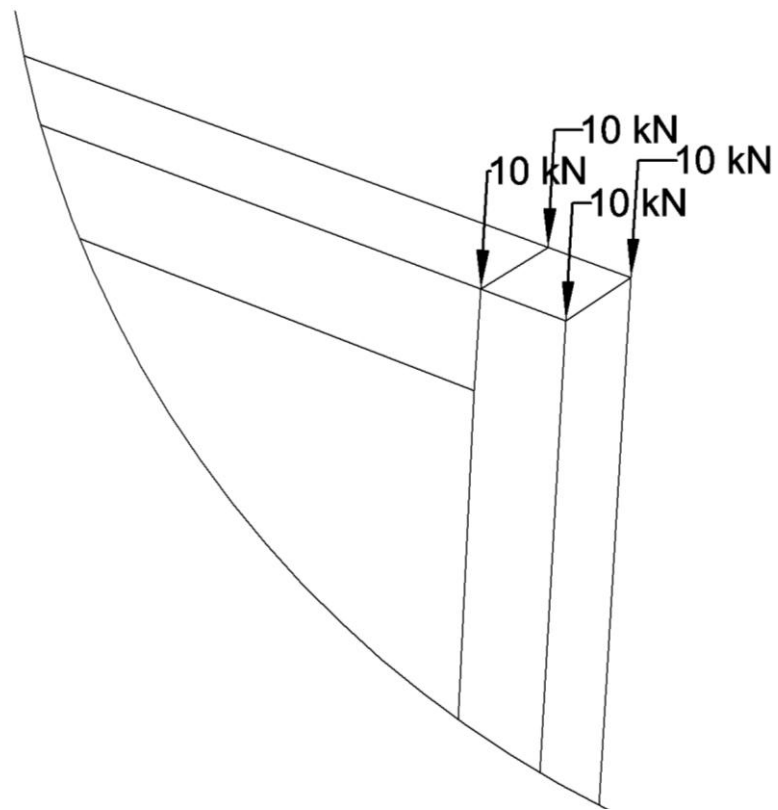
Slika A 5: Podpora z vijaki



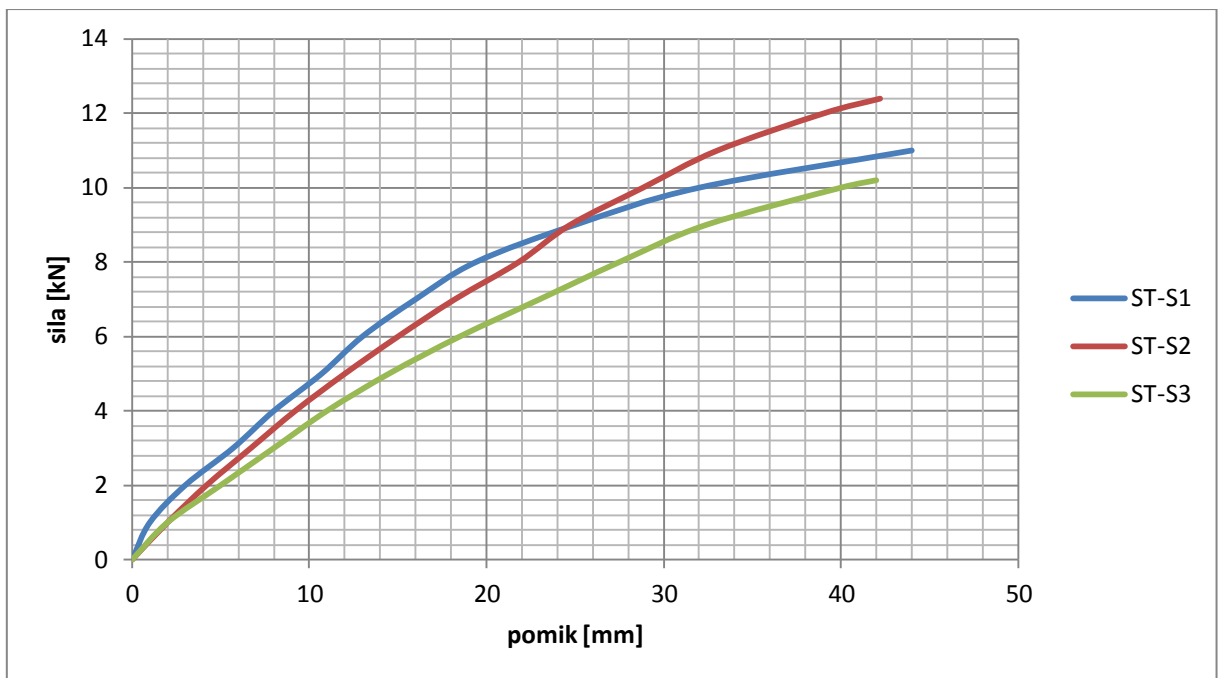
Slika A 6: Podpora na dnu



Slika A 7: Podpore pod silo

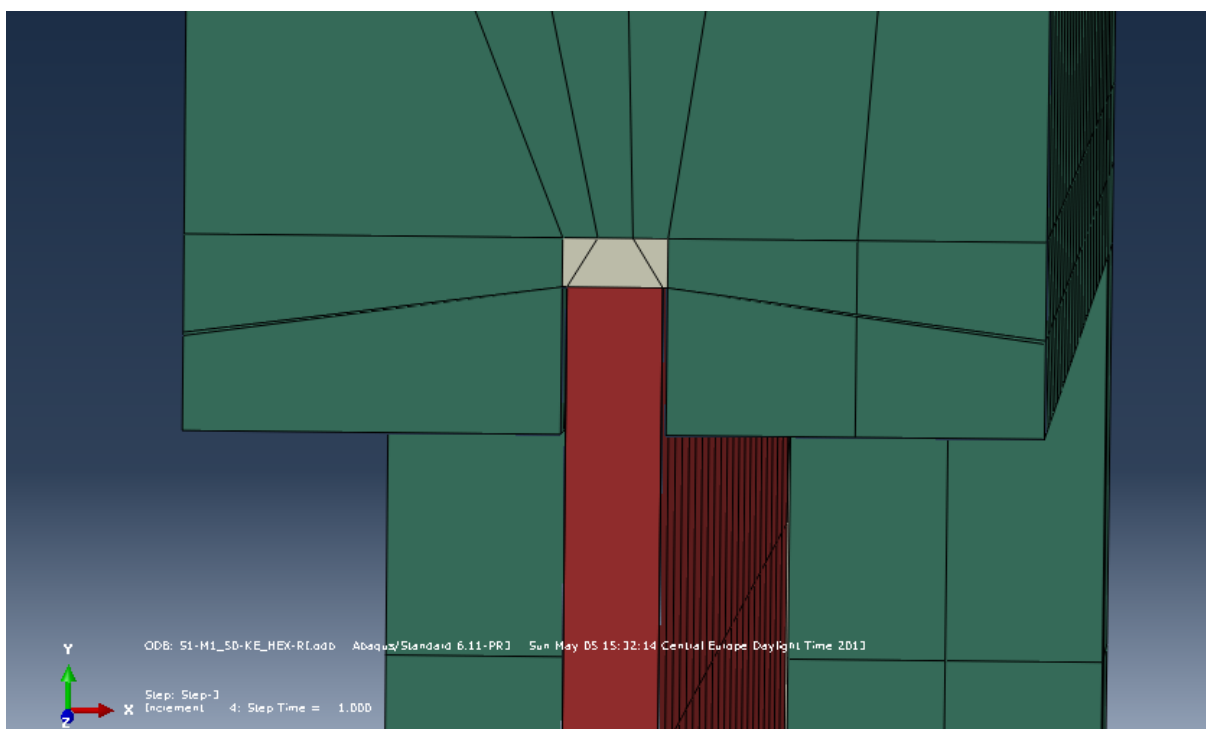


Slika A 8: Vnos sile v panel

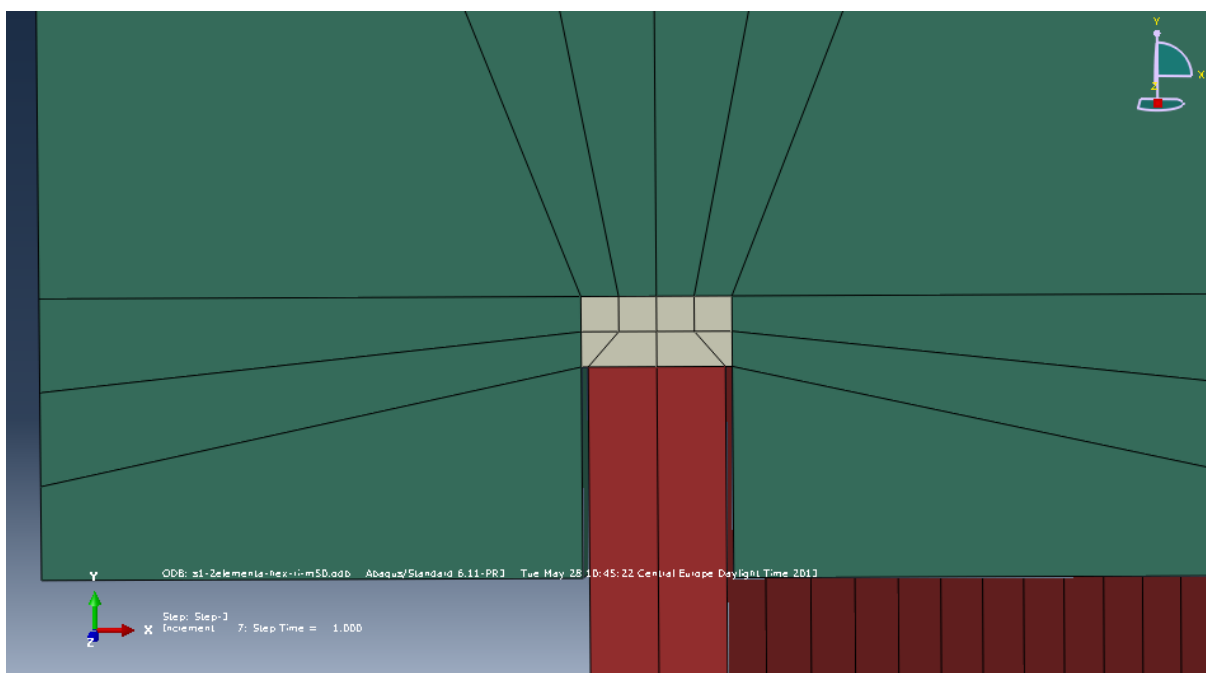


Slika A 9: Navpičen pomik na dnu panela v odvisnosti od vnesene sile za silikonsko vezivo (pridobljeno od B Bera)

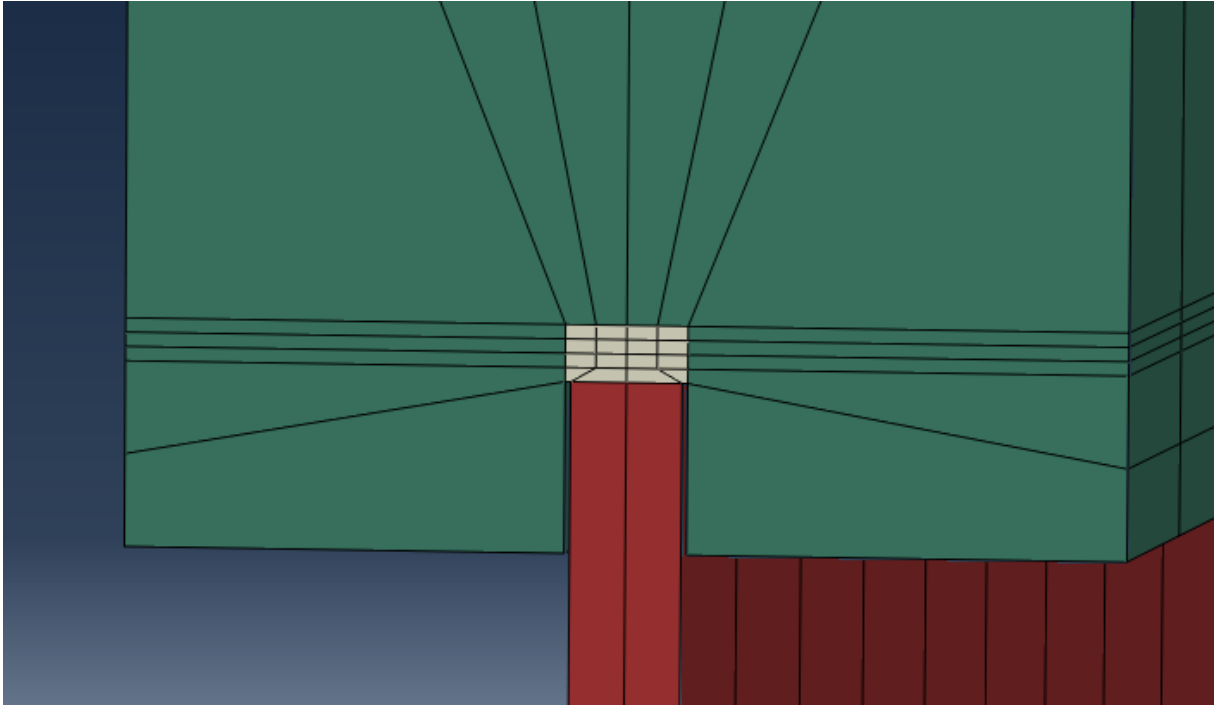
Priloga B: Različne mreže končnih elementov



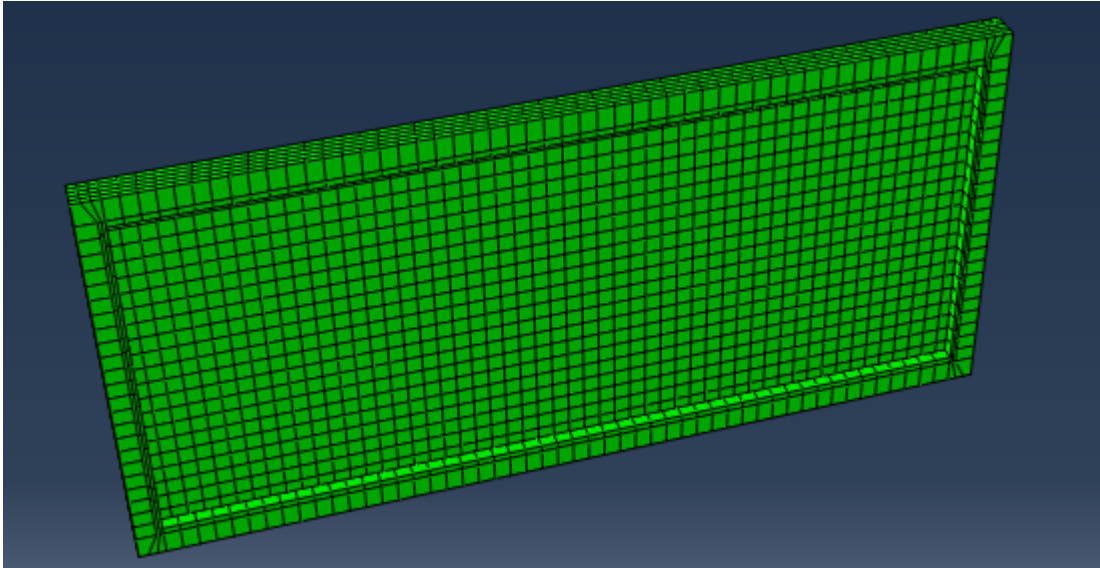
Slika B 1: Mreža M1



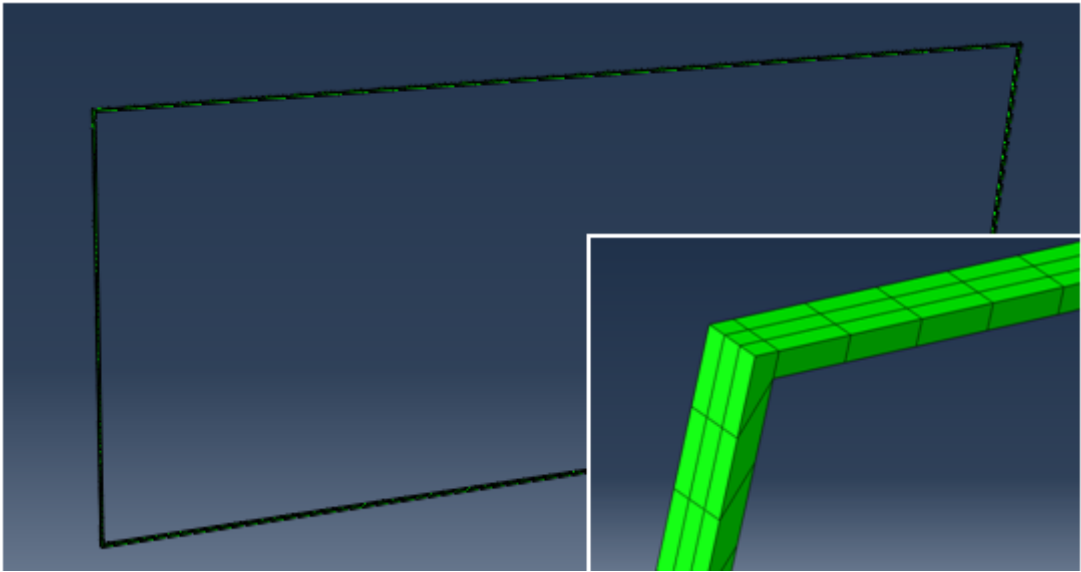
Slika B 2: Mreža M2



Slika B 3: Mreža M3

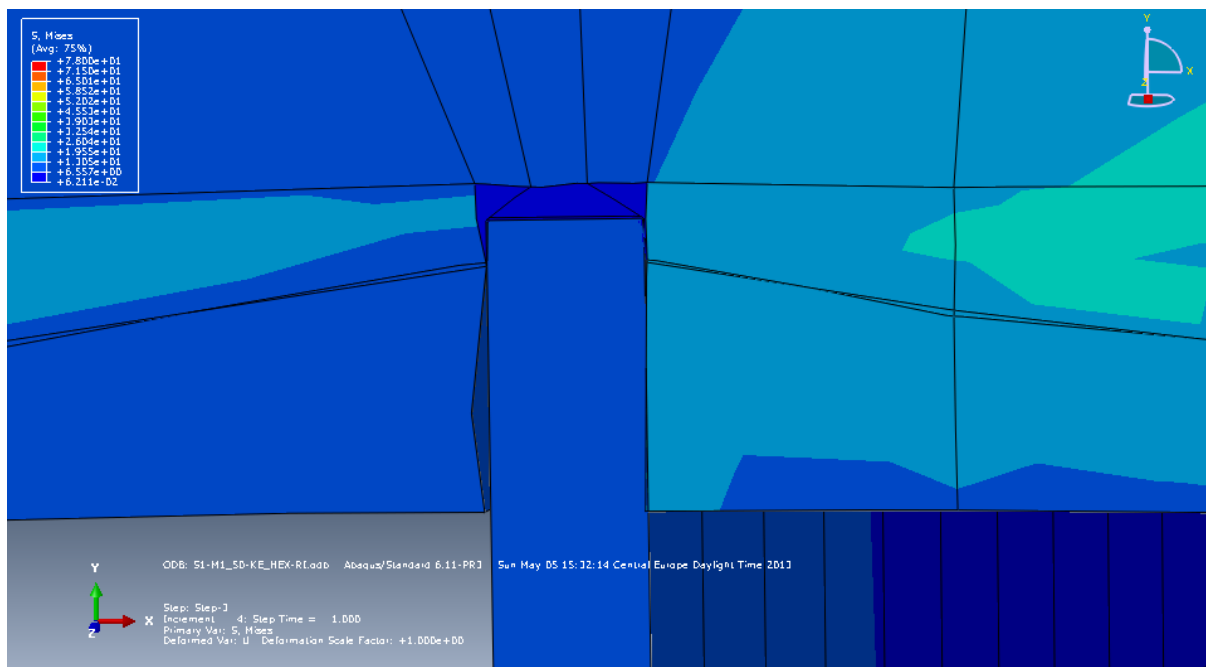


Slika B 4: Cela mreža M1

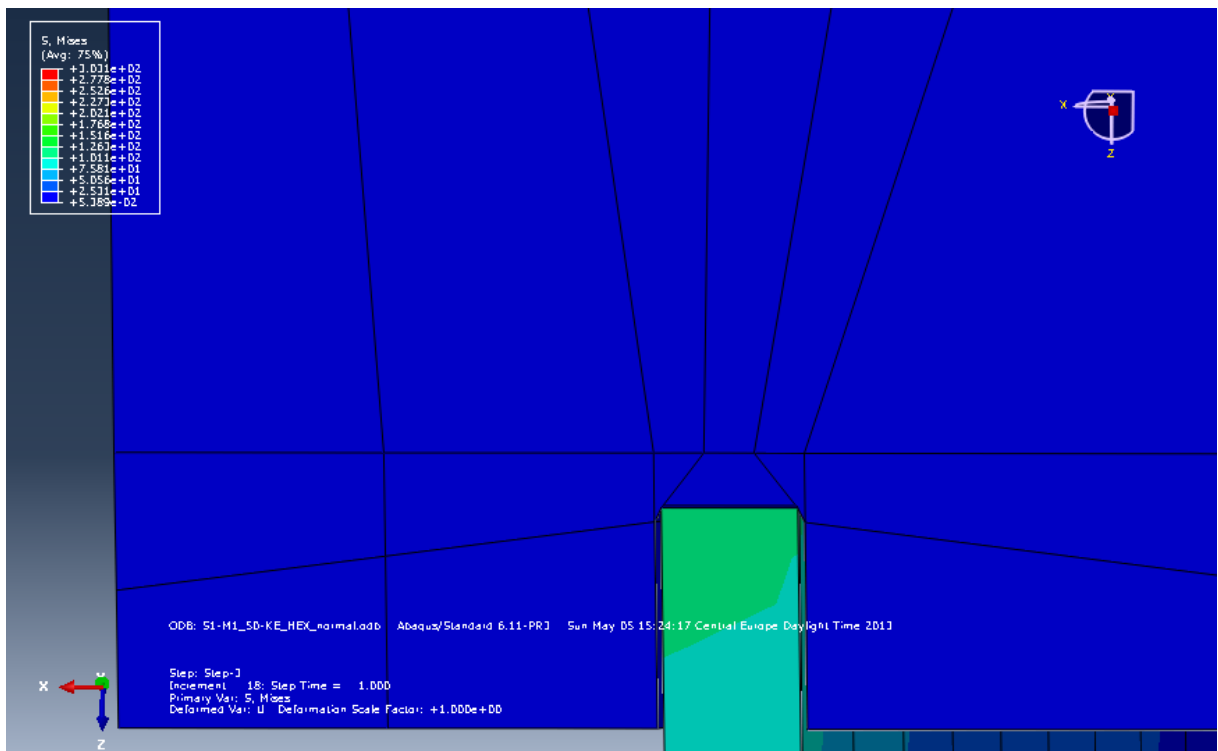


Slika B 5: Mreža M1 po vezivu

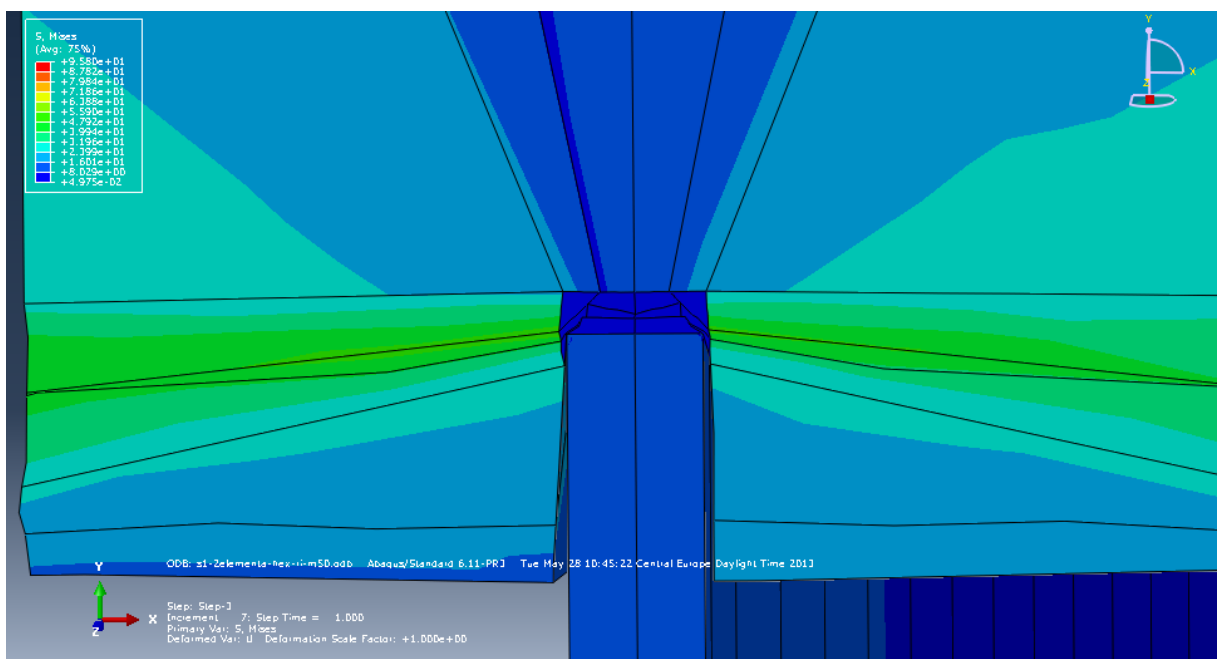
Priloga C: Deformirane mreže končnih elementov



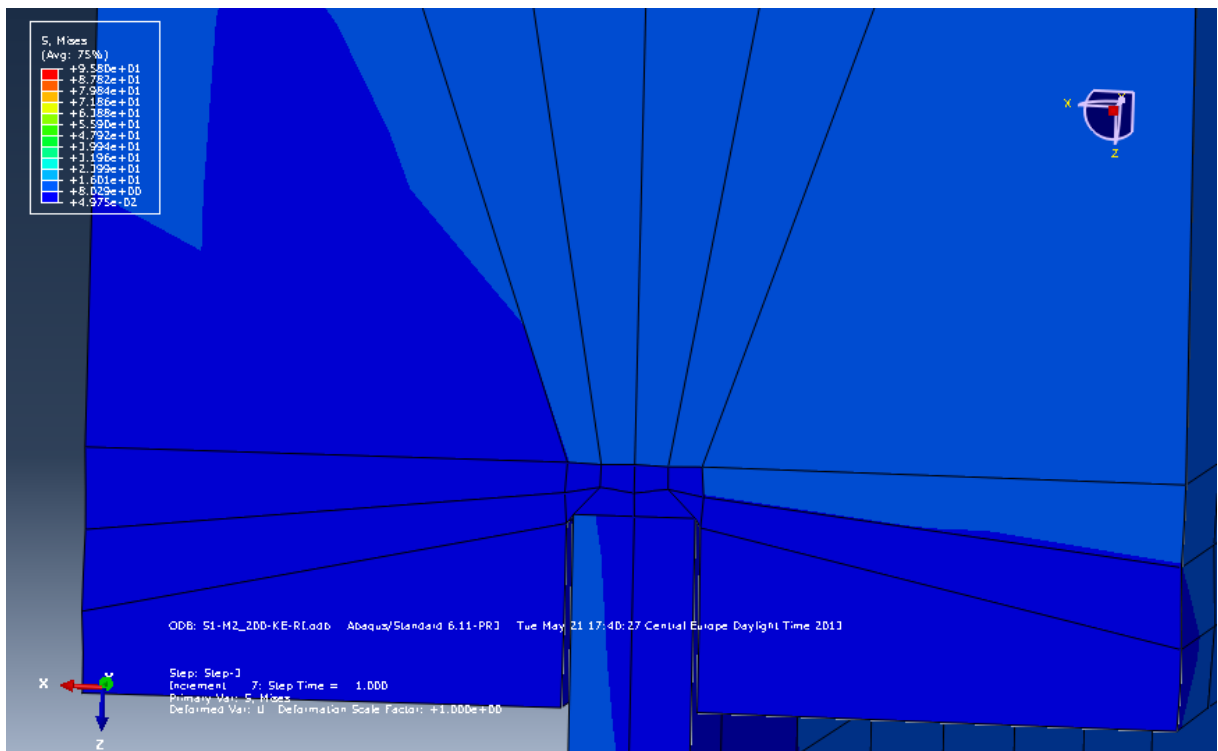
Slika C 1: Deformirana mreža M1/P1



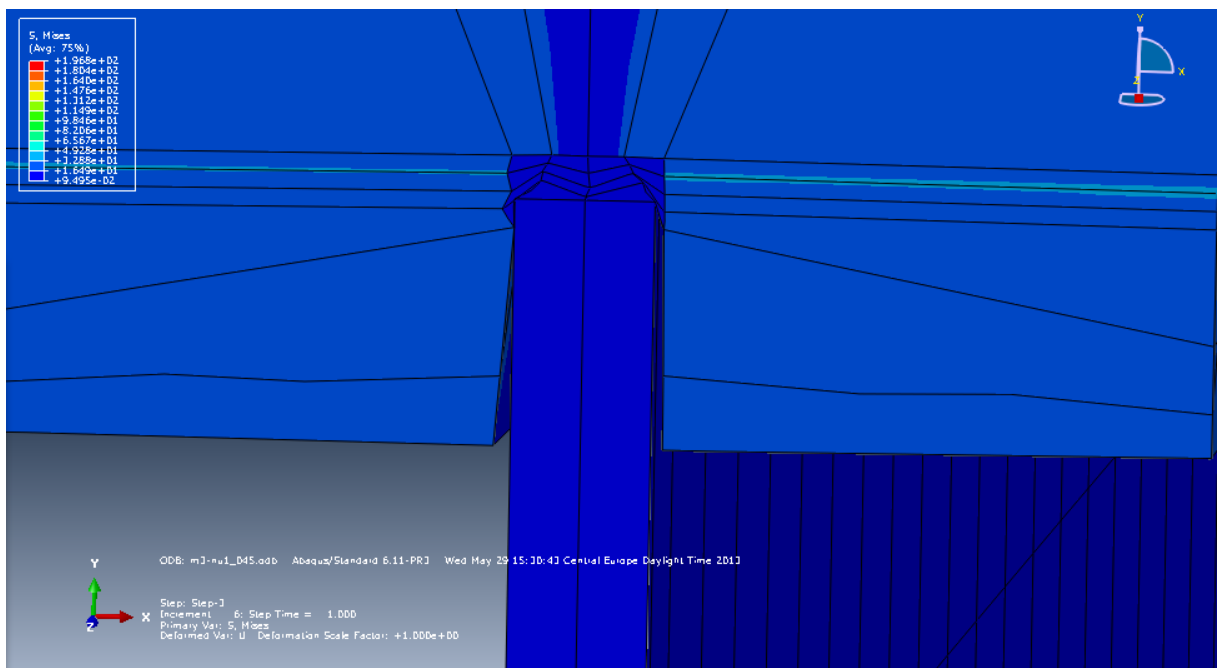
Slika C 2: Deformirana mreža M1/P2



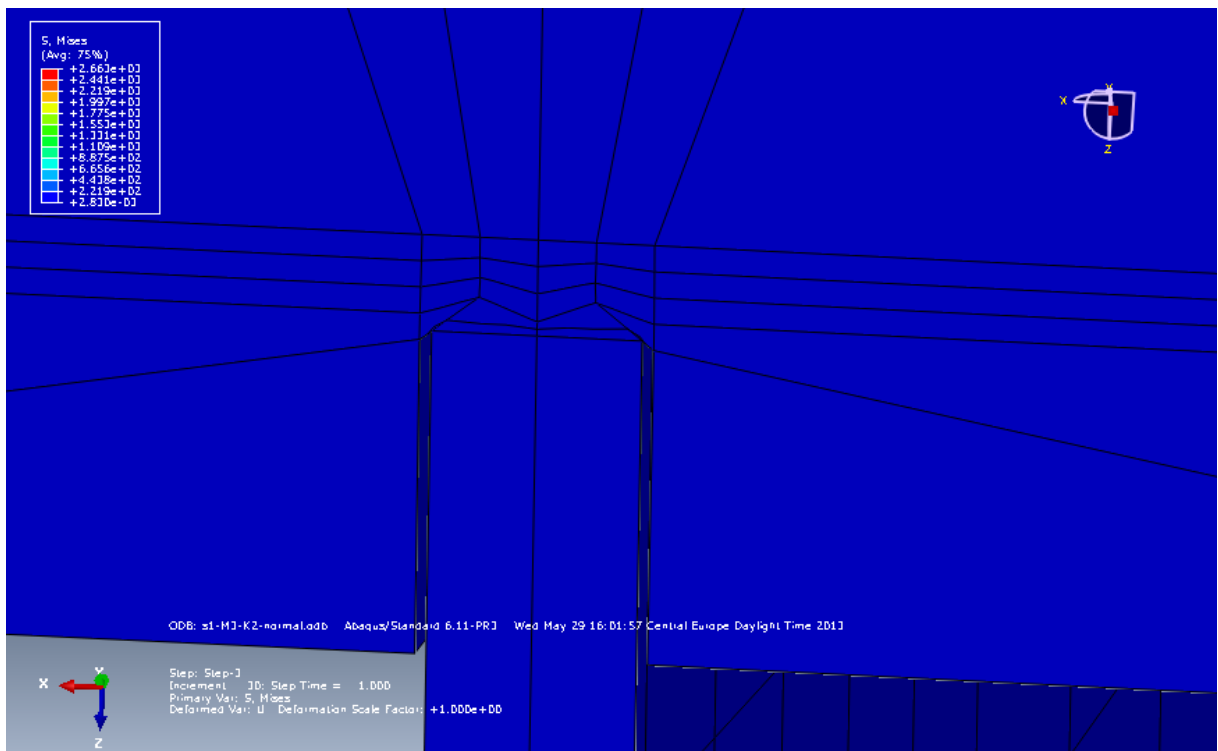
Slika C 3: Deformirana mreža M2/P1



Slika C 4: Deformirana mreža M2/P2



Slika C 5: Deformirana mreža M3/P1



Slika C 6: Deformirana mreža M3/P2