

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:

Kocjan, M., 2014. Numerično modeliranje preskusov na leseno steklenih stenastih elementih. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Brank, B., somentor Premrov, M.): 71 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:

Kocjan, M., 2014. Numerično modeliranje preskusov na leseno steklenih stenastih elementih. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Brank, B., co-supervisor Premrov, M.): 71 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



UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidat:

MATEVŽ KOCJAN

**NUMERIČNO MODELIRANJE PRESKUSOV
NA LESENO STEKLENIH STENASTIH
ELEMENTIH**

Diplomska naloga št.: 3369/KS

**NUMERICAL MODELLING OF EXPERIMENTAL
TESTS ON TIMBER-GLASS WALLS**

Graduation thesis No.: 3369/KS

Mentor:

prof. dr. Boštjan Brank

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentor:

prof. dr. Miroslav Premrov

Član komisije:

doc. dr. Mitja Košir

doc. dr. Roman Kunič

doc. dr. Andreja Kuntar

Ljubljana, 27. 02. 2014

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Matevž Kocjan izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »Numerično modeliranje preskusov na leseno steklenih stenastih elementih«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 12. februar 2014

Matevž Kocjan

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 519.63:624.011.1:624.07(043.2)
- Avtor:** Matevž Kocjan
- Mentor:** prof. dr. Boštjan Brank
- Somentor:** prof. dr. Miroslav Premrov
- Naslov:** Numerično modeliranje preskusov na leseno steklenih stenastih elementih
- Tip dokumenta:** Diplomaska naloga – univerzitetni študij
- Obseg in oprema:** 71 str., 81 sl., 10 tab.
- Ključne besede:** leseno stekleni paneli, adhezivi, metoda končnih elementov, nelinearna analiza

Izvleček:

V diplomski nalogi sem z nelinearno metodo končnih elementov računalniško simuliral eksperimentalne preizkuse na leseno steklenih stenastih elementih (v nadaljevanju tudi panelih). Eksperimentalne preizkuse je v sodelovanju s Fakulteto za gradbeništvo Univerze v Mariboru izvedel proizvajalec panelov Kager Hiše d.o.o. Numerične simulacije sem izvedel s pomočjo komercialnega programa za reševanje inženirskih konstrukcijskih problemov SAP2000. Obnašanje adhezivnih sredstev (v nadaljevanju tudi lepil) sem modeliral z nelinearnimi triosnimi kočnimi elementi za vzmeti, les in steklo pa z linearno elastičnimi končnimi elementi za nosilce in lupine. Upoštevana je bila geometrijska nelinearnost. Poseben poudarek je bil na izbiri ustreznih odnosov sila-pomik za lepila, ki sem jih določil na podlagi razpoložljivih materialnih eksperimentalnih testov in z uporabo hiperelastičnih materialnih modelov tipa Arruda-Boyce, Marlow in Ogden. Uporabljen lepila so bila silikonska, poliuretanska in epoksidna. Da bi čim natančneje simuliral preizkuse, sem veliko pozornosti posvetil modeliranju podprtja panelov, kjer je prišlo do vtiskovanja jeklenih delov podpor v les. Izračunane rezultate sem primerjal z rezultati preizkusov in ugotovil zadovoljivo ujemanje. Na koncu diplomske naloge sem prikazal razpored notranjih sil v adhezivih, lesu in steklu.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

- UDC:** 519.63:624.011.1:624.07(043.2)
- Author:** Matevž Kocjan
- Supervisor:** prof. Boštjan Brank, Ph.D.
- Cosupervisor:** prof. Miroslav Premrov, Ph.D.
- Title:** Numerical modelling of experiments tests on timber-glass walls
- Document type:** Graduation Thesis – University studies
- Scope and tools:** 71 p., 81 fig., 10 tab.
- Keywords:** timber-glass panels, adhesives, finite element method, nonlinear analysis

Abstract:

In the thesis I used nonlinear finite element method in order to perform computer simulations of experimental tests on timber-glass walls (also called panels). The experimental tests were done by panels' producer, Kager Hiše d.o.o. in cooperation with the Faculty of Civil Engineering of the University of Maribor. Numerical simulations were performed by using commercial computer code SAP2000, which is designed for solving engineering structural problems. The responses of the adhesives were modeled by nonlinear three-axial spring finite elements, while timber and glass were modeled by linear elastic beam and shell finite elements. The geometrical nonlinear effects were taken into account. Special attention was given to get adequate force-displacement relations for adhesives. They were obtained by using available material experimental tests and by employing hyperelastic material models of Arruda-Boyce, Marlow and Ogden type. The adhesives were silicone, polyurethane and epoxy based. In order to reliably model the experimental tests, I paid a lot of attention to model the supported parts of each panel boundary, where the supporting steel elements damaged (compressed) the timber. The computed results were compared with the experimental ones and reasonable match between the two was observed. At the end of the thesis I presented distribution of internal forces in the adhesives, timber and glass.

ZAHVALA

Za vse koristne nasvete, pomoč, usmerjanje in spodbudo pri pisanju diplomske naloge se zahvaljujem prof. dr. Boštjanu Branku. Za koristne napotke in informacije se zahvaljujem Boštjanu Beru iz podjetja Kager hiše, d.o.o., Sari Piculin in doc. dr. Sebastjanu Bratini.

Posebna zahvala gre Janku, Marku A., Matjažu, Gorazdu, Marku S., Neli in vsem ostalim sošolcem ter prijateljem, ki so mi pomagali in me spodbujali v času študija.

Največja zahvala pa gre mami Melaniji, očetu Vilčiju in sestri Martini, ki so mi omogočili študij ter me pri tem vseskozi podpirali in spodbujali.

KAZALO VSEBINE

| | |
|---|------------|
| STRAN ZA POPRAVKE | I |
| IZJAVE | II |
| BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK | III |
| BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT | IV |
| ZAHVALA | V |
| 1 UVOD | 1 |
| 1.1 O montažni gradnji | 1 |
| 1.2 Les in montažne konstrukcije | 2 |
| 1.3 Računanje stenastih montažnih elementov | 3 |
| 1.4 Steklo in montažne konstrukcije | 4 |
| 1.5 Lepila (adhezivi) v leseno-steklenih montažnih elementih | 4 |
| 1.5.1 Silikonska lepila | 4 |
| 1.5.2 Poliuretanska lepila | 6 |
| 1.5.3 Epoksidna lepila | 8 |
| 1.6 Osnovna ideja metode končnih elementov | 9 |
| 1.7 Opis problema, ki ga obravnava naloga | 10 |
| 2 EKSPERIMENTALNO PRESKUŠENI LESENO-STEKLENI STENASTI MONTAŽNI ELEMENTI (PANELI) | 11 |
| 2.1 Osnovni podatki o preskusih | 11 |
| 2.2 Podatki o uporabljenem lesu, steklu in adhezivih (lepilih) | 14 |
| 2.3 Podpiranje panela med preizkusom in nanašanje sile | 15 |
| 2.4 Merjenje pomikov in deformacij | 16 |
| 3 HIPERELASTIČNI MODELI ADHEZIVOV | 19 |
| 3.1 Izbira materialnega modela s pomočjo programa Abaqus | 19 |
| 3.2 Arruda-Boyce hiperelastični materialni model za silikon Ködiglaze S | 23 |
| 3.3 Marlow hiperelastični materialni model za poliuretan Ködiglaze P | 25 |
| 3.4 Ogdenov hiperelastični materialni model za epoksi Körapox 558 | 27 |
| 4 MODEL ZA ANALIZO S KONČNIMI ELEMENTI | 30 |
| 4.1 Končni element za vzmeti v programu SAP2000 | 31 |
| 4.2 Določitev nelinearnih vzmeti za silikon Ködiglaze S in poliuretan Ködiglaze P | 32 |
| 4.3 Določitev nelinearnih vzmeti za epoksi Körapox 558 | 35 |
| 4.4 Podajanje vzmeti v programu SAP2000 | 37 |
| 4.5 Modeliranje gornje podpore | 38 |
| 4.6 Modeliranje vtiskovanja svornikov v les | 40 |
| 4.7 Modeliranje spodnje podpore | 41 |
| 4.8 Modeliranje podpor na različne načine | 42 |
| 4.8.1 Način podpiranja 1 | 42 |
| 4.8.2 Način podpiranja 2 | 43 |
| 4.8.3 Način podpiranja 3 | 43 |
| 4.8.4 Način podpiranja 4 | 44 |
| 5 REZULTATI ANALIZ ZA LESENO-STEKLENO STENO S SILIKONSKIM ADHEZIVOM | 45 |
| 5.1 Pomiki | 45 |
| 5.2 Napetosti v steklu | 46 |

| | | |
|-------------|---|-----------|
| 5.3 | Rezultati za spremenjeno strižno togost adheziva silikon Ködiglaze S | 47 |
| 6 | REZULTATI ANALIZ ZA LESENO-STEKLENO STENO S POLIURETANSKIM ADHEZIVOM | 50 |
| 6.1 | Pomiki | 50 |
| 6.2 | Napetosti v steklu | 51 |
| 6.3 | Rezultati za spremenjeno strižno togost adheziva poliuretan Ködiglaze P | 52 |
| 7 | REZULTATI ANALIZ ZA LESENO-STEKLENO STENO Z EPOKSIDNIM ADHEZIVOM | 54 |
| 7.1 | Pomiki | 54 |
| 7.2 | Napetosti v steklu | 55 |
| 7.3 | Rezultati s spremenjeno strižno togostjo adheziva epoksi Körapox 558 | 56 |
| 8 | NATANČNEJŠE MODELIRANJE VTISKOVANJA LESA PRAVOKOTNO NA VLAKNA | 58 |
| 8.1 | Primerjava pomikov za silikon Ködiglaze S | 60 |
| 8.1.1 | Pomiki s spremenjeno strižno togostjo adheziva silikon Ködiglaze S | 60 |
| 8.2 | Primerjava pomikov za poliuretan Ködiglaze P | 61 |
| 8.2.1 | Pomiki s spremenjeno strižno togostjo adheziva poliuretan Ködiglaze P | 61 |
| 8.3 | Primerjava pomikov za epoksi Körapox 558 | 62 |
| 8.3.1 | Pomiki s spremenjeno strižno togostjo adheziva epoksi Körapox 558 | 63 |
| 9 | PRIMERJAVA Z NATANČNEJŠO ANALIZO Z ABAQUSOM | 64 |
| 9.1 | Razlika med modeloma v SAP-u in Abaqus | 64 |
| 9.2 | Primerjava pomikov pridobljenih s programom SAP2000, Abaqusom in eksperimentom za adheziv silikon Ködiglaze S | 65 |
| 9.2.1 | Pomiki s spremenjeno strižno togostjo adheziva silikon Ködiglaze | 66 |
| 9.3 | Primerjava pomikov poskusov, programa SAP2000 in Abaqus za adheziv poliuretan Ködiglaze P | 66 |
| 9.3.1 | Pomiki s spremenjeno strižno togostjo adheziva poliuretan Ködiglaze | 67 |
| 10 | ZAKLJUČEK | 68 |
| VIRI | | 70 |

KAZALO PREGLEDNIC

| | |
|--|----|
| Preglednica 1.1 - Prednosti in slabosti silikona [10] | 5 |
| Preglednica 1.2 - Prednosti in slabosti poliuretana [10] | 7 |
| Preglednica 1.3 - Prednosti in slabosti epoksija [13] | 8 |
| Preglednica 2.1 - Karakteristike uporabljenega lesa C22 po [5] | 14 |
| Preglednica 2.2 - Karakteristike uporabljenega kaljenega stekla | 14 |
| Preglednica 3.1 - Materialne konstante dobljene s pomočjo programa Abaqus | 25 |
| Preglednica 3.2 - Materialne konstante, dobljene s pomočjo programa Abaqus | 28 |
| Preglednica 5.1 – Napetosti v steklu pri uporabi adheziva silikon Ködiglaze S | 46 |
| Preglednica 6.1 – Napetosti v steklu pri uporabi adheziva poliuretan Ködiglaze P | 51 |
| Preglednica 7.1 - Napetosti v steklu pri uporabi adheziva epoksi Körapox 558 | 55 |

KAZALO SLIK

| | |
|--|----|
| Slika 1.1 - Značilna kompozitna zgradba lesa na makroskopskem (zgoraj levo), mikroskopskem (zgoraj desno), sub-mikroskopskem (spodaj levo) in makro-molekularnem (spodaj desno) nivoju [7] | 2 |
| Slika 1.2 - Rezultati enoosnega nateznega poskusa silikona (Ködiglaze S) proizvajalca Kömmerling [18] | 6 |
| Slika 1.3 - Rezultati enoosnega nateznega poskusa poliuretana (Ködiglaze P) proizvajalca Kömmerling [18] | 7 |
| Slika 1.4 - Rezultati enoosnega nateznega poskusa epoksija Körapox 558 proizvajalca Kömmerling [18] | 9 |
| Slika 2.2 - Geometrija leseno-steklenega panela | 12 |
| Slika 2.3 - Detajl zasteklitve A (levo silikon in poliuretan, desno epoksi) | 13 |
| Slika 2.4 - Detajl zasteklitve B (levo silikon in poliuretan, desno epoksi) | 13 |
| Slika 2.5 - Jeklena pločevina in trije vijaki preko katerih je panel vpet v jekleni okvir (pridobljeno od Boštjana Bera) | 15 |
| Slika 2.6 - Spodnja podpora (pridobljeno od Boštjana Bera) | 15 |
| Slika 2.7 - Podpiranje leseno-steklenega panela med preizkušanjem. Desni rob je podprt tako, da preprečuje pomike izven ravnine panela | 16 |
| Slika 2.8 - Območje (Δz_g) na sliki zgoraj, in območje (Δs_p) na sliki spodaj, (pridobljeno od Boštjana Bera) | 16 |
| Slika 2.9 - Inštrumenti za merjenje vtiskovanja vijakov (na sliki zgoraj) in vtiskovanja pravokotno na vlakna venca (spodaj), (pridobljeno od Boštjana Bera) | 17 |
| Slika 2.10 - Rezultati meritev vtiskovanja lesa in jekla pravokotno na vlakna v spodnji podpori (moder diagram) in vtiskovanja vijakov v les (rdeč diagram), (pridobljeno od Boštjana Bera). | 17 |
| Slika 2.11 - Mesta meritev specifičnih deformacij. R – rozeta, SG – strain gage (pridobljeno od Boštjana Bera) | 18 |
| Slika 3.1 - Zavihek Property (Lastnosti) v programu Abaqus | 20 |
| Slika 3.2 - Zavihek Edit (Urejanje) v programu Abaqus | 20 |
| Slika 3.3 - Zavihek Edit Hyperelastic Material (Urejanje hiperelastičnega materiala) v programu Abaqus | 21 |
| Slika 3.4 - Izbira vrste razpoložljivih laboratorijskih podatkov | 21 |
| Slika 3.5 - Podatki v programu Abaqus | 21 |
| Slika 3.6 - Izvrednotenje rezultatov s programom Abaqus | 22 |
| Slika 3.7 - Izbira materialnega modela | 22 |
| Slika 3.8 - Načini testiranja materiala. Rezultati teh testov se podajo v zavihku na sliki 3.4 | 22 |

| | |
|--|----|
| Slika 3.9 - Odziv materialnega modela pri različnih pogojih obremenjevanja (slika 3.8) za silikon Ködiglaze S. Na abscisi so nominalne deformacije, na ordinati pa nominalne napetosti. Modra krivulja predstavlja podatke eksperimenta | 24 |
| Slika 3.10 - Nominalna strižna napetost v odvisnosti od nominalne strižne deformacije (silikon Ködiglaze S) | 25 |
| Slika 3.11 - Strižna deformacija vzorca materiala | 25 |
| Slika 3.12 - Odziv materialnega modela pri različnih pogojih obremenjevanja (glej sliko 3.8) za poliuretan Ködiglaze P. Na abscisi so nominalne normalne deformacije, na ordinati pa nominalne normalne napetosti. Modra krivulja predstavlja podatke eksperimenta | 26 |
| Slika 3.13 - Nominalna strižna napetost v odvisnosti od nominalne strižne deformacije za poliuretan Ködiglaze P | 27 |
| Slika 3.14 - Odziv materialnega modela pri različnih pogojih obremenjevanja (glej sliko 3.8) za epoksi Körapox 558 Na abscisi so nominalne normalne deformacije, na ordinati pa nominalne normalne napetosti. Modra krivulja predstavlja podatke eksperimenta | 28 |
| Slika 3.15 - Nominalna strižna napetost v odvisnosti od nominalne strižne deformacije za epoksi Körapox 558 | 29 |
| Slika 4.1 - Skica numeričnega modela za analizo po metodi končnih elementov. | 30 |
| Slika 4.2 - Skica osne in strižne vzmeti v vzmetnem končnem elementu, ki se razteza med vozliščema i in j [25] | 31 |
| Slika 4.3 - Definicija pomika osne vzmeti $u=d_{u1}$ in pomikov strižnih vzmeti $v=d_{u2}$ in $w=d_{u3}$ v vzmetnem končnem elementu, ki se razteza med vozliščema i in j [26] | 31 |
| Slika 4.4 - Prerez venca, adheziva in dela šipe (levo). Osna vzmet v pogledu (desno). | 33 |
| Slika 4.5 – Skica za določitev diagrama $F-u$; osna deformacija adheziva | 34 |
| Slika 4.6 - Prerez lesenega okvirja in dela šipe (levo). Strižna vzmet v pogledu (desno). | 34 |
| Slika 4.7 - Skica za določitev diagrama $V-v$. | 34 |
| Slika 4.9 - Diagrama $F - u$ in $V - v$ za poliuretan. | 35 |
| Slika 4.10 - Prerez lesenega okvirja in dela šipe (levo). Strižna vzmet v pogledu (desno). | 36 |
| Slika 4.11 - Skica za določitev vzmeti za strig vzdolž okvirja | 36 |
| Slika 4.12 - Strižna deformacija epoksija prečno na okvir | 37 |
| Slika 4.13 - Diagrama $V - v$ za epoksi v prečno na okvir (levo) in vzdolž okvirja (desno) | 37 |
| Slika 4.14 - Podajanje diagrama $F-u$ v programu SAP2000 | 38 |
| Slika 4.15 - Model konstrukcije za analizo v programu SAP2000. Vzmeti so podane tako, da je vozlišče i na težiščnici okvirja, vozlišče j pa na robu stekla. | 38 |
| Slika 4.16 - Modeliranje podpor | 39 |
| Slika 4.17 - Model gornje podpore | 39 |
| Slika 4.18 - Model gornje podpore: tloris | 39 |
| Slika 4.19 - Model za numerično analizo v programu SAP2000 | 40 |

| | |
|--|----|
| Slika 4.20 - Vzmet, ki modelira vtiskovanje v območju spodnje podpore | 42 |
| Slika 4.21 - Podpore z oznako T | 42 |
| Slika 4.22 - Podpore z oznako P | 43 |
| Slika 4.23 - Podpore z oznako P+J | 44 |
| Slika 5.1 - Diagram odnosa sila F - pomik u za različne modele (parametrična študija) za adheziv silikon Ködiglaze S | 45 |
| Slika 5.2 - Diagram primerjave odnosa sila F - pomik u parametrične študije in rezultatov poskusov za adheziv silikon Ködiglaze S | 46 |
| Slika 5.3 - Skica za določitev diagrama V - v | 47 |
| Slika 5.4 - Diagrama $F - u$ in $V - v$ za silikon Ködiglaze S, z upoštevanjem nelinearnih vzmeti opisanih pod točko 5.3 | 48 |
| Slika 5.5 - Diagram odnosa sila F - pomik u za različne modele (parametrična študija) za adheziv silikon Ködiglaze S, z upoštevanjem nelinearnih vzmeti opisanih pod točko 5.3 | 49 |
| Slika 5.6 - Diagram primerjave odnosa sila F - pomik u parametrične študije in rezultatov poskusov za adheziv silikon Ködiglaze S, z upoštevanjem nelinearnih vzmeti opisanih pod točko 5.3 | 49 |
| Slika 6.1 - Diagram odnosa sila F - pomik u za različne modele (parametrična študija) za adheziv poliuretan Ködiglaze P | 50 |
| Slika 6.2 - Diagram primerjave odnosa sila F - pomik u parametrične študije in rezultatov poskusov za adheziv poliuretan Ködiglaze P | 51 |
| Slika 6.3 - Diagrama $F - u$ in $V - v$ za poliuretan Ködiglaze P, z upoštevanjem nelinearnih vzmeti opisanih pod točko 5.3 | 52 |
| Slika 6.4 - Diagram odnosa sila F - pomik u za različne modele (parametrična študija) za poliuretan Ködiglaze P, z upoštevanjem nelinearnih vzmeti opisanih pod točko 5.3 | 53 |
| Slika 6.5 - Diagram primerjave odnosa sila F - pomik u parametrične študije in rezultatov poskusov za adheziv poliuretan Ködiglaze P, z upoštevanjem nelinearnih vzmeti opisanih pod točko 5.3 | 53 |
| Slika 7.1 - Diagram odnosa sila F - pomik u za različne modele (parametrična študija) za adheziv epoksi Körapox 558 | 54 |
| Slika 7.2 - Diagram primerjave odnosa sila F - pomik u parametrične študije in rezultatov poskusov za adheziv epoksi Körapox 558 | 55 |
| Slika 7.3 - Diagrama $V - v$ za epoksi Körapox 558 vzdolžno (levo) in prečno (desno) na okvir, | 56 |
| Slika 7.4 - Diagram odnosa sila F - pomik u za različne modele (parametrična študija) za adheziv epoksi Körapox 558, z upoštevanjem nelinearnih vzmeti opisanih pod točko 7.3 | 57 |
| Slika 7.5 - Diagram primerjave odnosa sila F - pomik u parametrične študije in rezultatov poskusov za adheziv epoksi Körapox 558, z upoštevanjem nelinearnih vzmeti opisanih pod točko 7.3 | 57 |

| | |
|--|----|
| Slika 8.1 - Vzmet vtiskovanja, ki jo uporabim v primeru uporabe adheziva silikon Ködiglaze S ali poliuretana Ködiglaze P. Za primerjavo sta dodani še funkciji vtiskovanja linearne vzmeti iz točke 4.7 in vzmet, ki sem jo uporabil pri analizi s programom Abaqus. | 59 |
| Slika 8.2 - Vzmet vtiskovanja, ki sem jo uporabil v primeru uporabe adheziva epoksi Körapox 558. Za primerjavo je dodana še funkcija vtiskovanja linearne vzmeti iz točke 4.7. | 59 |
| Slika 8.3 - Diagram primerjave odnosa sila F - pomik u parametrične študije in rezultatov poskusov za adheziv silikon Ködiglaze S, z upoštevanjem nelinearne funkcije vtiskovanja lesa in nelinearnih vzmeti določenih pod točko 4.2 | 60 |
| Slika 8.4 - Diagram primerjave odnosa sila F - pomik u parametrične študije in rezultatov poskusov za adheziv silikon Ködiglaze S, z upoštevanjem nelinearne funkcije vtiskovanja lesa in nelinearnih vzmeti določenih pod točko 5.3 | 61 |
| Slika 8.5 - Diagram primerjave odnosa sila F - pomik u parametrične študije in rezultatov poskusov za adheziv poliuretan Ködiglaze P, z upoštevanjem nelinearne funkcije vtiskovanja lesa in nelinearnih vzmeti določenih pod točko 4.2 | 61 |
| Slika 8.6 - Diagram primerjave odnosa sila F - pomik u parametrične študije in rezultatov poskusov za adheziv poliuretan Ködiglaze P, z upoštevanjem nelinearne funkcije vtiskovanja lesa in nelinearnih vzmeti določenih pod točko 5.3 | 62 |
| Slika 8.7 - Diagram primerjave odnosa sila F - pomik u parametrične študije in rezultatov poskusov za adheziv epoksi Körapox 558, z upoštevanjem nelinearne funkcije vtiskovanja lesa in nelinearnih vzmeti določenih pod točko 4.3 | 62 |
| Slika 8.8 - Diagram primerjave odnosa sila F - pomik u parametrične študije in rezultatov poskusov za adheziv epoksi Körapox 558, z upoštevanjem nelinearne funkcije vtiskovanja lesa in nelinearnih vzmeti določenih pod točko 7.3 | 63 |
| Slika 9.1 - Primerjava pomikov pridobljenih s poskusi, programom SAP2000 in Abaqus za adheziv silikon Ködiglaze S, ob upoštevanju nelinearne funkcije vtiskovanja lesa in nelinearnih vzmeti za adheziv določenih po postopku iz točke 4.2 | 65 |
| Slika 9.2 - Primerjava pomikov pridobljenih s poskusi, programom SAP2000 in Abaqus za adheziv silikon Ködiglaze S, ob upoštevanju nelinearne funkcije vtiskovanja lesa in nelinearnih vzmeti za adheziv določenih po postopku iz točke 5.3 | 66 |
| Slika 9.3 - Primerjava pomikov pridobljenih s poskusi, programom SAP2000 in Abaqus za adheziv poliuretan Ködiglaze P, ob upoštevanju nelinearne funkcije vtiskovanja lesa in nelinearnih vzmeti za adheziv določenih po postopku iz točke 4.2 | 66 |
| Slika 9.4 - Primerjava pomikov pridobljenih s poskusi, programom SAP2000 in Abaqus za adheziv poliuretan Ködiglaze P, ob upoštevanju nelinearne funkcije vtiskovanja lesa in nelinearnih vzmeti za adheziv določenih po postopku iz točke 5.3 | 67 |

>> Ta stran je namenoma prazna<<

1 UVOD

1.1 O montažni gradnji

Montažne gradnje so v sodobni družbi postale atraktivne z razvojem novih materialov, konstrukcijskih sistemov in načinov gradnje. Za razliko od klasične gradnje, se pri montažni gradnji uporablja elemente, ki so proizvedeni v obratu in so na gradbišču samo sestavljeni skupaj. Ker so montažni elementi proizvedeni v kontroliranih pogojih, je možnost napak pri izdelavi prefabriciranih elementov manjša kot pri klasični gradnji na terenu. Ker gre za prefabricirane elemente, so lahko pripravljene tudi na zalogo in skladiščene, kar predstavlja pomemben dejavnik pri hitrosti gradnje. V večini primerov traja postavitve montažne hiše nekaj mesecev, lahko tudi samo en mesec, pri čemer je natančnost gradnje velika.

Montažna gradnja se dolgo ni uveljavila, saj montažni objekti niso ponujali takšnih bivalnih pogojev kot klasično grajeni objekti. Zato so se proizvajalci montažnih objektov usmerili v iskanje možnosti, da bi montažne gradnje bolj zaživele in ne bi zaostajale za klasično grajenimi objekti zaradi nekaterih svojih slabosti. S primerno zasteklitvijo (ki so jo dopolnili z nizko-energetskimi premazi, uporabo žlahtnih plinov ali z večplastno zasteklitvijo, kar vse preprečuje pregrevanje objekta pri sončnih pribitkih in nudi toplotno izolacijo v zimskem času), primernim razmerjem med steklenimi in ne steklenimi površinami, primerno orientacijo objekta, uporabo prijaznih materialov (lesa, stekla, jekla), so proizvajalci dosegli, da montažni objekti postajajo vse bolj priljubljeni. Zaradi hitre in tudi kvalitete gradnje, nižjih stroškov montažne gradnje glede na klasično gradnjo, dobrih bivalnih razmer, pa tudi možnosti hitrih sprememb ali dograditev objekta, postaja montažna gradnja vse bolj konkurenčna. S konstrukcijskega vidika velja pri montažni gradnji omeniti prehod iz malo panelnega okvirnega/stenastega sistema v veliko panelni okvirni/stenasti sistem. To je prineslo hitrejšo montažo (zaradi manjšega števila elementov) in večjo togost montažnih konstrukcij (zaradi manjšega števila veznih sredstev).

Pri lesenih montažnih sistemih se uporabljajo različna polnila. To so lahko npr. mavčno-vlaknaste plošče (MVP) [17], plošče z usmerjenim iverjem (OSB) [14] ali pa kar steklene šipe. Pri tem se je treba spomniti, da je steklo neduktilno, kar pomeni da počí, ko je kje v steklu dosežena njegova natezna trdnost. Steklo pri pokanju sipa zelo malo energije. Zato je pri montažnih elementih s steklom potrebno pozornost posvetiti ustreznim stikom med montažnimi elementi, ki naj bi bili projektirani tako, da bi lahko sipali energijo pri ekstremnih obtežbah. Vsako polnilo ima svoje prednosti in slabosti: nekatera so bolj duktilna, druga bolj krhka; nadalje so nekatera bolj toga, druga ustvarjajo boljše toplotno izolativne pogoje, in podobno. V ta namen je za posamezno polnilo potrebno izvesti ali eksperimentalne preskuse ali pa primerno kombinacijo numeričnih analiz in eksperimentalnih preskusov. Z numeričnimi preskusi montažnih leseno-steklenih stenastih panelov se ukvarjam v svoji diplomski nalogi.

1.2 Les in montažne konstrukcije

Zaradi svoje dostopnosti in nedosegljivosti drugih materialov je bil les, vse do odkritja opisa rimskega betona v švicarskem samostanu v začetku 15. stoletja [4], skupaj s kamnom in opeko, najpomembnejši material za gradnjo objektov. Po iznajdbi armiranega betona v 19. stoletju, se je uporaba lesa v gradbene namene precej zmanjšala. Zaradi večje ekološke ozaveščenosti in želje po trajnostnem razvoju, naravni materiali, med njimi tudi les, doživljajo ponovni razcvet v gradbeništvu. Pozitivne lastnosti lesa, kot so: »zmožnost dihanja«, odsotnost elektrostatičnega naboja, sorazmerno dobra izolativnost, prijetnost na dotik, in druge ugodne mehanske in vizualne lastnosti, mu dajejo prednost v primerjavi z drugimi materiali.

Za les sta značilni heterogenost in anizotropnost, ki sta posledica pestre zgradbe in značilnega plastnega priraščanja v najrazličnejših pogojih. Zaradi tega je spekter uporabe lesa zelo širok. Če želimo izkoristiti dobre mehanske in fizikalne lastnosti lesa, moramo poznati njegovo zgradbo, saj ravno ta povzroča specifične odzive [7]. Velike razlike v gostoti med različnimi tipi konstrukcijskega lesa, so posledica različnega deleža celičnih sten in njegove poroznosti. Gostota varira od 100-130kg/m³ (kar je zadostno za mehansko oporo drevesu) do 1200-1400kg/m³, kar je primerna gostota za omogočanje kapilarnega dviga [7].



Slika 1.1 - Značilna kompozitna zgradba lesa na makroskopskem (zgoraj levo), mikroskopskem (zgoraj desno), sub-mikroskopskem (spodaj levo) in makro-molekularnem (spodaj desno) nivoju [7]

Krčenje oz. nabrekanje lesa, ki sta posledica spreminjanja stopnje vlažnosti, štejemo med najbolj neugodne lastnosti lesa. Še posebej je neugoden pojav krčenja, pri katerem se zaradi vlažnostnega gradienta v elementih pojavijo dodatne napetosti, ki lahko povzročijo razpokanje. Vlažnost je zelo pomemben dejavnik v fazi vgradnje lesa. Vlažnost lesa in okolja se pri vgraditvi ne smeta razlikovati, če se hočemo izogniti dimenzijskim in oblikovnim spremembam. Tudi kasnejše večje spremembe vlažnosti lesa in okolja niso zaželene. Čeprav nihanja vlažnosti v okolju in lesu ne moremo predvideti vnaprej, lahko krčenje in nabrekanje omilimo. To lahko naredimo tako, da ohranjamo konstantne temperaturne in vlažnostne pogoje, uporabimo stabilnejše lesne vrste, pazimo na pravilen postopek vgradnje, les zaščitimo z različnimi premazi ali primerno kemično obdelamo [7].

Mehanske karakteristike lesa obravnavamo, podobno kot pri ostalih konstrukcijskih materialih, v območju sobnih temperatur in sobnih vlažnosti. Zaradi celične zgradbe so deformacije lesenih elementov odvisne tudi od lesne vlažnosti, temperature in drugih dejavnikov. Vpliv reologije zajamemo z zmanjšanjem trdnosti lesa, ki je empirično določena glede na časovno obdobje. Porušitev lesenega elementa je postopna, hipna se lahko zgodi le pri lesu s krajšimi vlakni [7]. Poznavanje dejstva, da se trdnost lesa lahko spreminja, je pomembno [7].

Glavne značilnosti sodobne montažne gradnje iz lesa so: uporaba naravnih materialov, energijska varčnost objektov, dobro življenjsko udobje, uporaba novejših tehnologij na področju zaščite lesa, uporaba novih tehnologiji lesene gradnje. Zaradi novih načinov zaščit, ki lesu omogočajo ohranjanje primerne trdnosti v primeru požara, je les postal primeren gradbeni material tudi za večetažne objekte. Pred tem to ni bilo možno, saj je bilo število etaž omejeno zaradi požarne varnosti [1], [4], [7]. V splošnem se montažna gradnja vse bolj usmerjena k uporabi naravnih in ekološko neoporečnih materialov [1]-[5].

1.3 Računanje stenastih montažnih elementov

Pri montažni gradnji iz lesa so lahko glavni elementi nosilne konstrukcije stenski elementi (imenovani paneli), sestavljeni iz lesenega okvirja in različnih polnil. Na obnašanje ter nosilnost tovrstnih konstrukcij vplivata [5]:

- obnašanje in nosilnost panelov kot osnovnih nosilnih elementov,
- medsebojno povezovanje panelov.

Standard Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij – 1-1. Del: Splošna pravila in pravila za stavbe (SIST EN 1995-1-1) za statično analizo podaja dve poenostavljeni metodi, pri katerih posamezni panel analiziramo kot konzolo [5]. Pri tem dejanske robne pogoje aproksimiramo s tlačno in natezno podporo [5]. Poenostavljeni metodi sta bili vpeljani, ker je natančnejša računska analiza tovrstnih sistemov zelo zahtevna, saj mora upoštevati sovprežno delovanje lesenega okvirja in izbranega polnila ter medsebojno delovanje panelov. Obe poenostavljeni metodi temeljita na predpostavki, da pride do strižne porušitve veznih sredstev zaradi njihove plastifikacije [5]. Nacionalni dodatek k SIST EN 1995-1-1 navaja, da poenostavljeni metodi nista primerni za določitev nosilnosti panelnih sten z mavčno-vlaknenimi obložnimi ploščami. V tem primeru je potrebno uporabiti računske modele, s katerimi zajamemo vpliv popustljivosti veznih sredstev med obložnimi ploščami in lesenim okvirjem ter tudi razpoke v natezni coni mavčnih obložnih plošč [5].

Za steklena polnila, SIST EN 1995-1-1 (niti kakšen drugi standard) ne podaja navodil za statično analizo in tudi ne, kako takemu panelu in celotnemu stenskem sistemu določimo projektno nosilnost. Za to je krivo pomanjkanje izkušenj in raziskovalnih projektov na tem področju; še posebej o lepljenih spojih med stekleno šipo in lesenim okvirjem. Mnogokrat se vpliv stekla k togosti in nosilnosti panela zanemari, čeprav v sovprežnem delovanju z lesenim okvirjem prispevajo tako k nosilnosti kot k

togosti panela. Pri tem imata pomemben vpliv lepilo in način vpetja stekla v okvir. Steklo je v leseno-steklenem panelu obremenjeno tako v svoji ravnini, kot tudi pravokotno nanjo.

Ker SIST EN 1995-1-1 ne podaja metod za kontrole leseno-steklenih panelov in sistemov, proizvajalci svoje izdelke preverijo z eksperimenti, kar je lahko zamudno, zahteva raznovrstne priprave in je navsezadnje tudi drago. Temu se lahko izognemo s pripravo ustreznega numeričnega modela na podlagi nekaj opravljenih eksperimentov. S primernim numeričnim modelom bi lahko analizirali (z malo stroški ter dovolj hitro in natančno) poljubno velike panele s steklenimi polnili in poljubne sisteme panelov. Možno bi bilo izvesti tudi optimizacijo in poiskati boljše tehnološke rešitve. Pri tem bi morali opisati obnašanje osnovnih materialov panela, ki so les, steklo in adhezivno sredstvo (lepilo) - slednje ima najpomembnejši vpliv na obnašanje panela. Cilj diplomske naloge je preveriti, če je numerični model, opisan v nadaljevanju, primeren za analize leseno-steklenih panelov.

1.4 Steklo in montažne konstrukcije

Z razvojem materialov in novih konstrukcijskih sistemov, ki omogočajo večje razpone in odprtine, se je pojavila želja po odprtih in svetlih prostorih, ki dobro vplivajo na človekovo produktivnost in zdravje. Steklo je tako postalo zelo pomembno v arhitekturi objektov. Mnogokrat pa je prezrto, da je steklo vsaj deloma tudi nosilni material, poleg tega da omogoča komunikacijo z zunanjo okolico in prepušča svetlobo. Steklo se uporablja za fasadno oblogo, za predelne stene, v zadnjem času pa tudi kot sestavni del nosilnih konstrukcijskih elementov (sten in nosilcev) [21].

Za razliko od lesa je steklo izotropen material, kar pomeni da se v vseh smereh obnaša enako. Tlačna trdnost je bistveno večja od tlačne trdnosti lesa in čeprav je natezna trdnost bistveno manjša od tlačne, je še vedno nekoliko večja kot pri lesu. Je pa, za razliko od lesa, steklo neduktilen, krhek material, kar pomeni, da hipno počni, ko je v njem dosežena natezna trdnost. V fazi projektiranja steklenih ali leseno-steklenih elementov, je zato potrebno upoštevati dejstvo, da bo morebitna porušitev hipna. Vzrok krhkega obnašanja stekla tiči v njegovi zgradbi. Steklo preide iz tekočega v trdno stanje brez kristalizacije. Vezi med sosednjimi molekulami so šibke, mestoma celo prekinjene [8]. Steklo je produkt taljenja kremenca ali produkt taljenja silicijevega dioksida z drugimi oksidnimi primesmi. Iz kremenčevega peska se dobi 74% steklene mešanice, sode je 12%, apna 8% in 6% ostalih sestavin, ki steklo dajejo dodatne lastnosti, kot so barvitost, reagiranje na svetlobo, nosilnost itd. [4]

1.5 Lepila (adhezivi) v leseno-steklenih montažnih elementih

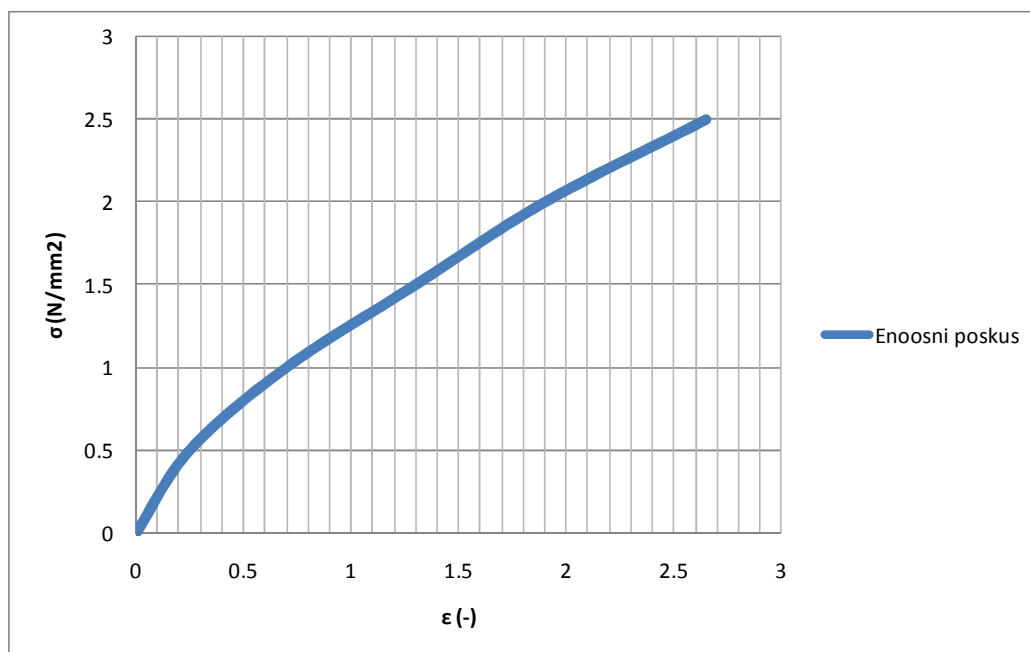
1.5.1 Silikonska lepila

Silikoni so polimerne spojine silicija z ogljikom, vodikom in kisikom. Prav spajanje anorganskih in organskih kemijskih elementov v polimerskih verigi daje silikonu ugodne lastnosti. Silikonsko vezivo se uporablja na veliko področjih, predvsem zaradi stabilnosti materiala in specifičnih mehanskih lastnosti. Najdemo jih v obliki tekočine, lepil, gnetljive smole in gume. Silikon lahko za

krajše časovno obdobje uporabljamo pri razponu temperature od -100°C do 350°C ne da bi spremenil mehanske lastnosti [9]. Njegova uporaba se je sprva razširila na vesoljsko in elektro industrijo, kasneje tudi na gradbeništvo [10]. S pojavom nevtralnega (eno-komponentnega) silikona se je njegova uporaba pri izolacijskih steklih in v gradbene namene zelo razširila, saj se je predhodno težja uporaba silikona pokazala kot popolnoma izvedljiva [10]. Suh (posušen) silikon ima nelepljivo površino, kar ga naredi uporabnega za oblogo poliuretanu, epoksiju in drugim plastičnim vezivom, sposobnim močnih adhezivnih površinskih povezav [10].

Preglednica 1.1 - Prednosti in slabosti silikona [10]

| Prednosti | Slabosti |
|--|---|
| Eno- ali dvo-komponentno vezivo | Drag |
| Na voljo v več barvah | Težko odstranjevanje odvečnega silikona |
| Odpornost na visoke temperature | Slaba natezna odpornost |
| Dobra uporabnost pri nizkih temperaturah | Neprijeten vonj pri tesnilih na osnovni acetoksija |
| UV odpornost | Kratek čas obdelave |
| Visoka obnovljivost | Kratek čas sušenja |
| Ni krčenja | Potreben temeljni premaz |
| Barvna stabilnost | Potrebna dobra priprave površine nanosa; ne na vlažno, nečisto površino ali v neprijaznem vremenu |
| Majhen vpliv časa in temperature na mehanske lastnosti | Določeni tipi silikona neprimeni za aluminjaste površine |
| Konstantna trdnost skozi čas in temperaturo | Neprijetno za mesta, ki so dlje časa izpostavljena vodi |
| Odlična požarna odpornost | |
| Trajnost več kot 20 let | |
| Kemijska stabilnost | |



Slika 1.2 - Rezultati enoosnega nateznega poskusa silikona (Ködiglaze S) proizvajalca Kömmerling [18]

1.5.2 Poliuretanska lepila

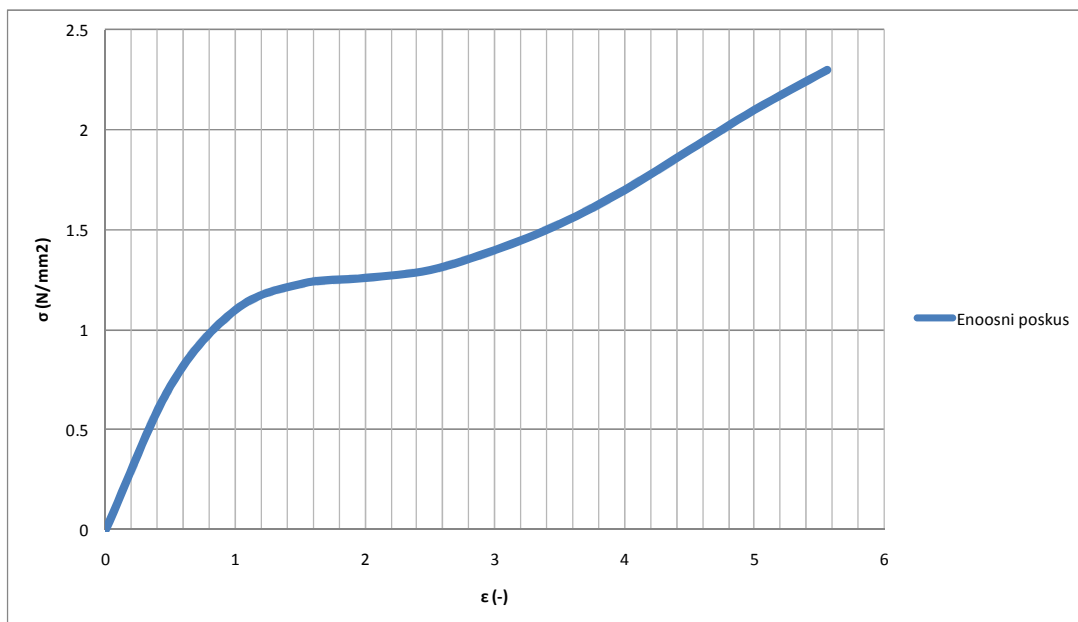
V zadnjih letih se je uporaba poliuretanskih veziv v konstrukcijah skokovito povečala, predvsem zaradi širokega spektra »variacij« tega materiala. Uretanski polimeri so med najbolj pogosto uporabljenimi tako pri novogradnjah kot pri sanacijskih delih [10]. V novejših gradnjah se poliuretan uporablja kot vezivo in tesnilo sredstvo. Uporablja se ga na mestih kjer se je potrebno izogniti vdoru zraka, vode, pare, zvoka, vonjev in insektov. Uspešno tesnjenje lahko dosežemo z izbiro ustrezne tesnilne mase glede na zahteve in specifičnosti okolja, kateremu bo poliuretan izpostavljen. Vsi uretanski predpolimeri so proizvedeni z reakcijo poliizocianata s poliolum v prisotnosti katalizatorja, kar privede do stabilnih kemičnih vezi, ki tvorijo uretanske polimere [10]. Z uporabo različne stopnje kvalitete polimerov, lahko bistveno vplivamo na sam potek reakcije in s tem tudi na končne lastnosti poliuretana. Polimere lahko združimo še z ostalimi surovimi materiali, tako da dobimo želeni končni rezultat.

Glavne posebnosti poliuretana so: visoka stopnja obrabe, ki je 3-5 krat večja od gume, velika prožnost, vzdržljivosti (20-25 krat večja od gume), visoka odpornost proti lomljenju in utrujanju, velika prijemnost s kovinami (trdnost poliuretana-kovine je precej večja kot pri gumi-kovini), izolativnost vibracij in elastičnost pri nizkih temperaturah [11]. Poliuretanski izdelki imajo prednost v primerjavi s primerljivimi izdelki iz gume, plastike ali celo kovin v območju med -60°C do 100°C [11]. Zgornja temperaturna meja uporabe pri nenehnih dinamičnih obremenitvah je 120°C [11]. Lastnosti poliuretana se pri nizkih temperaturah nekoliko spremenijo. Pojavijo se spremembe

elastičnosti in trdnosti materiala pri temperaturi -18° [11]. Pri temperaturi od -60°C do -80°C postane krhek [11].

Preglednica 1.2 - Prednosti in slabosti poliuretana [10]

| Prednosti | Slabosti |
|--|--|
| Stiki do velikosti 150 mm | Svetle barve se lahko razbarvajo |
| Odpornost na ozon | Slaba odpornost v primeru potopitve v vodo |
| Ne pušča madežev | Omejene lastnosti pri povišani temperaturi |
| Hitro sušenje | Ni priporočljiv za vlažne stike |
| Zanemarljivo krčenje | Zahteva predpripravo površine |
| Odlična odpornost na vremenske razmere | Eno-komponentni zahtevajo negovanje dlje časa |
| Odlična trajnost (20 do 30let) | Ni priporočljiva uporaba v območju prometnih površin |
| Možnost barvanja | Različni dodatki povzročijo velike razlike pri obnašanju |



Slika 1.3 - Rezultati enosnega nateznega poskusa poliuretana (Ködiglaze P) proizvajalca Kömmerling [18]

Poliuretani so zelo dobri vodni izolatorji [11]. Za izboljšanje njihovih fizikalno-mehanskih lastnosti, se lahko uporabi dodatke. S poskusi je bilo pokazano, da poliuretanski elastomeri različno kemično

reagirajo z različnimi kemičnimi reagenti. Hitro se uniči v kontaktu z acetonom, dušikovo kislino, spojino ki vsebuje velik delež klora, formaldehidom, mravljično in fosforno kislino [10], [11].

1.5.3 Epoksidna lepila

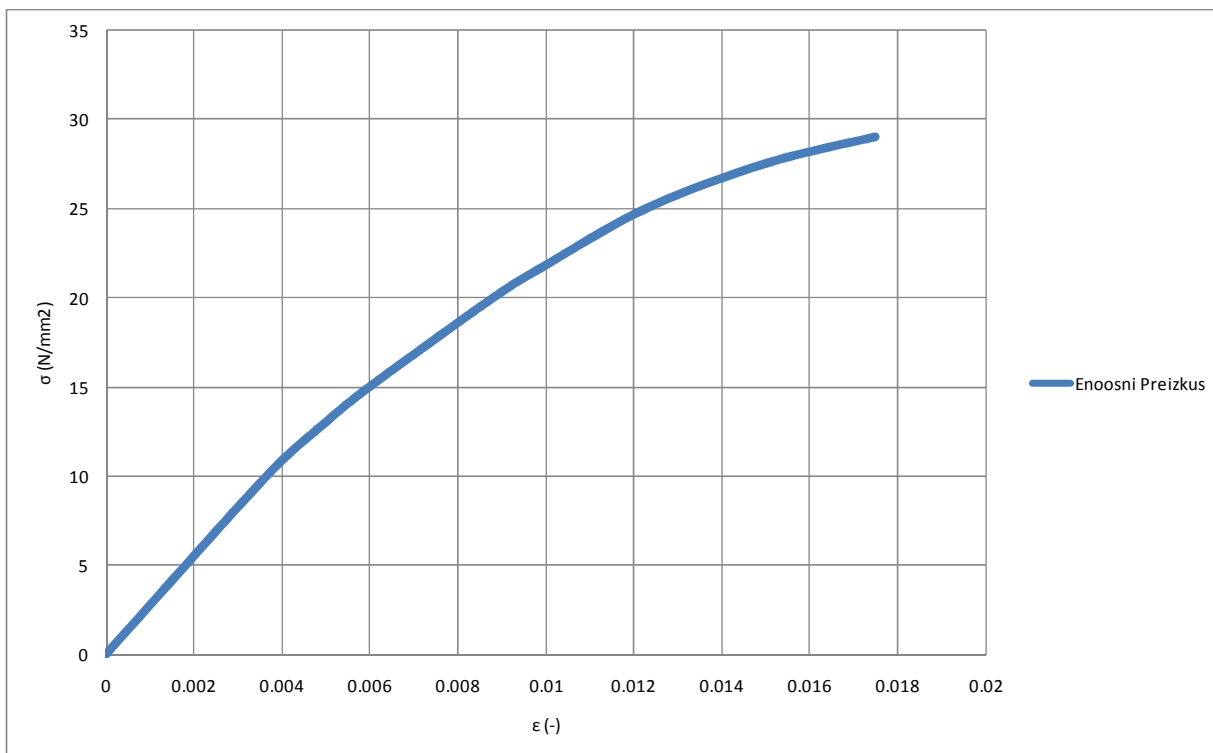
Epoksi ima lahko različne mehanske lastnosti. Lahko naredimo mehek, zelo podajen epoksi ali pa trdega, zelo togega [12]. Mehkejše lahko uporabimo kot tesnila, trdnejše pa kjer potrebujemo visoko togost. Običajno je epoksi strižno obremenjen. Polimerna struktura epoksija omogoča njegovo elastično obnašanje [12]. Epoksi je toplotno obdelan polimer, zato se pri visokih temperaturah obnaša drugače od termoplastičnih materialov (to so materiali, ki postanejo pri določeni temperaturi zelo deformabilni in gnetljivi, po ohladitvi pa se vrnejo v trdno obliko) [12]. Epoksi pri temperaturi prehoda iz trdne v »gumijasto« obliko T_g postane mehkejši, polimerne verige, ki tvorijo epoksi, pa ohranijo obliko in adhezijske sposobnosti [12]. Epoksi se uporablja tudi pri višji temperaturi od T_g in to z odličnimi rezultati [12]. Pri povišanju temperature se ustvari več prostega volumna za gibanje polimernih verig, kar povzroči zmanjšanje modula elastičnosti in povečanje koeficienta toplotnega raztezka.

Preglednica 1.3 - Prednosti in slabosti epoksija [13]

| Prednosti | Slabosti |
|--|--|
| Visoka kemijska odpornost | Oksidacija in slaba odpornost na vlago |
| Odpornost na visoke temperature | Modifikacije epoksija so relativno drage |
| Široka uporabnost | |
| Visoka trdnost | |
| Odpornost na velike temperaturne amplitude | |
| Majhno deformiranje | |
| Korozivna odpornost | |
| Električni izolator | |

Zaradi svoje krhkosti se neojačni epoksi uporablja samo v določenih primerih. Epoksi se lahko utrdi s steklenimi, ogljikovimi in drugimi vlakni. Epoksi je med najbolj uporabljenimi veznimi sredstvi, kljub temu da se kaže kot zelo tog in krhek material. Elastičnost materiala se s primerno pripravo lahko poveča, ne da bi se natezna trdnost zmanjšala [12]. Kot vezivo lahko uspešno delujejo tako pri sobnih

kot povišanih temperaturah ter tako pri suhih kot vlažnih pogojih. Čeprav je kot vezivo dražji od primerljivih veznih sredstev, je razmerje cena-lastnosti še vedno zelo dobro [10], [12].



Slika 1.4 - Rezultati enoosnega nateznega poskusa epoksija Korapox 558 proizvajalca Kömmerling [18]

1.6 Osnovna ideja metode končnih elementov

V današnjem času so računalniki in ustrezna programska oprema neprecenljivo orodje za reševanje inženirskih problemov. Za analizo problema moramo najprej narediti ustrezen numerični model. Pri tem igra pomembno vlogo inženirska presoja, dobro poznavanje lastnosti materialov ter poznavanje obnašanja konstrukcij in njenih delov ter interakcij med njimi. Na podlagi tega lahko naredimo ustrezen numerični model, ki bo dovolj natančno opisal resničen odziv konstrukcije. Poenostavitve pri numeričnem modeliranju so vedno potrebne. Pri njihovem izbiranju moramo biti pazljivi in premišljeni. V ta namen se poslužujemo razpoložljivih eksperimentalnih preiskav, ki jih skušamo uskladiti z numeričnimi modeli. To nam omogoča uporabo predpostavk, za katere vemo, da so v skladu z realnim odzivom materialov in konstrukcij.

Sposobni računalniki so omogočili, da je metoda končnih elementov (MKE) izpodrinila uporabo diferenčne metode in drugih podobnih metod za analizo konstrukcij, ter postala vodilna metoda za numerično reševanje problemov v mehaniki konstrukcij. Kljub temu, da gre pri MKE za približno reševanje (parcialnih) diferencialnih enačb, je natančnost rešitve pri njeni pravilni uporabi zelo velika. Pri MKE konstrukcijo razdelimo oziroma diskretiziramo na končno število elementov. Med seboj so povezani v določenem številu točk, ki jih imenujemo vozlišča. V vozlišču so pomiki in zasuki za vse

tam stikajoče se elemente enaki. Tako sistem z neskončno mnogo prostostnimi stopnjami nadomestimo z diskretnim sistemom s končnim številom prostostnih stopenj. To pomeni, da ne obravnavamo več problema s področja analize, ampak z algebre: reševanje diferencialnih enačb nadomestimo s sistemom algebrajskih enačb.

Standardna enačba končnega elementa za linearno elastičen problem je:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F}$$

kjer je \mathbf{K} togostna matrika elementa, \mathbf{U} vektor vozliščnih pomikov in \mathbf{F} vektor pripadajočih vozliščnih sil. Togostno matriko elementa določimo z enačbo:

$$\mathbf{K} = \int_V \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{B} \cdot dV$$

kjer je \mathbf{D} matrika elastičnih konstant in \mathbf{B} matrika, ki povezuje specifične deformacije $\boldsymbol{\varepsilon}$ in vozliščne pomike \mathbf{U}

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{U}$$

Pomike po elementu \mathbf{u} aproksimiramo z interpolacijskimi oziroma oblikovnimi funkcijami \mathbf{N}

$$\mathbf{u}(x, y, z) = \mathbf{N}(x, y, z) \cdot \mathbf{U}$$

Izbira interpolacijskih funkcij \mathbf{N} pomembno vpliva na rezultate računa. Členi matrike \mathbf{N} so odvisni od geometrije oz. oblike elementa, števila vozlišč elementa in števila prostostnih stopenj v vozlišču [14].

1.7 Opis problema, ki ga obravnava naloga

Tema diplomske naloge je numerična simulacija eksperimentalnih preskusov na leseno-steklenih stenastih panelih, ki so bili izvedeni na Fakulteti za gradbeništvo Univerze v Mariboru [3]. Izvedene so bile raziskave horizontalne nosilnosti panelnih stenastih elementov s stekleno šipo, ki je z različnimi lepili pritrjena na leseni okvir. Kot lepila so bili uporabljeni dvo-komponentni silikon Ködiglaze S, eno-komponentni poliuretani Ködiglaze P ter dvo-komponentni epoksi Körapox 558 proizvajalca Kömmerling [18].

Poudariti velja, da gre za zelo kompleksen in zahteven problem, saj je potrebno upoštevati več različnih, včasih tudi težko določljivih parametrov, ki se tudi nelinearno obnašajo (adheziv, vtiskanje lesa).

Posebnost mojega numeričnega modela je, da sem uporabil linijske končne elemente za modeliranje lesenega okvirja, lupinaste končne elemente za modeliranje steklene šipe ter vzmeti za modeliranje adheziva.

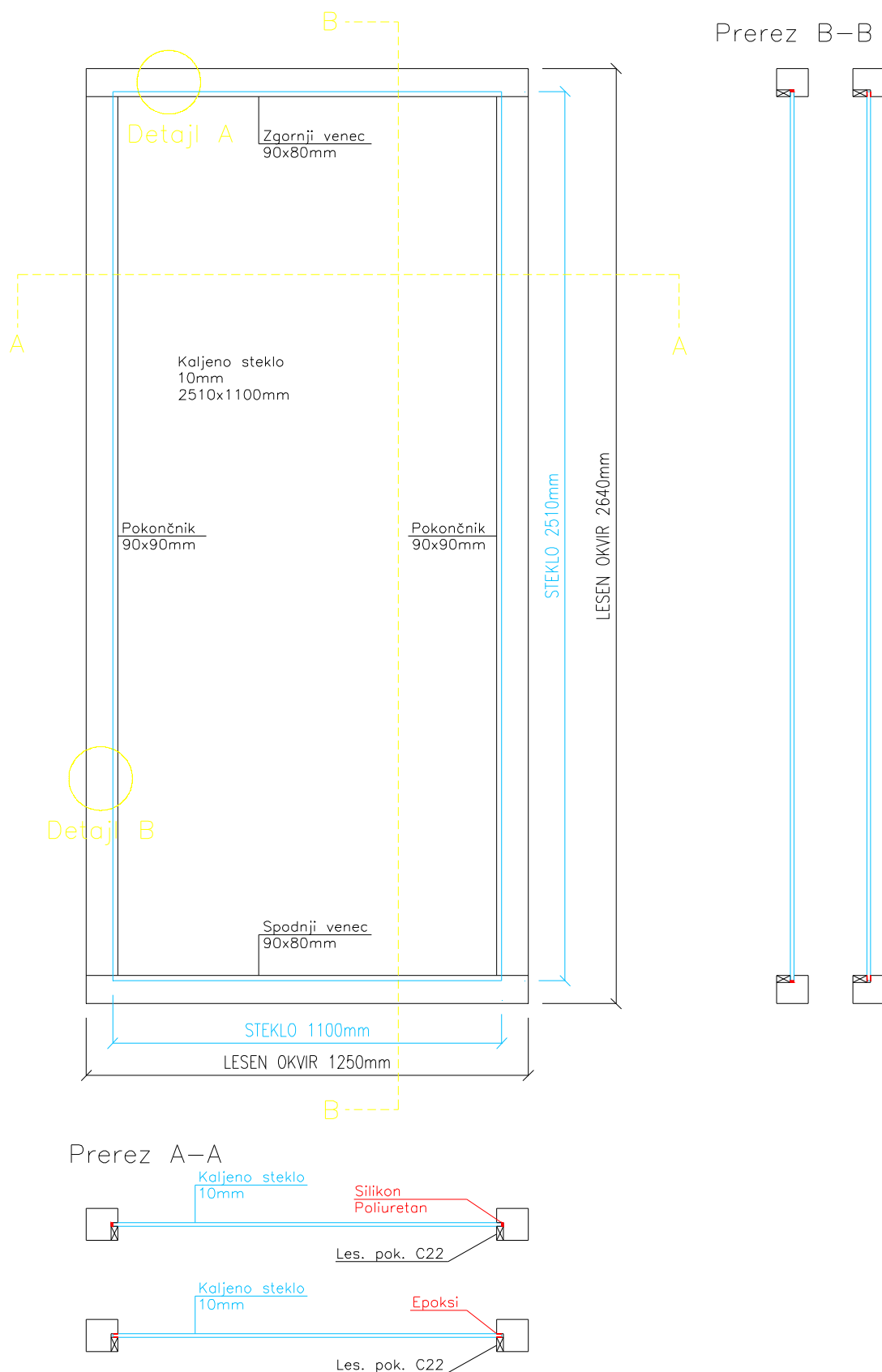
2 EKSPERIMENTALNO PRESKUŠENI LESENO-STEKLENI STENASTI MONTAŽNI ELEMENTI (PANELI)

2.1 Osnovni podatki o preskusih

Leseni okvir preizkušancev je imel zunanje mere 1250/2640 mm (slika 2.1), kar je standardna mera stenastih panelov, ki so bili že testirani z različnimi vrstami obložnih plošč [3]. Leseni okvir je bil sestavljen iz dveh pokončnikov dimenzij 90/90 mm in dveh vencev dimenzij 90/80 mm. Prerez lesenega okvirja je bil sprva L oblike. Ko je bilo adhezivno sredstvo (lepilo) nanešeno na stekleno šipo iz kaljenega stekla zunanjih mer 1100/2510 mm in debeline 10 mm (slika 2.1), so se na steklo prilepili elementi okvirja, ki so imeli L profil. Stik pokončnika in venca je bil izveden z dvema lesnima vijakoma 6/160 tipa HBS proizvajalca Rothoblaas (slika 2.2). Nato so se na L profil privijačile lesene letvice, ki so vpele stekleno ploščo v lesen okvir in dale pokončnikom in vencema zgoraj omenjene končne dimenzije 90/90 mm in 90/80 mm. Plast adheziva je imela dimenzije 10/5 mm za dvo-komponentni silikon Ködiglaze S in eno-komponentni poliuretani Ködiglaze P (sliki 2.3 in 2.4) ter 15/0,5 mm za dvo-komponentni epoksi Körapox 558. Pri slednjem je bilo steklo prilepljeno na okvir z dvema plastema epoksija (sliki 2.3 in 2.4).

Kot omenjeno, so bile dimenzije preizkušenih panelov, ki jih je izdelalo podjetje Kager Hiše d.o.o., privzete glede na do sedaj opravljene preizkuse nosilnosti lesenih panelov istega podjetja z drugačnimi oblogami (polnili), kot so recimo mavčno-vlaknaste plošče (MVP) in plošče z usmerjenim iverjem (OSB). Pričakuje se, da bo to omogočilo primerjanje rezultatov nosilnosti panelov z različnimi polnili in različnimi načini povezovanja polnil z lesnim okvirjem. V splošnem pa dimenzije okvirja, polnila in adhezivnih sredstev niso takšne kot pri realnih leseno-steklenih panelih, predvsem zaradi omejitve naprave za preizkušanje na Fakulteti za gradbeništvo Univerze v Mariboru, ki ne omogoča testiranja večjih elementov.

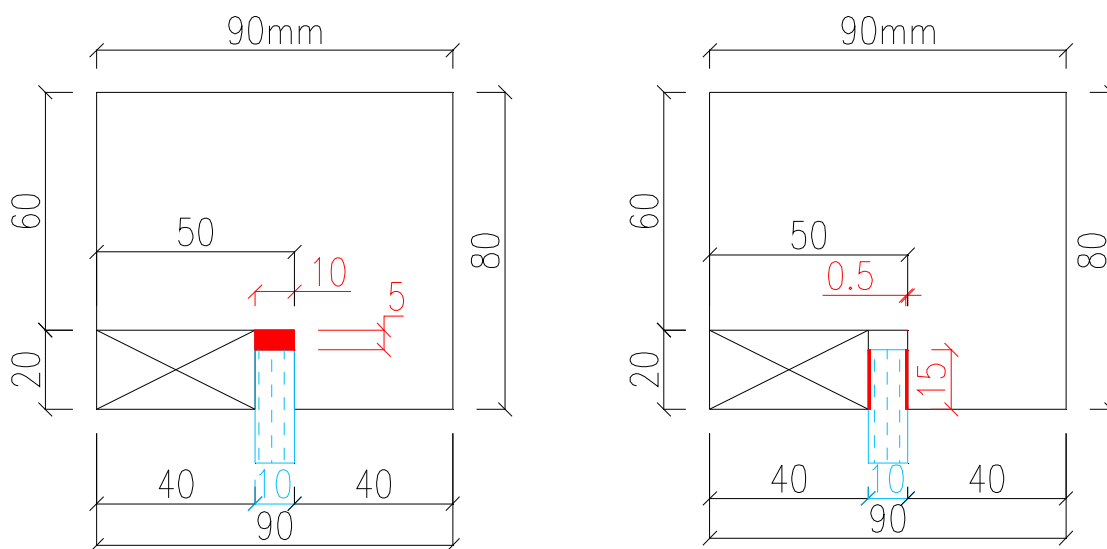
Povečana zasteklitev na južni in zahodni strani montažnih objektov povečuje solarne pribitke in s tem možnost pasivnega ogrevanja objektov. Ker pa se leseno-stekleni stenski paneli ne smejo upoštevati kot nosilni elementi [6], se pri statični analizi tovrstnih objektov pojavi tlorisna nepravilnost, saj se kot nosilni elementi upoštevajo samo elementi na severni in vzhodni strani. Cilj omenjenih preiskav je določiti horizontalno nosilnost lesenosteklenih stenskih panelov, da bi jih lahko upoštevali kot (delno) nosilne elemente na horizontalno obtežbo [3], [6].



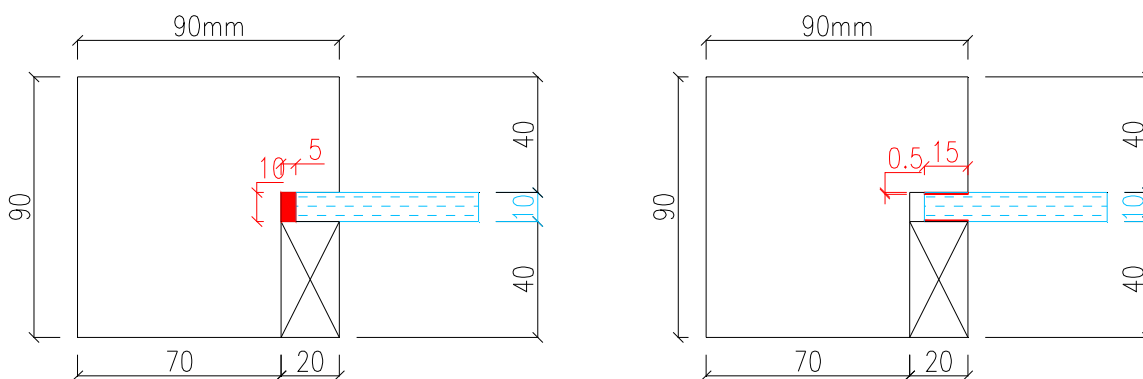
Slika 2.1 - Geometrija leseno-steklenega panela



Slika 2.2 - Lesna vijaka 6/160 tipa HBS proizvajalca Rothoblaas, (pridobljeno od Boštjana Bera)



Slika 2.2 - Detajl zasteklitve A (levo silikon in poliuretan, desno epoksi)



Slika 2.3 - Detajl zasteklitve B (levo silikon in poliuretan, desno epoksi)

2.2 Podatki o uporabljenem lesu, steklu in adhezivih (lepilih)

V preglednici 2.1 so podane lastnosti lesa iz katerega je bil narejen leseni okvir. Gre za smreko kakovosti C22. Lastnosti za les te kakovosti, ki so navedene v preglednici 2.1, so povzete po standardu EC5 [5]. V preglednici 2.1 oznake pomenijo naslednje [5]:

- $E_{0,m}$ – povprečna vrednost modula elastičnosti,
- G_m – povprečna vrednost strižnega modula,
- $f_{m,k}$ – karakteristična upogibna trdnost,
- $f_{t,0,k}$ – karakteristična natezna trdnost v smeri vlaken lesa,
- $f_{c,0,k}$ – karakteristična tlačna trdnost v smeri vlaken lesa,
- ρ_k – karakteristična gostota lesa,
- ρ_m – povprečna gostota lesa.

Lastnosti uporabljenega stekla, ki so v skladu s standardom EN 12150, so podane v preglednici 2.2.

Poissonov količnik stekla je 0,22 [8]. V preglednici 2.2 oznake pomenijo naslednje:

- $E_{0,m}$ – povprečna vrednost modula elastičnosti,
- G_m – povprečna vrednost strižnega modula,
- $f_{m,k}$ – karakteristična upogibna trdnost,
- $f_{t,0,k}$ – karakteristična natezna trdnost,
- $f_{c,0,k}$ – karakteristična tlačna trdnost,
- ρ_k – karakteristična gostota,
- ρ_m – povprečna gostota.

Preglednica 2.1 - Karakteristike uporabljenega lesa C22 po [5]

| | $E_{0,m}$ | G_m | $f_{m,k}$ | $f_{t,0,k}$ | $f_{c,0,k}$ | ρ_k | ρ_m |
|--------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | $\frac{N}{mm^2}$ | $\frac{N}{mm^2}$ | $\frac{N}{mm^2}$ | $\frac{N}{mm^2}$ | $\frac{N}{mm^2}$ | $\frac{kg}{m^3}$ | $\frac{kg}{m^3}$ |
| Leseni okvir | 10000 | 630 | 22 | 13 | 20 | 340 | 410 |

Preglednica 2.2 - Karakteristike uporabljenega kaljenega stekla

| | $E_{0,m}$ | G_m | $f_{m,k}$ | $f_{t,0,k}$ | $f_{c,0,k}$ | ρ_k | ρ_m |
|---------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | $\frac{N}{mm^2}$ | $\frac{N}{mm^2}$ | $\frac{N}{mm^2}$ | $\frac{N}{mm^2}$ | $\frac{N}{mm^2}$ | $\frac{kg}{m^3}$ | $\frac{kg}{m^3}$ |
| Kaljeno steklo (EN 12150) | 70000 | 28455 | 120 | 45 | 500 | 2500 | 2500 |

Kot adhezivno sredstvo (lepila) so bili uporabljeni dvo-komponentni silikon Ködiglaze S, eno-komponentni poliuretan Ködiglaze P in dvo-komponentni Körapox 558 epoksi proizvajalca

Kömmerling. Enoosni natezni preskus proizvajalca je edini podatek o uporabljenih lepilih s katerim sem razpolagal pri pripravi numeričnega modela [3], [18] in je za posamezno lepilo prikazan na sliki 1.2, 1.3 in 1.4. Ker so lepila skoraj nestisljiva, lahko za Poissonov količnik predpostavimo vrednost blizu 0.5; v diplomu smo pri vseh izračunih predpostavili, da je Poissonov količnik 0.45.

2.3 Podpiranje panela med preizkusom in nanašanje sile

Pri preizkušanju leseno-steklenih panelov je bil panel obrnjen za 90° glede na svojo lego v montažni stavbi, to pa zaradi preizkuševalne naprave, ki ne omogoča, da bi panel preizkušali v vertikalnem položaju.

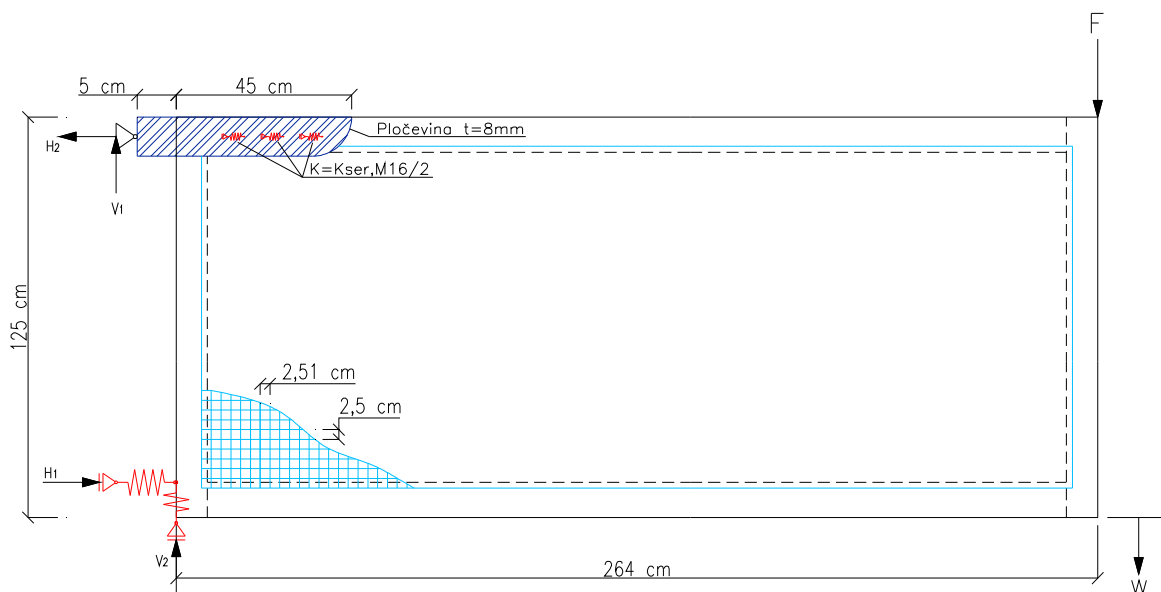
V enem od zgornjih vogalov panela so bile v leseni okvir izvrtane tri luknje premera 16 mm, skozi katere je bil panel vpet v jekleno pločevino preko treh vijakov $\phi 16\text{mm}$ (slika 2.5). Jeklena pločevina je bila členkasto povezana s togim jeklenim preizkuševalnim okvirjem (slika 2.5). Nadalje je bil panel spodaj v enem vogalu (na isti strani kot je bila zgornja podpora) vertikalno in horizontalno naslonjen na jekleno podlago (slika 2.6). Leseni okvir je bil po celi dolžini venca, na katerega se je nanašala obtežba, stabiliziran – preprečeni so bili pomiki izven ravnine panela.



Slika 2.4 - Jeklena pločevina in trije vijaki preko katerih je panel vpet v jekleni okvir (pridobljeno od Boštjana Bera)



Slika 2.5 - Spodnja podpora (pridobljeno od Boštjana Bera)

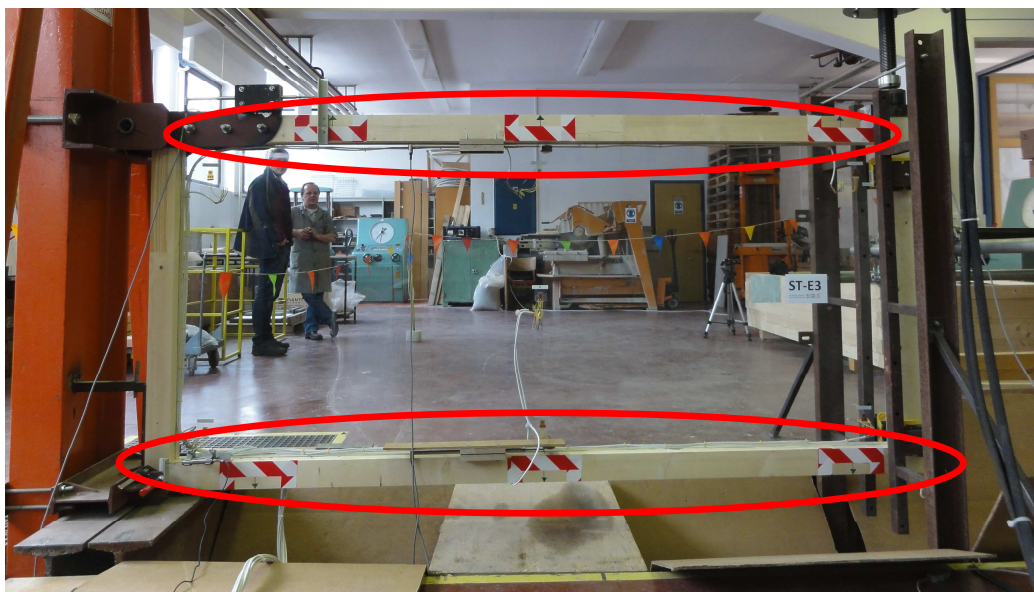


Slika 2.6 - Podpiranje leseno-steklenega panela med preizkušanjem. Desni rob je podprt tako, da preprečuje pomike izven ravnine panela

Preizkušanci so bili izpostavljeni točkovni obtežbi F , ki predstavlja horizontalno obremenitev v realni postavitvi panela (slika 2.7). Panele so obremenjevali na sledeči način: od vrednosti 0 do 10,0 kN so bili obremenjeni s hitrostjo 2,0 kN / 250 s, od 10,0 kN do porušitve pa s hitrostjo 2,0 kN / 200 s [3].

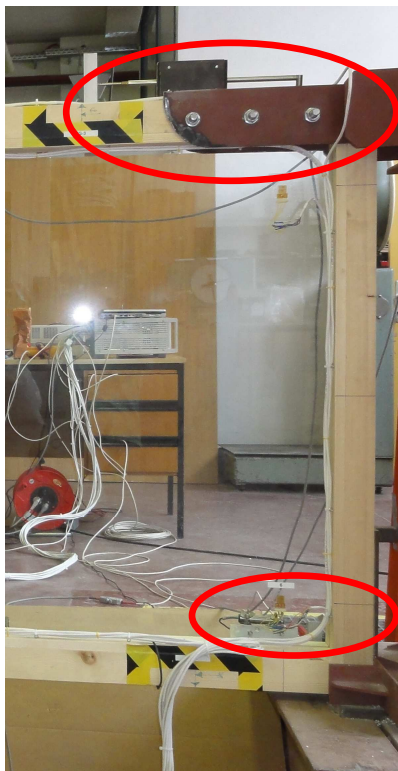
2.4 Merjenje pomikov in deformacij

Pri dveh testih so merili pomik na dnu venca, v katerega se je nanašala sila, in »zdrse« (razliko med pomiki stekla in lesa) v območju (Δ_{zg}) in v območju (Δ_{sp}) (slika 2.7).

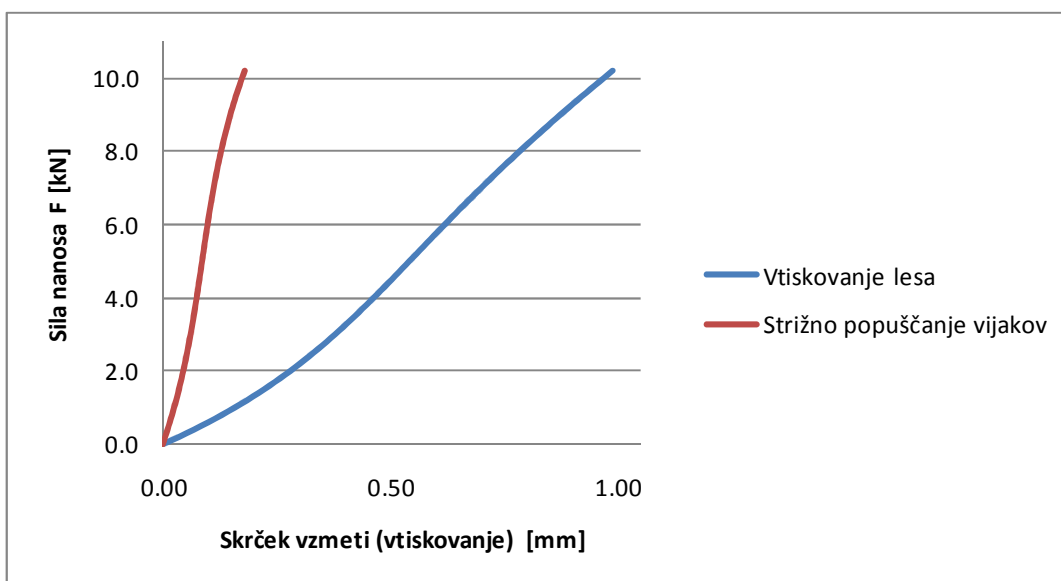


Slika 2.7 - Območje (Δ_{zg}) na sliki zgoraj, in območje (Δ_{sp}) na sliki spodaj, (pridobljeno od Boštjana Bera)

Poleg tega so ob spodnji podpori merili tudi vtiskovanje jekla in lesa pokončnika v les venca (sliki 2.6 in 2.9). V zgornji podpori pa so merili vtiskovanje vijakov v les (sliki 2.5 in 2.9) [15]. Eksperimentalni rezultati vtiskovanja so podani na sliki 2.10.



Slika 2.8 - Inštrumenti za merjenje vtiskovanja vijakov (na sliki zgoraj) in vtiskovanja pravokotno na vlakna venca (spodaj), (pridobljeno od Boštjana Bera)



Slika 2.9 - Rezultati meritev vtiskovanja lesa in jekla pravokotno na vlakna v spodnji podpori (moder diagram) in strižno popuščanje vijakov v območju zgornje podpore (rdeč diagram), (pridobljeno od Boštjana Bera).

3 HIPERELASTIČNI MODELI ADHEZIVOV

S hiperelastičnimi konstitutivnimi zakoni opišemo obnašanje materialov, ki imajo elastični odziv tudi pri zelo velikih deformacijah. Linearno elastični model je primeren za vse materiale le za zelo majhne deformacije, za dovolj natančen opis odziva elastičnega materiala, ki je sposoben velikih deformacij, pa potrebujemo hiperelastične materialne modele. Tipični materiali, ki so sposobni velikih elastičnih deformacij, so gume [22]. Veliko hiperelastičnih materialov je skoraj popolnoma nestisljivih, zato smo za Poissonov količnik privzeli vrednost 0.45.

Odziv tipične polimerske strukture je močno odvisna od temperature, zgodovine napetostnih stanj in poteka obremenjevanja [22]. Polimeri z močnimi vezmi kažejo elastično 'gumijasto' obnašanje, ki se ga lahko zadovoljivo opiše s hiperelastičnimi konstitutivnimi zakoni, če zanemarimo časovno komponento pri obravnavi njihovega obnašanja.

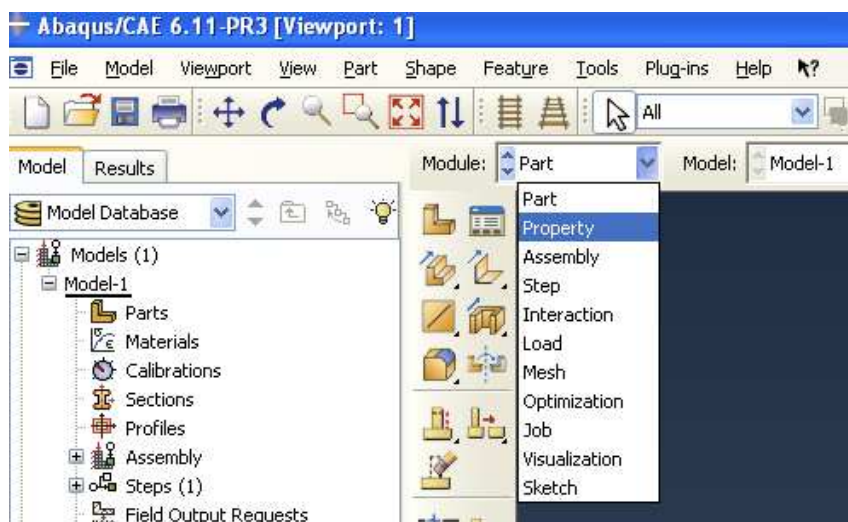
3.1 Izbira materialnega modela s pomočjo programa Abaqus

Hiperelastične modele za dvo-komponentni silikon Ködiglaze S, eno-komponentni poliuretan Ködiglaze P in dvo-komponentni epoksi Körapox 558 sem izbral izmed nabora hiperelastičnih modelov, ki jih ponuja program Abaqus. Nato sem s pomočjo enoosnih nateznih preizkusov, ki jih je za vsakega od omenjenih treh adhezivov, podal njihov proizvajalec Kömmerling, s pomočjo programa Abaqus iz vrednotil materialne konstante izbranih modelov. Z znanimi materialnimi konstantami sem lahko izrisal krivulje, ki povezujejo normalne napetosti z normalnimi deformacijami za obravnavane materiale ter tudi krivulje, ki prikazujejo odvisnost strižne napetosti od strižne deformacije. Tudi to sem naredil s pomočjo programa Abaqus.

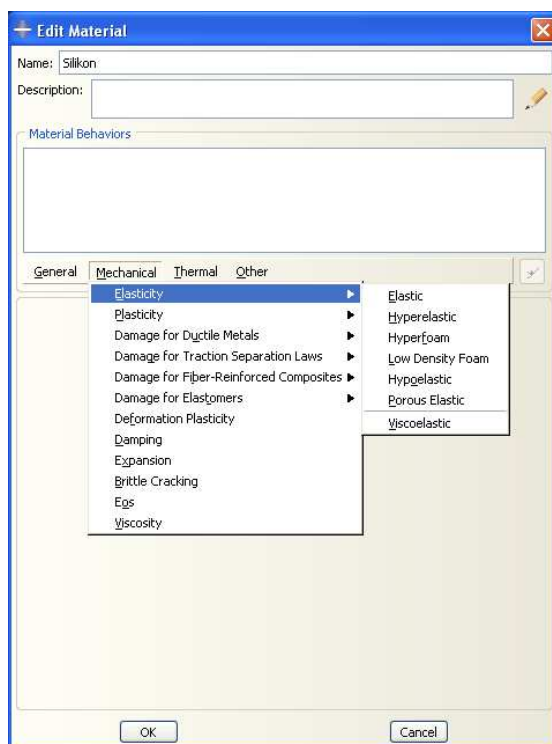
Kako poteka postopek izbire hiperelastičnih materialov in določitev vrednosti materialnim koeficientov, ki pripadajo izbranemu modelu, v programu Abaqus, opišem v nadaljevanju. V zavihku Property (slika 3.1) izberem nov materialni model, ki ga definiram kot Hyperelastic (slika 3.2). Določim, da je material izotropen, ker predpostavim, da so takšni naši obravnavani materiali. Nato vnesem v program vse rezultate laboratorijskih testov, ki jih imam na voljo. V našem primeru so to samo rezultati enoosnih nateznih testov. Podatke vnesem v obliki tabel – zavihek Test data (slika 3.4). Ker imam, kot rečeno, podatke samo za enoosni preizkus, jih v programu vnesem pod opcijo 'Uniaxial test data'. Tabelarično podam nominalne napetosti in pripadajoče nominalne deformacije. Če bi imel na razpolago še rezultate kakšnega drugega poskusa (npr. dvoosnega ali ravninskega), bi vnesel tudi te podatke. Ko so vsi razpoložljivi podatki podani, v zavihku Material (slika 3.6) v orodni vrstici poženem funkcijo Evaluate, kjer izberem še za kateri materialni model naj program izračuna materialne konstante (slika 3.7). Izbral sem naslednje materialne modele: Arruda-Boyce za silikon Ködiglaze S, Marlow za poliuretan Ködiglaze P in Ogdenov model tretjega reda za epoksi Körapox 558. Na slikah 3.1-3.7 je prikazan postopek za silikon Ködiglaze S. Postopek pri poliuretanu in epoksiju je popolnoma enak, le s to razliko, da so laboratorijski rezultati enoosnega nateznega

preizkusa, ki jih podam programu, seveda za vsak obravnavani material drugačni in da si za vsak obravnavani material izberemo drug materialni model (slika 3.7).

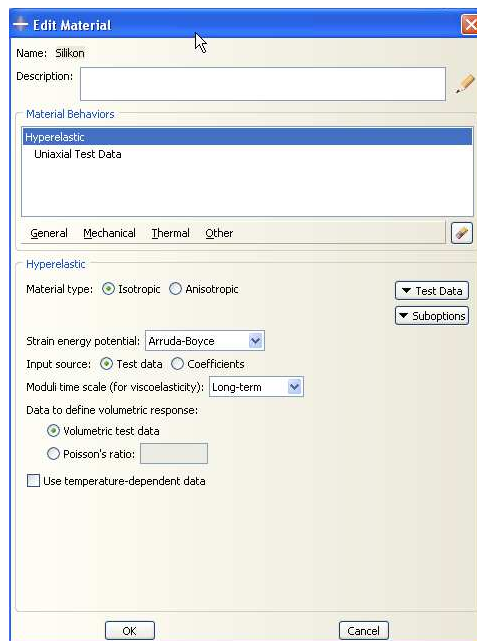
Program izračuna vrednosti materialnih konstant za izbrano hiperelastično funkcijo za specifično deformacijsko energijo. Nato lahko narišemo odnos med nominalno napetostjo in nominalno deformacijo za naslednje napetostne razmere (slika 3.8): enoosno obremenitev, dvoosno obremenitev, ravninsko obremenitev in tudi strižno obremenitev.



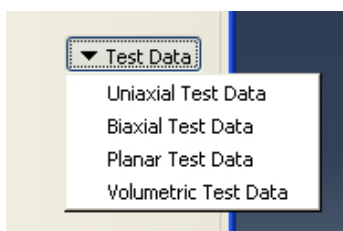
Slika 3.1 - Zavihek Property (Lastnosti) v programu Abaqus



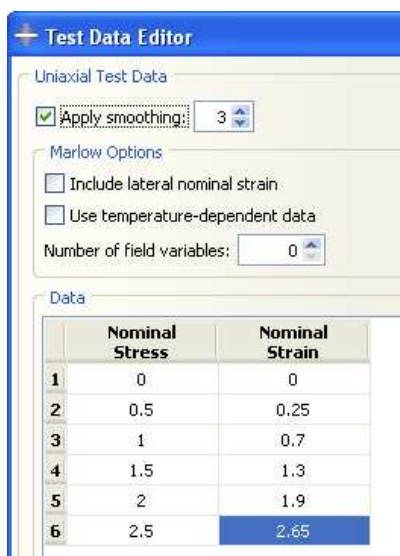
Slika 3.2 - Zavihek Edit (Urejanje) v programu Abaqus



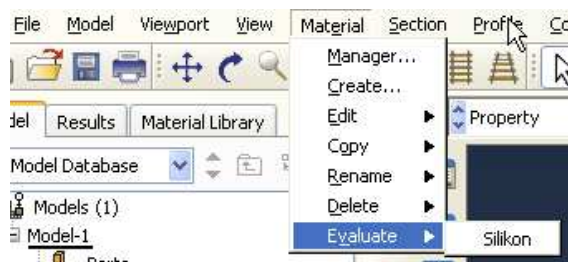
Slika 3.3 - Zavihek Edit Hyperelastic Material (Urejanje hiperelastičnega materiala) v programu Abaqus



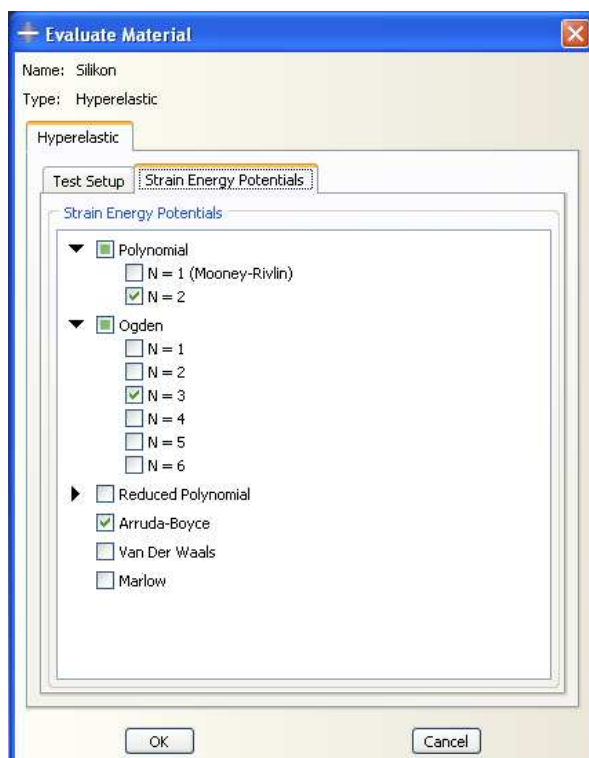
Slika 3.4 - Izbira vrste razpoložljivih laboratorijskih podatkov



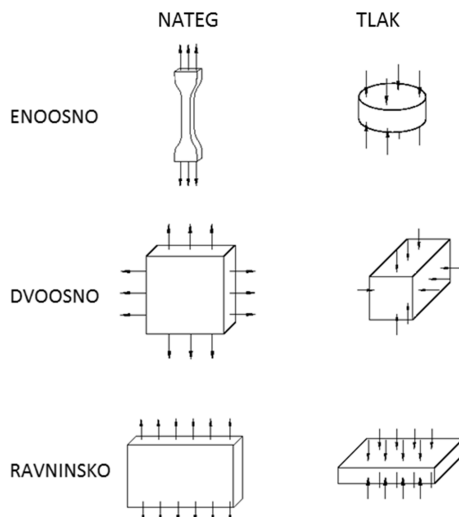
Slika 3.5 - Podatki v programu Abaqus



Slika 3.6 - Izvrednotenje rezultatov s programom Abaqus



Slika 3.7 - Izbira materialnega modela



Slika 3.8 - Načini testiranja materiala. Rezultati teh testov se podajo v zavihku na sliki 3.4

3.2 Arruda-Boyce hiperelastični materialni model za silikon Ködiglaze S

Arruda-Boyce materialni model je eden izmed modelov s katerim lahko opišemo hiperelastično obnašanje materialov. Uporabil sem ga za določitev hiperelastičnega odziva silikona Ködiglaze S. Arruda-Boyce materialni model predpostavi specifično deformacijsko energijo po naslednji funkciji [16]:

$$U(\bar{I}_1, J) = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_m^{2i-2}} (\bar{I}_1 - 3)^i + \frac{1}{D} \left(\frac{J^2 - 1}{2} - \ln J \right), \quad (3.1)$$

kjer je $C_1 = 1/2$, $C_2 = 1/20$, $C_3 = 11/1050$, $C_4 = 19/7000$, $C_5 = 519/673750$, J je determinanta deformacijskega gradienta \mathbf{F} :

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} & 1 + \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} & \frac{\partial v}{\partial z} & 1 + \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix},$$

kjer so u , v in w pomiki v smereh fiksnih koordinat x , y in z , $\bar{I}_1 = \text{sled } \bar{\mathbf{B}}$ je prva invarianta matrike raztezkov $\bar{\mathbf{B}} = \bar{\mathbf{F}}\bar{\mathbf{F}}^T$, $\bar{\mathbf{F}} = J^{-1/3}\mathbf{F}$, $\det \bar{\mathbf{F}} = 1$. Za natančnejšo razlago omenjenih pojmov, ki se nanašajo na velike deformacije trdnega telesa. Materialne konstante so tri: modul μ , kritični raztezek λ_m in

$$D = \frac{2}{K_0} = \frac{3(1-2\nu)}{(\mu_0(1+\nu))},$$

kjer je K_0 začetni modul stisljivosti, začetni strižni modul je

$$\mu_0 = \mu \left(1 + \frac{3}{5\lambda_m^2} + \frac{99}{175\lambda_m^4} + \frac{513}{875\lambda_m^6} + \frac{42039}{67375\lambda_m^8} \right),$$

začetni Poissonov količnik pa je

$$\nu = \frac{(3K_0 / \mu_0 - 2)}{(6K_0 / \mu_0 + 2)}.$$

Prvi del enačbe (3.1), s katero opišemo specifično deformacijsko energijo, je povezan s spremembo oblike nestisljivega telesa, drugi del pa s spremembo volumna. Komponenta matrike napetosti se določi z odvodom

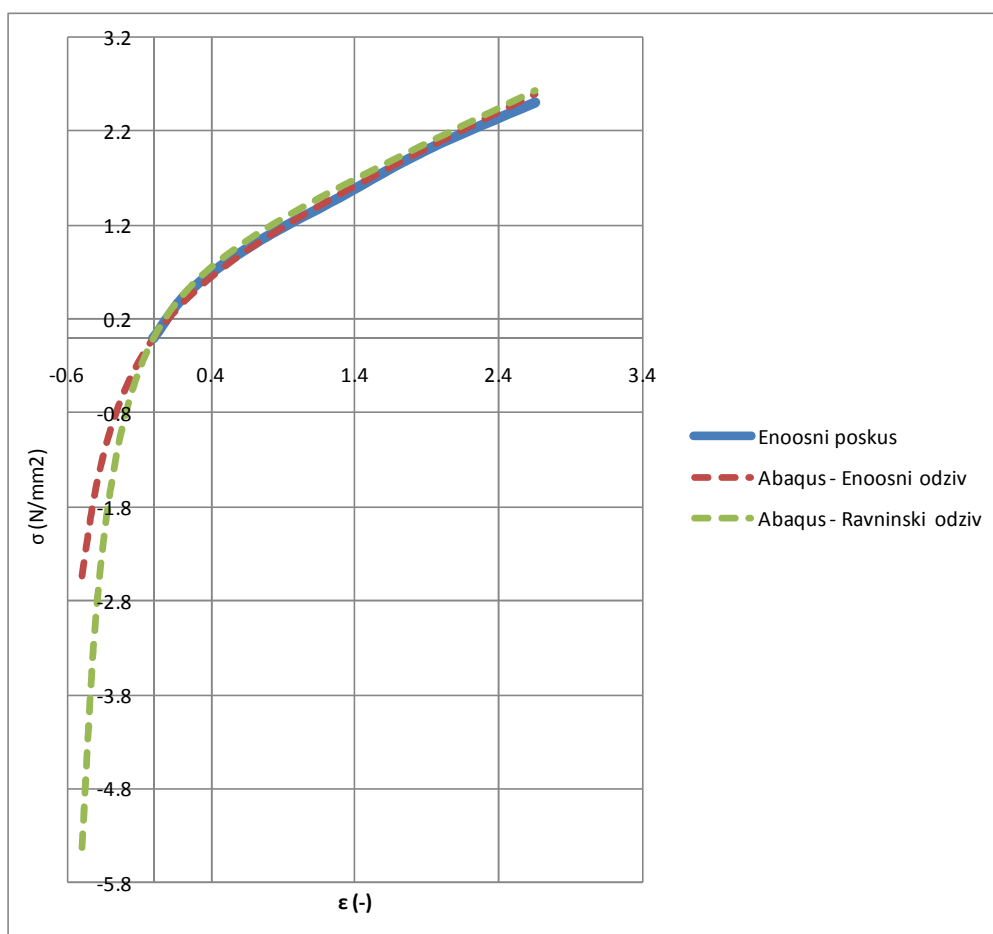
$$\sigma_{ij} = \frac{\partial U(\bar{I}_1(\varepsilon_{kl}), J(\varepsilon_{kl}))}{\partial \varepsilon_{ij}},$$

kjer je ε_{ij} komponenta matrike deformacij $\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}(\boldsymbol{F})$, ki pripadajo gornjim napetostim. Pogoju stabilnosti materialnega modela zahteva:

$$d\tilde{\boldsymbol{\sigma}}(\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}) \cdot d\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}} = d\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}} \cdot \boldsymbol{C}(\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}) d\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}} > 0,$$

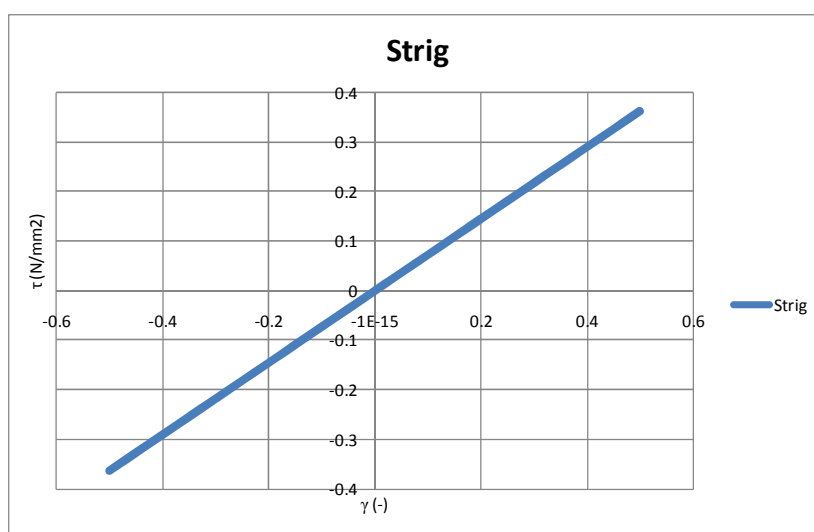
kjer je $d\tilde{\boldsymbol{\sigma}} = \boldsymbol{C}(\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}) d\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}$ vektor prirastkov napetosti, $d\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}$ pa vektor prirastka deformacij, iz česar sledi, da mora biti matrika $\boldsymbol{C}(\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}})$ pozitivno definitna. Uporabljeni hiperelastični model je stabilen, če sta μ in λ_m večja od nič [16].

Vrednosti materialnih konstant v preglednici 3.1 je določil program Abaqus na podlagi enoosnega nateznega preskusa za uporabljeni silikon (slika 1.2) [3]. S pomočjo funkcije »Evaluate Material« je program Abaqus določil vrednosti konstant μ in λ_m na podlagi predpostavke o nestisljivosti materiala ($J = 1$). Tretjo konstanto D je Abaqus določil na podlagi podane vrednosti za Poissonov količnik, ki smo jo predpostavili kot $\nu = 0,45$. Predpostavili smo torej, da je material rahlo stisljiv.

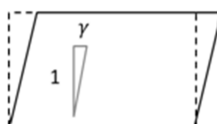


Slika 3.9 - Odziv materialnega modela pri različnih pogojih obremenjevanja (slika 3.8) za silikon Kodiglaze S. Na abscisi so nominalne deformacije, na ordinati pa nominalne napetosti. Modra krivulja predstavlja podatke eksperimenta

Obnašanje izbranega hiperelastičnega modela za silikon je prikazano na slikah 3.9 in 3.10, kjer je ε nominalna osna deformacija $\varepsilon = \Delta l / l$ (kjer je l začetna dolžina vzorca in Δl njena sprememba), γ pa je nominalna strižna deformacija (slika 3.11). Nominalna osna napetost σ in nominalna strižna napetost τ sta definirani kot sili na začetno površino [15], [16]. Območje deformaciji, na katerem program Abaqus prikaže materialni odziv znaša od -0.5 do 2.65 nominalne vrednosti deformacije. Material je stabilen na celotnem intervalu deformacij.



Slika 3.10 - Nominalna strižna napetost v odvisnosti od nominalne strižne deformacije (silikon Ködiglaze S)



Slika 3.11 - Strižna deformacija vzorca materiala

Preglednica 3.1 - Materialne konstante dobljene s pomočjo programa Abaqus

| μ [N/mm ²] | λ_m [-] | D [mm ² / N] | μ_0 [N/mm ²] |
|-------------------------------|--------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 0,7244 | 7425,13 | 0,286 | 0,7244 |

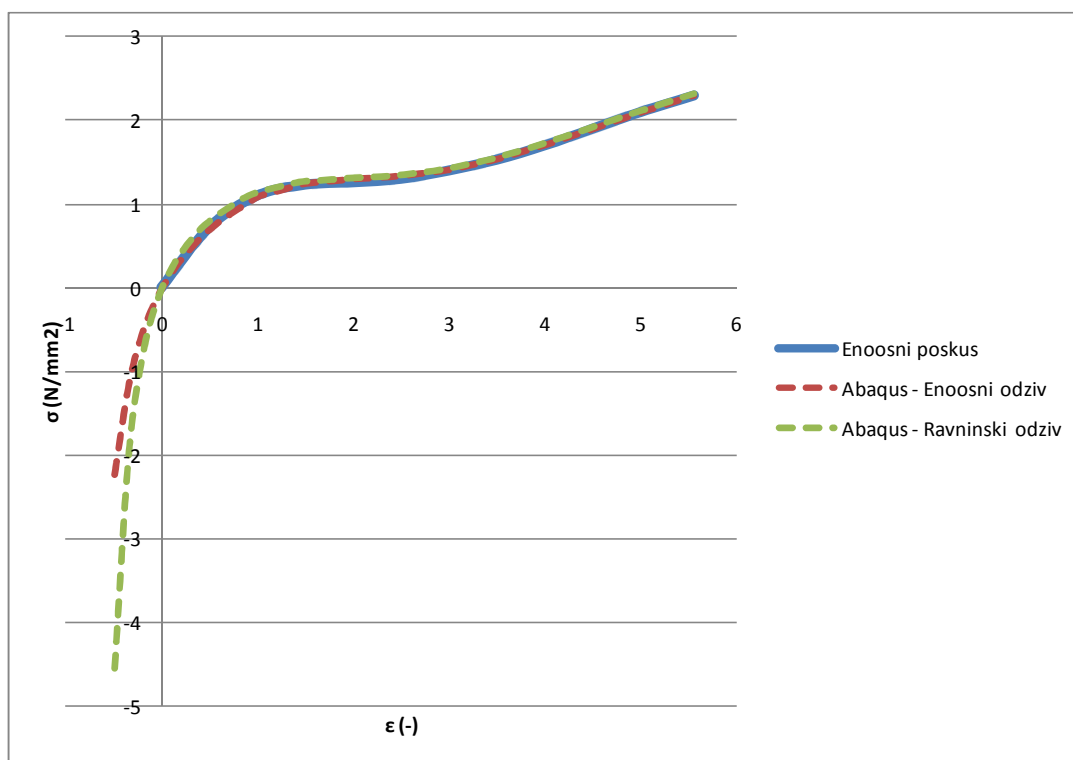
3.3 Marlow hiperelastični materialni model za poliuretan Ködiglaze P

Za materialni model poliuretanskega adheziva sem izbral Marlow hiperelastični model, saj sem le z njim lahko natančno opisal rezultate enosnega nateznega preskusa.

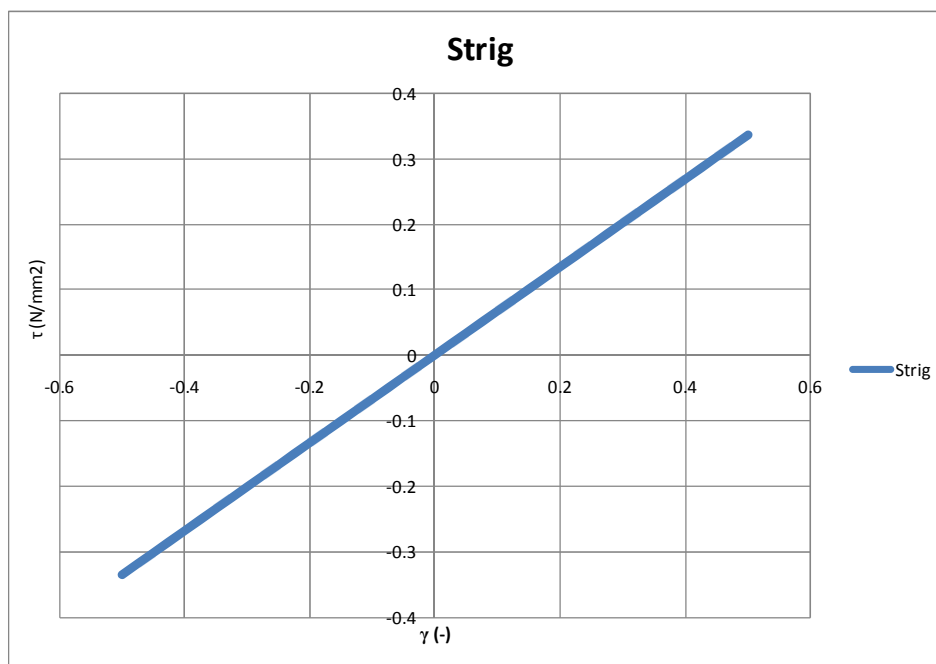
Za razliko od drugih materialnih modelov, ki imajo obliko funkcije, je Marlow model opredeljen izključno z rezultati laboratorijskih testov. Zapišemo ga lahko samo v splošni obliki kot vsoto dveh funkcij

$$U(\bar{I}_1, J) = U_{dev}(\bar{I}_1) + U_{vol}(J) \quad (3.2)$$

Za poliuretan Ködiglaze P sem $U_{dev}(\bar{I}_1)$ določil na podlagi enoosnega nateznega preskusa [3], $U_{vol}(J)$ pa z vrednostjo za Poissonov količnik, ki sem jo predpostavil kot $\nu = 0,45$, saj gre za praktično nestisljivi material. Obe funkciji iz enačbe (3.2), ki pa ju Abaqus ne izpiše eksplicitno, sem dobil z »Evaluate Material«. Abaqus potrdi, da je Marlow hiperelastični model stabilen tako za enoosne, dvoosne kot ravninske nominalne deformacije za podane laboratorijske rezultate za poliuretan Ködiglaze P. Obnašanje dobljenega hiperelastičnega modela za poliuretan Ködiglaze P je prikazano na slikah 3.12 in 3.13.. Interval, na katerem program Abaqus nariše nominalne napetosti, znaša od -0.5 do 5.56 nominalne deformacije. Material je za stabilen na celotnem intervalu deformacij.



Slika 3.12 - Odziv materialnega modela pri različnih pogojih obremenjevanja (glej sliko 3.8) za poliuretan Ködiglaze P. Na abscisi so nominalne normalne deformacije, na ordinati pa nominalne normalne napetosti. Modra krivulja predstavlja podatke eksperimenta



Slika 3.13 - Nominalna strižna napetost v odvisnosti od nominalne strižne deformacije za poliuretan Ködiglaze P

3.4 Ogdenov hiperelastični materialni model za epoksi Körapox 558

Pri epoksiju smo uporabili Ogdenov model, ki je eden najbolj splošnih materialnih modelov za opis hiperelastičnega obnašanje materialov. Ogden je obnašanje hiperelastičnega materiala opisal z enačbo [16]:

$$U(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, J) = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J - 1)^{2i},$$

kjer je $\bar{\lambda}_i = J^{-\frac{1}{3}} \lambda_i$ deviatorični del glavnega raztezka λ_i (pri enoosni obremenitvi vzorca je glavni raztezek v smeri obremenitve npr. enak $\lambda_1 = 1 + \frac{\Delta l}{l}$, kjer je l začetna dolžina vzorca in Δl njena sprememba), N je red izbranega polinoma, μ_i , α_i , D_i pa somaterialne konstante. Glavni raztezki λ_i so lastne vrednosti matrike $\mathbf{C} = \mathbf{F}^T \mathbf{F}$. Začetni strižni modul in začetni modul stisljivosti sta

$$\mu_0 = \sum_{i=1}^N \mu_i \text{ in } K_0 = \frac{2}{D_1}.$$

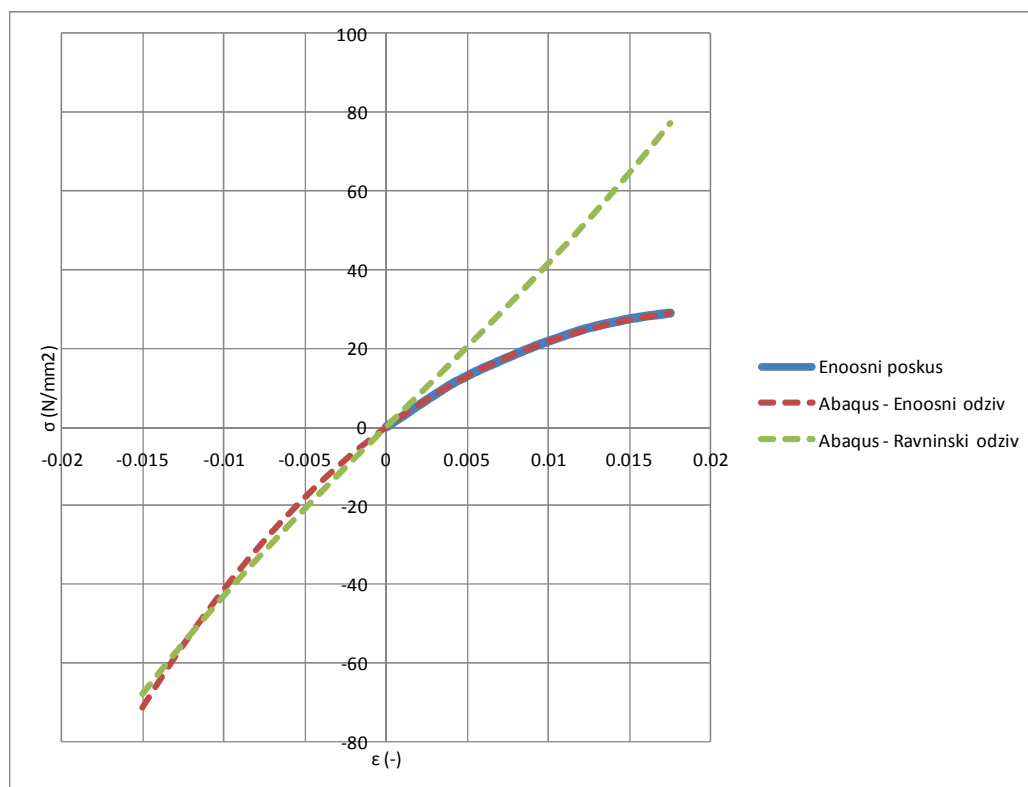
Obnašanje dobljenega hiperelastičnega modela za epoksi Körapox 558 je prikazano na diagramih 3.5 in 3.6 za izračunane materialne konstante, ki so podane v tabeli 3.2. Vrednosti materialnih konstant v tabeli 3.2 je določil program Abaqus na podlagi enoosnega nateznega preskusa za uporabljeni epoksi (diagram 1.3) [3]. S pomočjo funkcije »Evaluate Material« je program Abaqus določil vrednosti konstant μ_i in α_i , $i=1,2,3$, za $N=3$ na podlagi predpostavke o nestisljivosti materiala $J=1$).

Konstante D_i , $i=1,2,3$, je Abaqus določil na podlagi podane vrednosti za Poissonov količnik, $\nu = 0,45$. Predpostavil sem torej, da je material rahlo stisljiv.

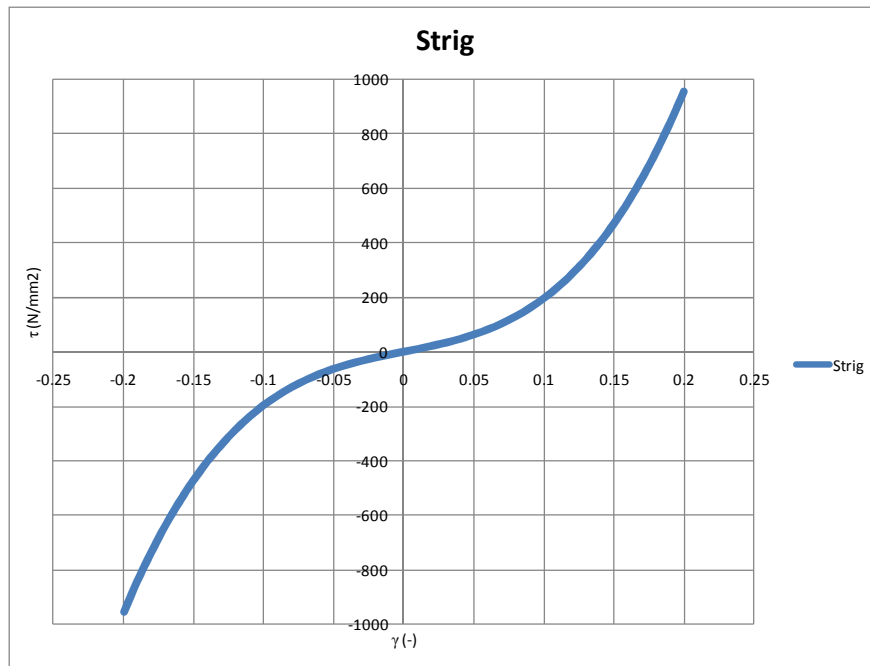
Material je za izračunane materialne konstante stabilen pri različnih načinih obremenjevanja na sledečih intervalih: za enoosno obremenitev od -0.0197 do 0.03 nominalne deformacije, pri dvoosni obremenitvi od -0.0147 do 0.01 in pri ravninski obremenitvi od -0.0196 do 0.02. Materialni model je torej uporaben le, če so deformacije epoksija Körapox 558 pri analizi v teh intervalih, oziroma znotraj najstrožjega intervala [-0.0147, 0.01].

Preglednica 3.2 - Materialne konstante, dobljene s pomočjo programa Abaqus

| l | α_i [-] | μ [N/mm ²] | D [mm ² / N] |
|-----|-------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 1 | 1.999 | -311427.994 | 0.00004 |
| 2 | 3.999 | 187330.433 | 0.000 |
| 3 | -2 | 125117.642 | 0.000 |



Slika 3.14 - Odziv materialnega modela pri različnih pogojih obremenjevanja (glej sliko 3.8) za epoksi Körapox 558 Na abscisi so nominalne normalne deformacije, na ordinati pa nominalne normalne napetosti. Modra krivulja predstavlja podatke eksperimenta



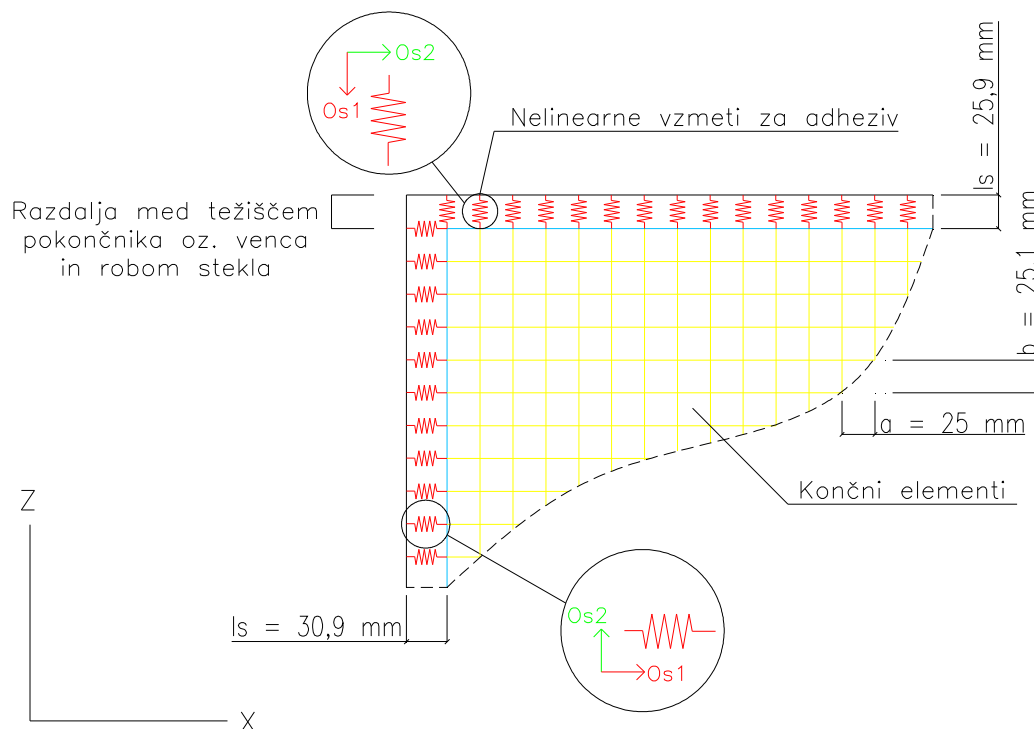
Slika 3.15 - Nominalna strižna napetost v odvisnosti od nominalne strižne deformacije za epoksi Körapox 558

4 MODEL ZA ANALIZO S KONČNIMI ELEMENTI

Za numerično analizo uporabim program za računanje konstrukcij SAP2000 [23], ki temelji na metodi končnih elementov. Program omogoča tako linearno kot nelinearno analizo.

Leseni okvir modeliram z linijskimi končnimi elementi za prostorski nosilec, stekleno šipo pa z lupinastimi ploskovnimi končnimi elementi (slika 4.1). Linijske končne elemente namestim po težiščnicah pokončnikov in vencev. Srednjo ravnino steklene šipe in težiščnice okvirja postavim v ravnino XZ , in sicer tako, da se pokončnika raztezata v smeri X , venca pa v smeri Z osi. Stekleno šipo modeliram z mrežo 100 končnih elementov v X smeri in 50 končnih elementov v Z smeri. Vsi elementi so pravokotniki, s stranico v X smeri dolžine $a = 25$ mm in s stranico v Z smeri dolžine $b = 25,1$ mm. Lesen okvir diskretiziram z linijskimi končnimi elementi tako, da je eno vozlišče linijskega končnega elementa na isti premici kot nekaj vozlišč ploskovnih končnih elementov (slika 4.1).

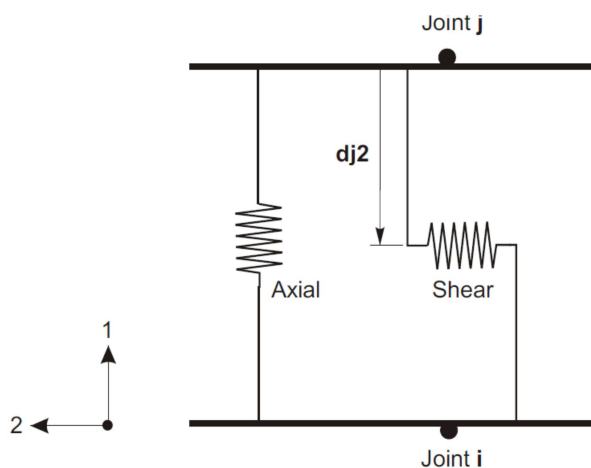
Tako steklo kot les modeliram kot izotropen linearno elastičen material. Delovanje veznih sredstev med steklom in lesnim okvirjem, to so ali silikon ali poliuretan ali epoksi, modeliram z nelinearno elastičnimi vzmetmi. Materialne lastnosti posameznega veznega sredstva so opisane v poglavju 1.5, kako določim togost pripadajočih vzmeti, pa opišem v nadaljevanju.



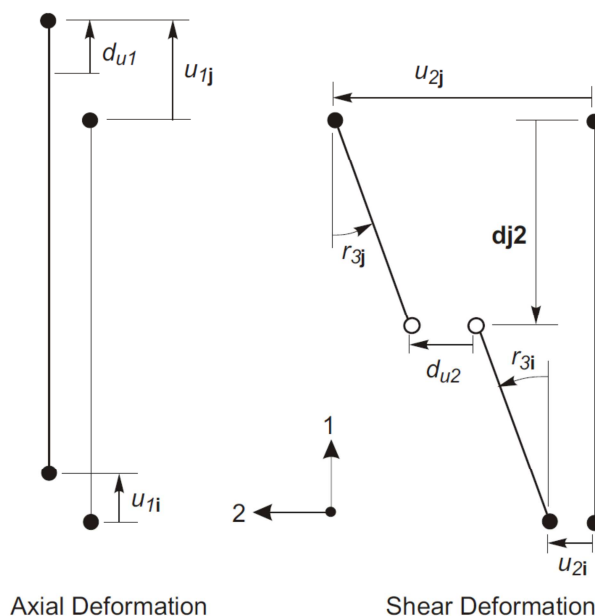
Slika 4.1 - Skica numeričnega modela za analizo po metodi končnih elementov.

4.1 Končni element za vzmeti v programu SAP2000

V programu SAP2000 se poda vzmetni končni element med dvema vozliščema mreže končnih elementov; npr. med vozliščem i in vozliščem j (slika 4.2). Vsak takšen vzmetni končni element ima lokalni koordinatni sistem, ki ga določajo osi 1, 2 in 3, ter togosti v teh smereh, ki so ali konstantne ali odsekoma linearne. Kako se iz pomikov in zasukov vozlišč i in j izračuna osni pomik vzmeti $u=d_{u1}$ in pomik strižne vzmeti $v=d_{u2}$, je prikazano na sliki 4.3.



Slika 4.2 - Skica osne in strižne vzmeti v vzmetnem končnem elementu, ki se razteza med vozliščema i in j [25]



| | |
|-------------------------|--|
| Axial: | $d_{u1} = u_{1j} - u_{1i}$ |
| Shear in the 1-2 plane: | $d_{u2} = u_{2j} - u_{2i} - \mathbf{dj2} r_{3j} - (L - \mathbf{dj2}) r_{3i}$ |
| Shear in the 1-3 plane: | $d_{u3} = u_{3j} - u_{3i} + \mathbf{dj3} r_{2j} + (L - \mathbf{dj3}) r_{2i}$ |

Slika 4.3 - Definicija pomika osne vzmeti $u=d_{u1}$ in pomikov strižnih vzmeti $v=d_{u2}$ in $w=d_{u3}$ v vzmetnem končnem elementu, ki se razteza med vozliščema i in j [26]

4.2 Določitev nelinearnih vzmeti za silikon Ködiglaze S in poliuretan Ködiglaze P

Adheziv med steklom in lesenim okvirjem modeliram z nelinearnimi elastičnimi vzmetmi. Togost vzmeti je določena na podlagi ravninskega (slika 3.8) in strižnega obnašanja adheziva. Diagrama ravninskega in strižnega obnašanja posameznega adheziva dobim na osnovi podatkov enoosnega nateznega preskusa in izbranega hiperelastičnega materialnega modela s pomočjo programa Abaqus, kot je opisano v 3. poglavju. Abaqus mi za vsak adheziv poda odvisnost osne (normalne) napetosti (σ) od osne (normalne) deformacije (ε) ter odvisnost strižne napetosti (τ) od strižne deformacije (γ). Te diagrame pretvorim v diagrame osna (normalna) sila (F) – osni (normalni) pomik (u) in strižna sila (V) – strižni pomik (v). Na ta način dobim nelinearni elastični togosti osne in strižne vzmeti tako za silikon kot za poliuretan.

Poglejmo si tipično osno vzmet, ki se razteza med vozliščem linijskega končnega elementa (ki leži na težiščnici okvirja) in vozliščem končnega elementa za lupine (glej sliko 4.4). Vzmet ima globalno smer ali X (če se stika z vencem) ali Z (če se stika s pokončnikom). Uporabim (glej sliko 4.5):

$$\sigma = \frac{F}{A} \rightarrow F = \sigma A, \quad (4.1)$$

pri čemer je σ osna napetost v kN/mm^2 , F je osna sila v kN, A pa je pripadajoča površina stika med adhezivom in steklom oziroma lesom v mm^2 . Potrebujem še zvezo med deformacijo in pomikom (slika 4.5):

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \rightarrow u = \Delta l = \varepsilon l, \quad (4.2)$$

pri čemer je ε osna deformacija, $u = \Delta l$ je raztezek adheziva v smeri sile F v mm, l pa začetna debelina adheziva v smeri sile F v mm.

Z enačbama (4.1) in (4.2) lahko, s pomočjo diagrama σ - ε in geometrijskih podatkov, določim odnos F - u za obravnavano osno vzmet, ki ima smer X , če se stika z vencem in steklom, oziroma smer Z , če se stika s pokončnikom in steklom.

Za strižno vzmet, ki opiše strižno deformacijo vzdolž okvirja v ravnini panela (slika 4.6), izhajam iz enačbe (4.3). Slednja ima smer Z , če se stika z vencem in steklom ter smer X , če se stika s pokončnikom in steklom. Predpostavim konstantno strižno napetost po pripadajoči ploskvici A :

$$\tau = \frac{V}{A} \rightarrow V = \tau A, \quad (4.3)$$

pri čemer je τ strižna napetost v kN/mm^2 , V je osna sila v kN, A pa je pripadajoča površina stika med adhezivom in steklom oziroma lesom v mm^2 .

Zapišem še zvezo med strižno deformacijo in pomikom na robu adheziva ob steklu (glej sliko 4.6 in sliko 4.7):

$$\gamma = \frac{v}{l} \rightarrow v = l \gamma, \quad (4.4)$$

pri čemer je γ strižna deformacija (slika 3.11), v pomik v smeri sile V na robu adheziva ob steklu v mm (slika 4.7), l pa debelina adheziva v mm (slika 4.7).

Strižno deformacijo adheziva v smeri Y sem za potrebe numerične analize predpostavil enako kot v smeri Z (glej sliko 4.6).

Za geometrijska parametra A in l , ki nastopata v gornjih enačbah, velja:

$$A = t a, \text{ oziroma } A = t b,$$

kjer je:

$$t = 10 \text{ mm širina adheziva}$$

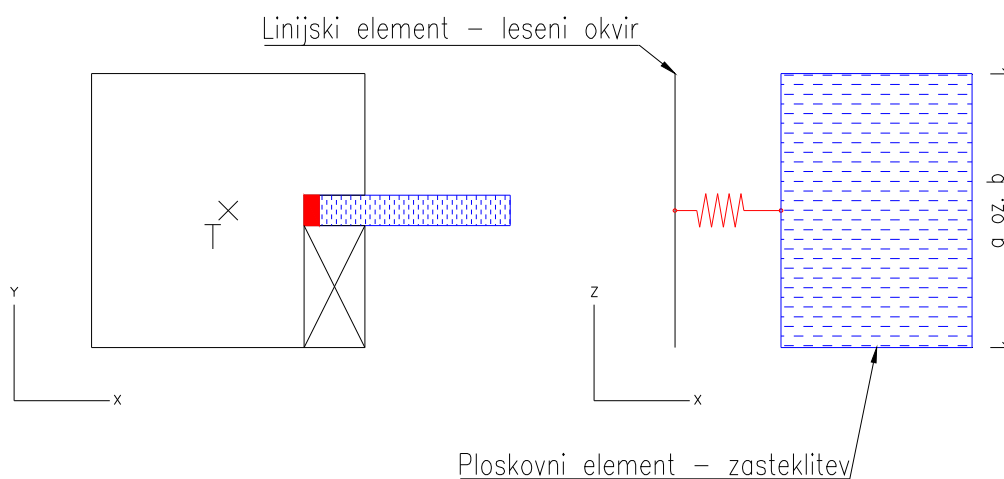
$$a = 25 \text{ mm dolžina ploskovnega končnega elementa v } X \text{ smeri,}$$

$$b = 25,1 \text{ mm dolžina ploskovnega končnega elementa v } Z \text{ smeri,}$$

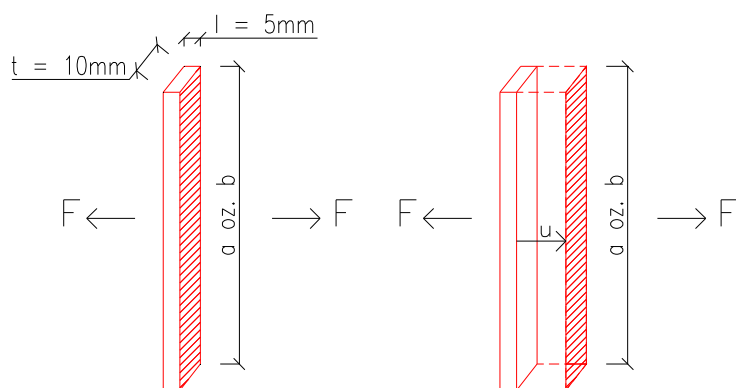
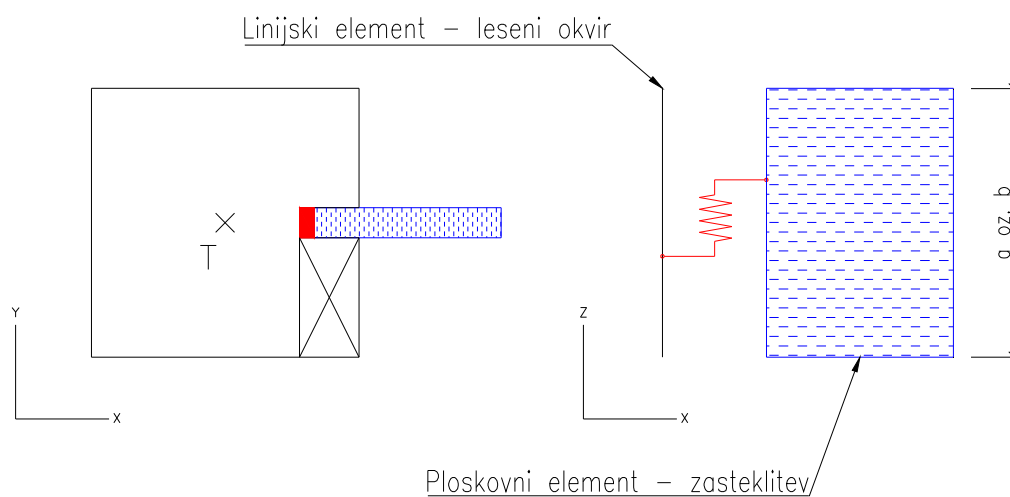
$$l = 5 \text{ mm debelina adheziva,}$$

$$l_s = 30,89 \text{ mm v } X \text{ smeri, oziroma } l_s = 25,86 \text{ mm v } Z \text{ smeri.}$$

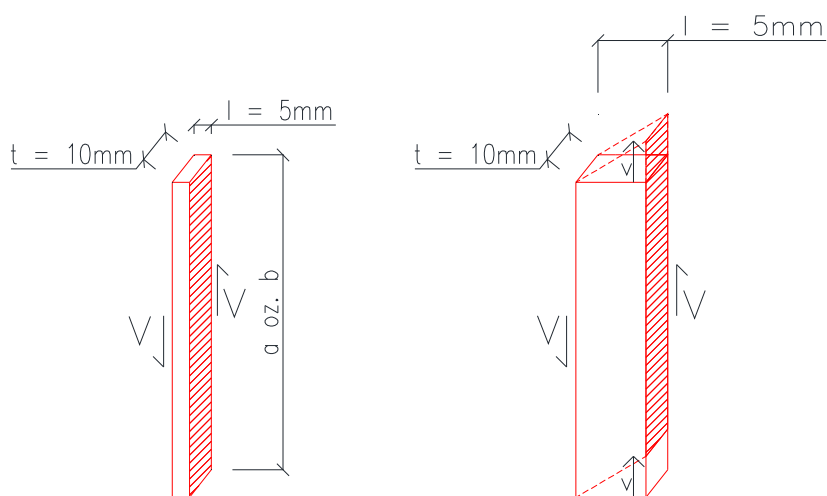
Na opisan način lahko torej določim togosti osnih vzmeti v smereh X in Z (sliki 4.4 in 4.5) ter togosti strižnih vzmeti v ravnini panela v smereh X in Z (slika 4.6 in 4.7). Odnosa sila - pomik za enoosno in enostrižno vzmet za silikon Ködiglaze S in poliuretan Ködiglaze P sta prikazana na slikah 4.8 in 4.9.

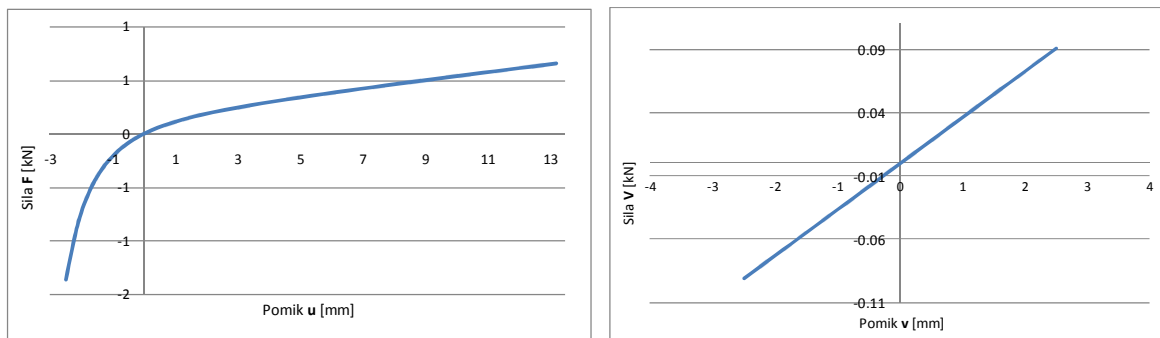


Slika 4.4 - Prerez venca, adheziva in dela šipe (levo). Osna vzmet v pogledu (desno).

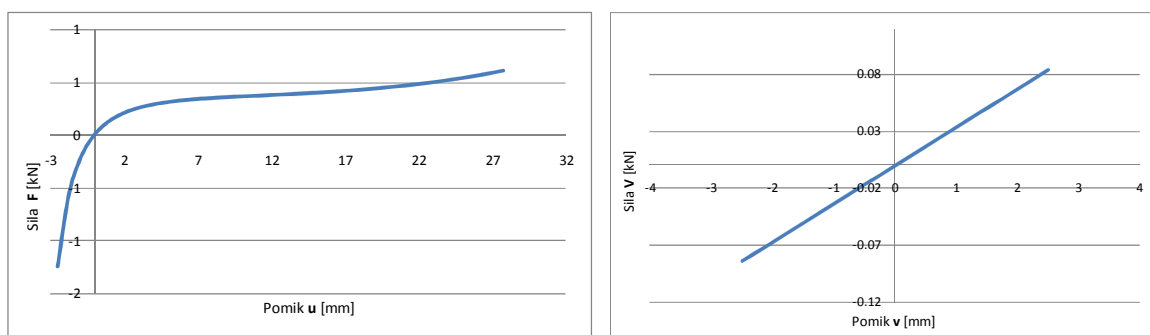
Slika 4.5 – Skica za določitev diagrama $F-u$; osna deformacija adheziva

Slika 4.6 - Prerez lesenega okvirja in dela šipe (levo). Strižna vzmet v pogledu (desno).

Slika 4.7 - Skica za določitev diagrama $V-v$.



Slika 4.8 - Diagrama F - u in V - v za silikon.



Slika 4.9 - Diagrama F - u in V - v za poliuretan.

4.3 Določitev nelinearnih vzmeti za epoksi Kōrapox 558

Način določitve geometrijskih parametrov pri epoksiju je podoben kot pri silikonu ali poliuretanu, s to razliko, da na epoksi delujejo samo strižne sile in se zato samo strižno deformira. Deformiranje adheziva v smeri Y ni mogoče, zato za potrebe numerične analize v slednjo smer predpišem enake strižne lastnosti kot v smeri Z .

Za strižno vzmet vzdolž okvirja (glej sliki 4.10, 4.11 in 4.12) velja:

$$V = 2 \tau A \quad (2 \text{ je zato, ker imamo } 2 \text{ sloja lepila),} \quad (4.5)$$

in

$$v = \gamma t. \quad (4.6)$$

Gre za strižno vzmet, ki ima smer Z , če se stika z vencem in steklom ter smer X , če se stika s pokončnikom in steklom. Predpostavim, da je strižna napetost enakomerno razporejena po pripadajoči površini A . Pomik v je pomik vzdolž okvirja ob steklu. Geometrijske konstante v enačbah (4.5) in (4.6) so naslednje:

$A = l a$ oziroma $A = l b$, kje je $l = 15 \text{ mm}$ širina enega sloja epoksija,

$a = 25 \text{ mm}$ je dolžina ploskovnega končnega elementa v X smeri,

$b = 25,1 \text{ mm}$ je dolžina ploskovnega končnega elementa v Z smeri,

$l_s = 30,89 \text{ mm}$ je razdalja med težiščem okvirja in robom steklene šipe v X smeri,

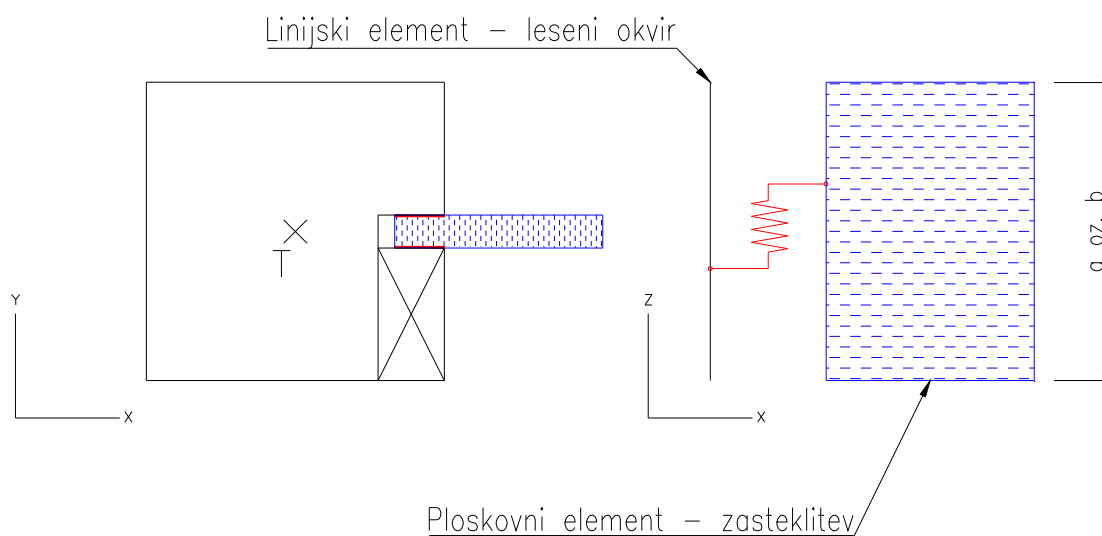
$l_s = 25,86 \text{ mm}$ je razdalja med težiščem okvirja in robom steklene šipe v Z smeri.

Za strižno vzmet prečno na okvir (glej sliki 4.12) velja:

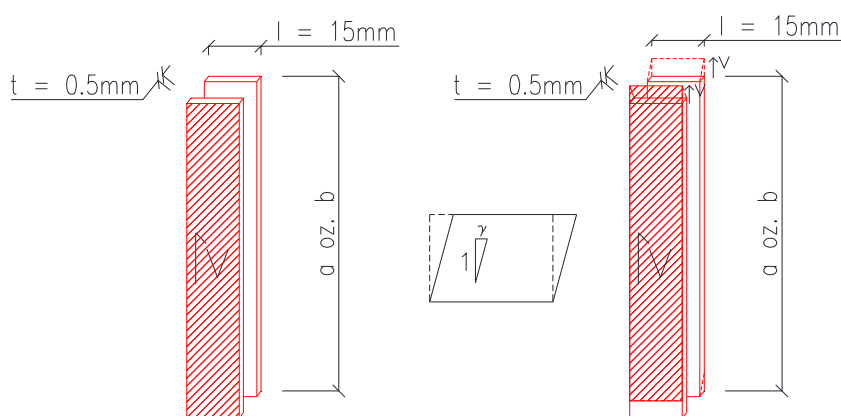
$$V = 2 \tau \frac{5}{6} A \quad (2 \text{ je zato, ker imamo 2 sloja lepila}), \quad (4.7)$$

in

$$v = t \gamma. \quad (4.8)$$



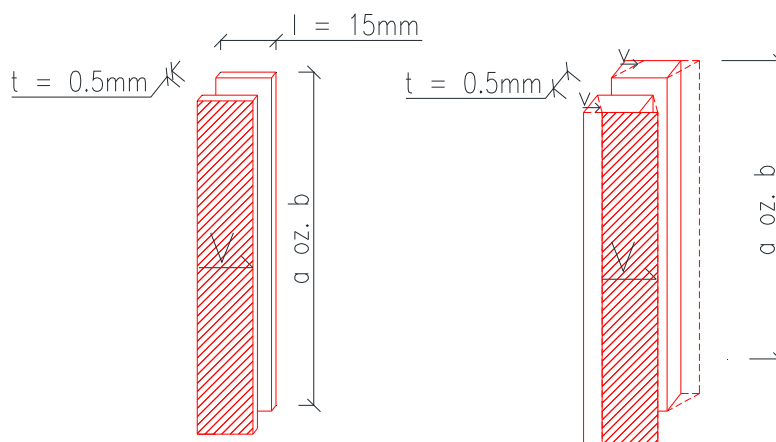
Slika 4.10 - Prerez lesenega okvirja in dela šipe (levo). Strižna vzmet v pogledu (desno).



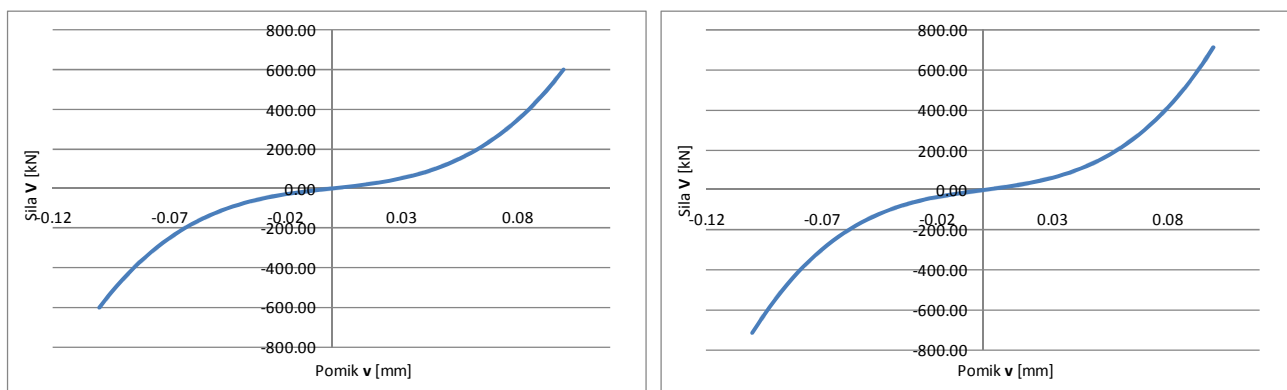
Slika 4.11 - Skica za določitev vzmeti za strig vzdolž okvirja

Tako dobimo diagrama za strig vzdolž okvirja in za strig prečno na okvir (slika 4.13). Zaradi geometrije je odnos sila – pomik vzdolžno in prečno na okvir za posamezno smer, t.j. X in Z, skoraj

enak. Pomik epoksija v smeri, ki je pravokotna na ravnino panela, ga predpostavim enako kot pomika prečno na okvir oz. vzdolžno na okvir.



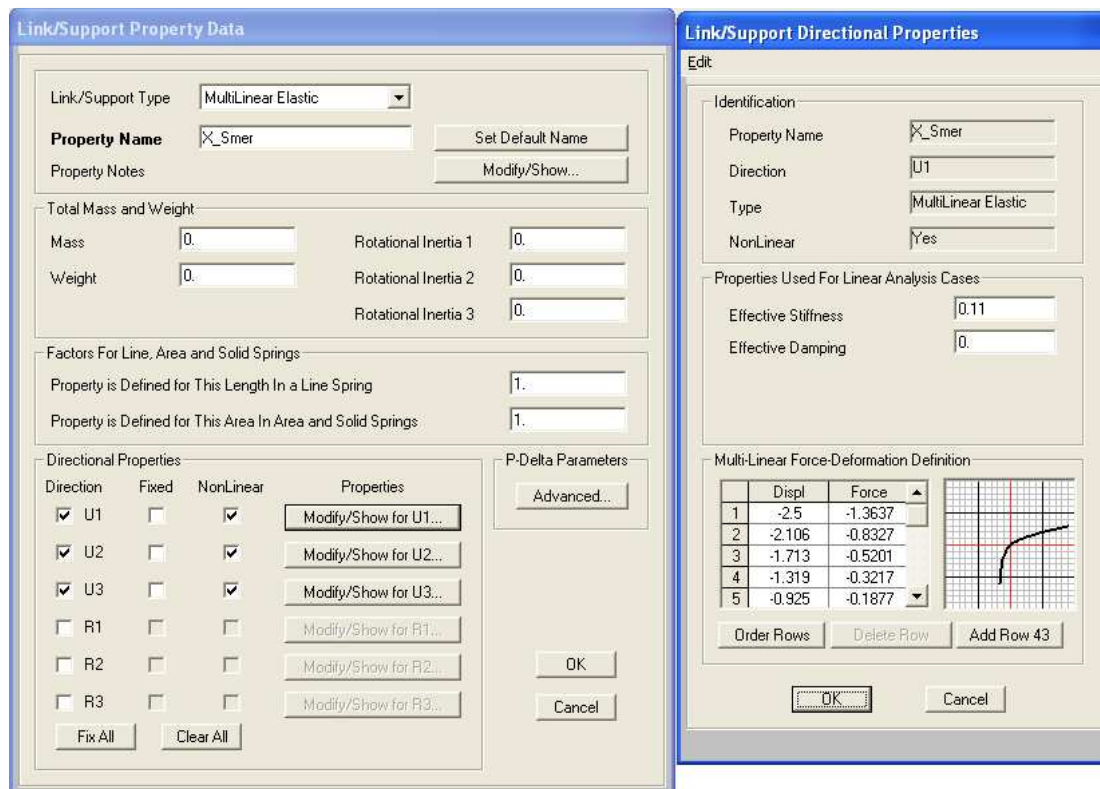
Slika 4.12 - Strižna deformacija epoksija prečno na okvir



Slika 4.13 - Diagrama V - v za epoksi v prečno na okvir (levo) in vzdolž okvirja (desno)

4.4 Podajanje vzmeti v programu SAP2000

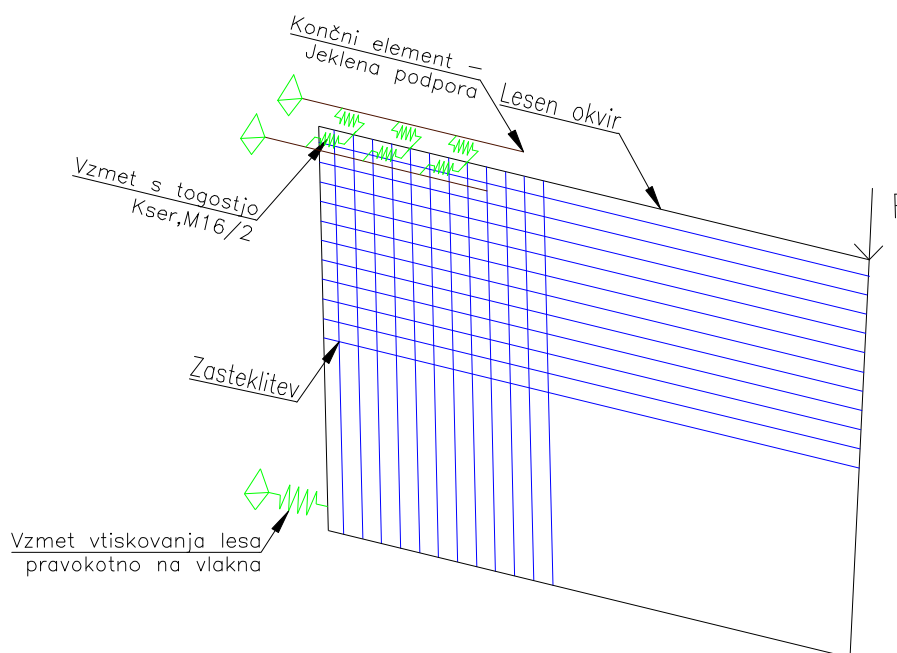
Na sliki 4.14 je prikazano okno, v katerem se podaja odsekoma linearne togosti vzmeti v vsaki od treh smeri (1,2,3) za nek vzmetni končni element. Na sliki 4.15 je prikazan model konstrukcije, zasnovan v programu SAP2000. Modre črte predstavljajo linijske končne elemente, s katerimi opišemo lesen okvir, rdeči pravokotniki ploskovne končne elemente, s katerimi opišemo zasteklitev, zelene črte pa nelinearne vzmetne končne elemente. Vzmetni končni elementi so podani tako, da je vozlišče i na težiščnici okvirja, vozlišče j pa na robu stekla.

Slika 4.14 - Podajanje diagrama $F-u$ v programu SAP2000Slika 4.15 - Model konstrukcije za analizo v programu SAP2000. Vzmeti so podane tako, da je vozlišče i na težiščnici okvirja, vozlišče j pa na robu stekla.

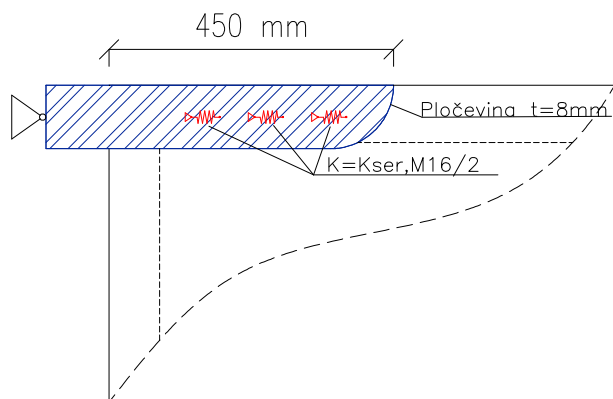
4.5 Modeliranje gornje podpore

Modeliranje podpor je prikazano na sliki 4.16. Na leseni okvir sta v zgornjem kotu priključeni dve jekleni pločevini dimenzij 45 x 10 x 0,8 cm s tremi jeklenimi vijaki M16. Pločevini sta členkasto povezani na glavni togi jeklen okvir naprave za preizkušanje, kot je prikazano na slikah 4.16 in 4.17. V programu SAP2000 sem jekleno pločevino modeliral kot samostojni element z mehanskimi lastnostmi jekla in zgoraj navedenimi geometrijskimi karakteristikami, ki je členkasto podprta (sliki 4.16 in 4.17). Na ti dve pločevini je preko vzmeti s togostjo $K_{ser}/2$ priključen leseni okvir. Z vzmetmi

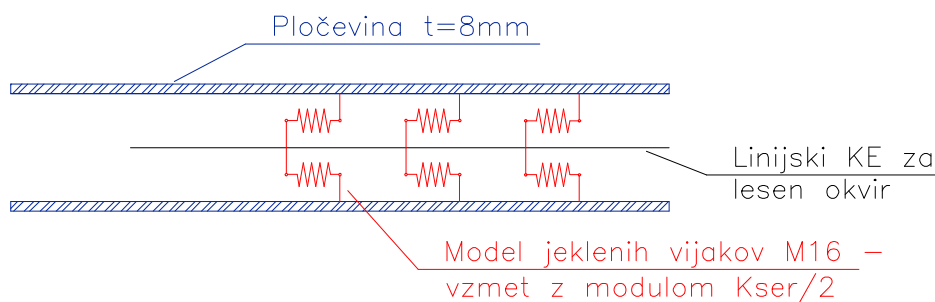
zajamem vpliv vtiskovanja vijakov v leseni okvir [5]. Določitev povezave med okvirjem in jeklenima pločevinama je opisana v nadaljevanju. Model v programu SAP2000 je prikazan na sliki 4.19.



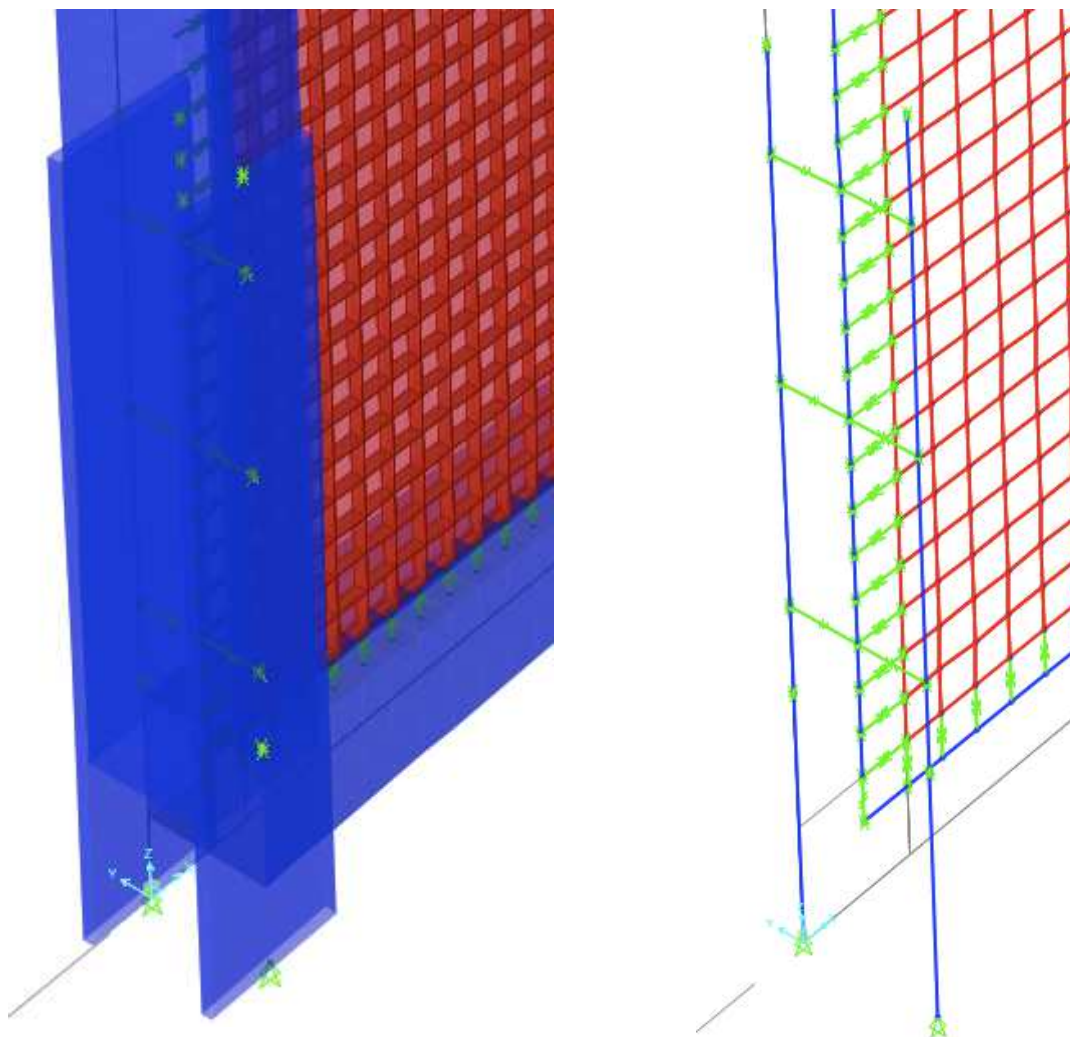
Slika 4.16 - Modeliranje podpor



Slika 4.17 - Model gornje podpore



Slika 4.18 - Model gornje podpore: tloris



Slika 4.19 - Model za numerično analizo v programu SAP2000

4.6 Modeliranje vtiskovanja svornikov v les

Sestavni elementi lesenih konstrukcij so med seboj povezani z veznimi sredstvi, katerih naloga je preprečevanje medsebojnih zamikov oz. zdrsov v priključnih ravninah. Za razliko od mehanskih veznih sredstev betonskih in jeklenih konstrukcij, vezna sredstva v lesenih konstrukcijah ne zagotavljajo povsem toge povezave, temveč prihaja v priključnih površinah zaradi njihove popustljivosti in podajnosti lesa do medsebojnih zdrsov, ki bistveno vplivajo na pomike in s tem tudi na napetostno stanja v elementih konstrukcije [5].

Mehanska vezna sredstva v lesu zaradi opisanih lastnosti niso idealno toga. Posledica tega je nastajanje zdrsov v priključnih ravninah, ki so odvisni od togosti izbranega veznega sredstva. Togost veznega sredstva s katerim preprečujemo pomike je po SIST EN 1995-1-1 definirana z modulom pomika veznega sredstva oz. modulom zdrsa K_{ser} . Ker v večini primerov nimamo pogojev, da bi sami

eksperimentalno določali modul zdrsa, si za praktično rabo največkrat pomagamo z empiričnimi izrazi, ki jih podaja EC5 [5].

Ob upoštevanju značilnosti obnašanja priključkov lesenih konstrukcij, ki jih navaja EC5, sem se odločil v modelu upoštevati medsebojne zdrse v priključnih ravninah med lesenim okvirjem in jekleno pločevino, ki sta povezana s tremi jeklenimi vijaki. EC5 podaja empirični modul pomika veznih sredstev in sicer:

$$\hat{K}_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} \cdot d}{23}$$

kjer so ρ_m povprečna gostota lesa v kg/m^3 (les = 410 kg/m^3), d pa premer vijaka v mm (premer vijakov – $d = 16 \text{ mm}$)

Od tukaj sledi:

$$\hat{K}_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} \cdot d}{23} \rightarrow \hat{K}_{ser} = \frac{410 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}^{1,5} \cdot 16 \text{ mm}}{23} = 5775,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Evrokod za stike les-jeklo navaja, da vrednost \hat{K}_{ser} pomnoži še z vrednostjo 2 in tako dobi vrednost modula zdrsa [5].

$$K_{ser} = 2 \cdot 5775,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \cdot \frac{1}{1000} = 11,55 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$$

Stika lesa in jeklene pločevine ne modeliram kot togega, ampak z vzmetnim končnim elementom, ki ima v dveh smereh togost $K_{ser}/2$. Pomika ene pločevine v smereh X in Z glede na les, pa sta določena z vzmetmi v slednjih smereh in imata togost $K_{ser}/2$.

4.7 Modeliranje spodnje podpore

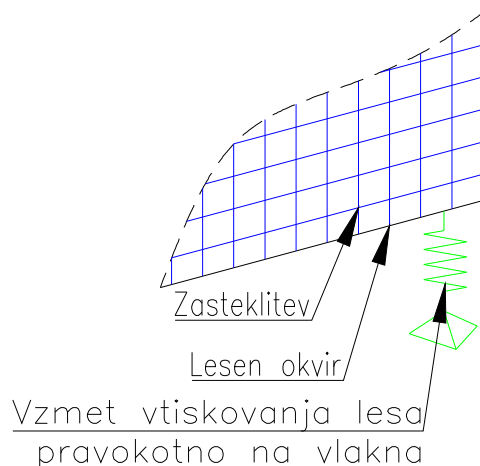
V območju spodnje tlačene podpore (slika 4.16) sem upošteval, da pride do vtiskovanja lesa pravokotno na vlakna. Pojav vtiskovanja lahko zajamem z določitvijo ustreznih robnih pogojev in sicer tako, da na mestu podpiranja modeliram vzmet s togostjo:

$$K_{\perp} = \frac{E_{pasu,\perp} \cdot A_{kont.}}{h_{pasu}}$$

kjer so $E_{pasu,\perp}$ elastični modul lesa v smeri pravokotno na vlakna v N/mm^2 , $A_{kont.}$ kontaktna površina s katero pokončnik (90 x 90 mm) nalega na venec, ta pa posledično na jekleno podlago, v mm^2 , h_{pasu} pa višina pasu v mm, ki je enaka višini spodnjega venca, torej 80 mm.

Sledi:

$$K_{\perp} = \frac{330 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 90 \text{ mm} \cdot 90 \text{ mm}}{80 \text{ mm}} = 33412,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}} = 33,41 \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \text{ (slika 4.20)}$$



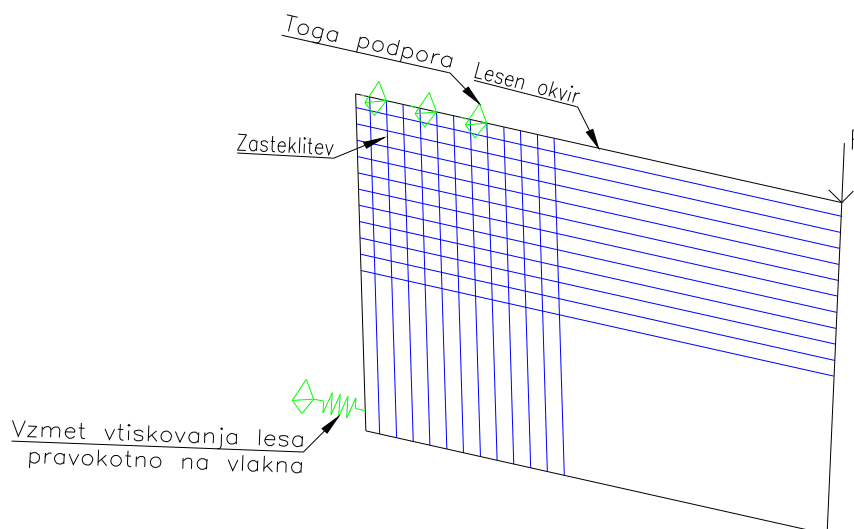
Slika 4.20 - Vzmet, ki modelira vtiskovanje v območju spodnje podpore

4.8 Modeliranje podpor na različne načine

Želel sem preučiti parametre, ki bistveno vplivajo na odziv konstrukcije. Ugotovil sem, da sta bistvena adhezivna povezava med lesenim okvirjem in zasteklitvijo ter robni pogoji. Tako sem izvedel parametrično študijo, pri kateri sem opazoval odziv konstrukcije pri različnih načinu podpiranja.

4.8.1 Način podpiranja 1

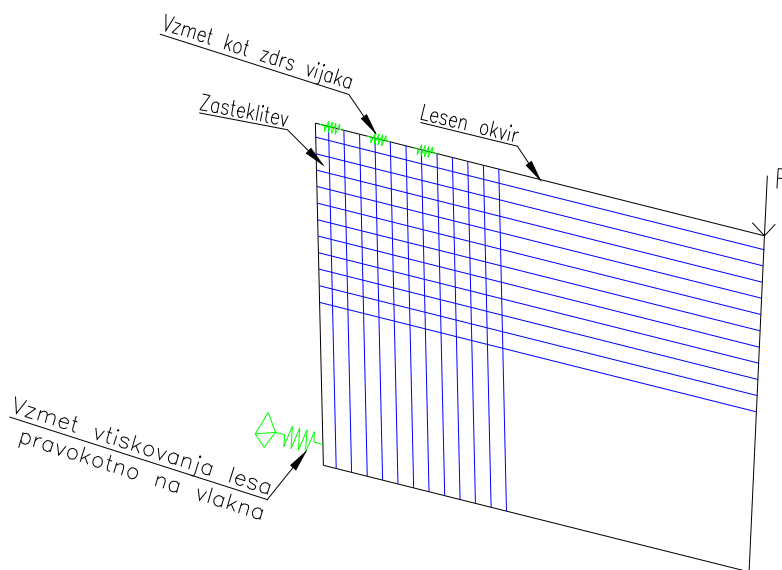
V gornji podpori so preprečeni pomiki in omogočeni zasuki, pri spodnji podpori upoštevam možnost vtiskovanja pravokotno na vlakna v vse tri smeri. Uporabim linearno funkcijo vtiskovanja K_{\perp} . Pomik izven ravnine je preprečen na vencu oz. stranici pod silo F . Oznaka tega modela je **T (togo)** (slika 4.21).



Slika 4.21 - Podpore z oznako T

4.8.2 Način podpiranja 2

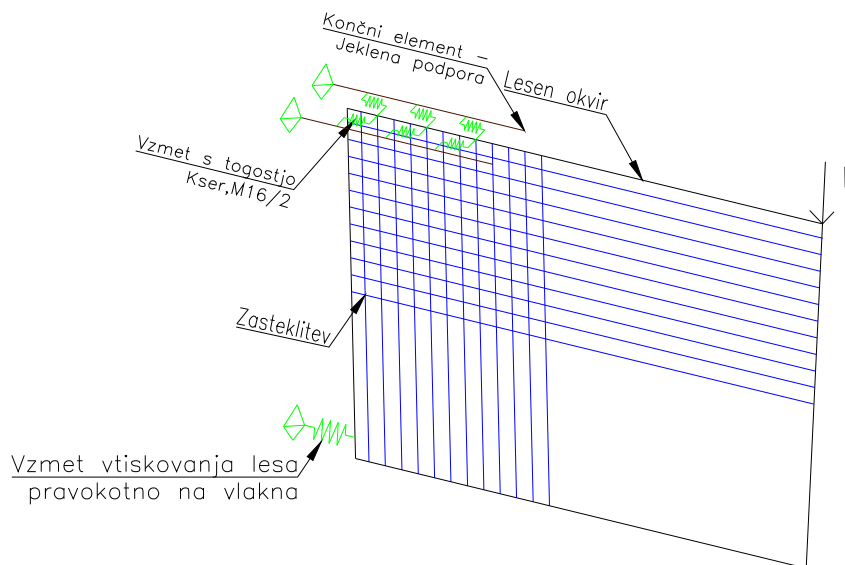
Upoštevano je vtiskovanje veznih sredstev v les v gornji podpori in vtiskovanje pravokotno na vlakna v spodnji podpori v vse tri smeri. Vpliv je zajet z vzmetmi s togostmi K_{ser} in K_{\perp} . Vtiskovanje veznih sredstev K_{ser} upoštevam tako v X kot v Z smeri. Pomiki izven ravnine so preprečeni samo vzdolž venca oz. stranice pod silo, na mestu zgornje podpore pa pomiki izven ravnine niso posebej omejeni. Oznaka modela je **P (podajno)** (slika 4.22).



Slika 4.22 - Podpore z oznako P

4.8.3 Način podpiranja 3

Poleg vtiskovanja veznih sredstev in vtiskovanja pravokotno na vlakna v spodnji podpori, sta bili v gornji podpori modelirani še obe jekleni pločevini. Pločevini sta členkasto vpeti v aparat za preizkušanje. Na leseni okvir sta pritrjeni z vzmetmi s togostjo $K_{ser}/2$, ki deluje v X in Z smer. Pomiki izven ravnine so preprečeni samo vzdolž venca oz. stranice pod silo, na mestu zgornje podpore pa pomiki izven ravnine niso posebej omejeni. Oznaka modela je **P +J (podajno + jeklena podpora)** (slika 4.23).



Slika 4.23 - Podpore z oznako P+J

4.8.4 Način podpiranja 4

Četrty način podpiranja združuje prve tri načine (slike 4.21, 4.22, 4.23), s to razliko, da je vzmet vtiskovanja lesa pravokotno na vlakna modelirana kot nelinearna vzmet. Postopek določitve slednje vzmeti je podrobneje opisan v poglavju 8. V prvih treh načinih podpiranja je vzmet vtiskovanja bila določena kot linearna funkcija opisana pod točko 4.7.

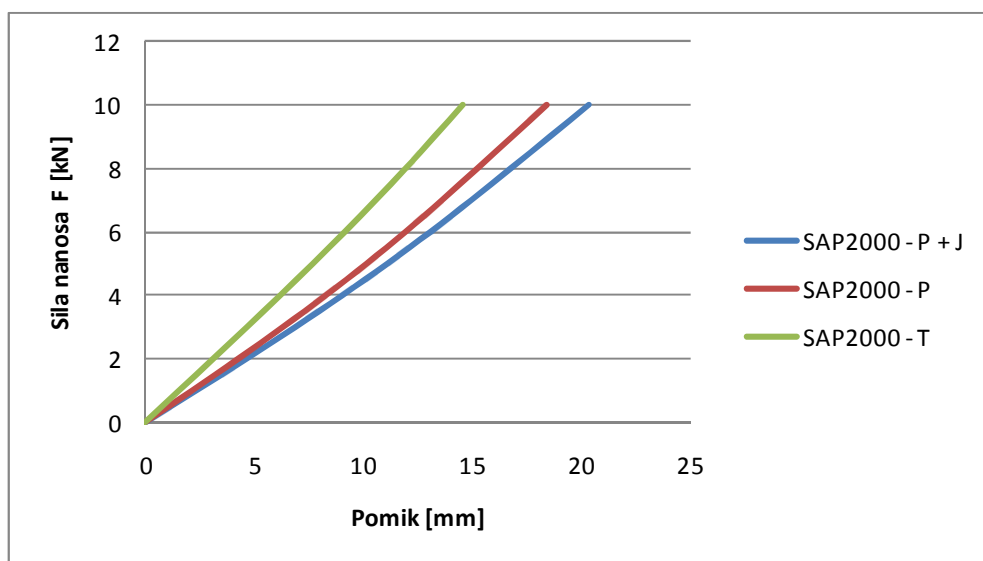
5 REZULTATI ANALIZ ZA LESENO-STEKLENO STENO S SILIKONSKIM ADHEZIVOM

5.1 Pomiki

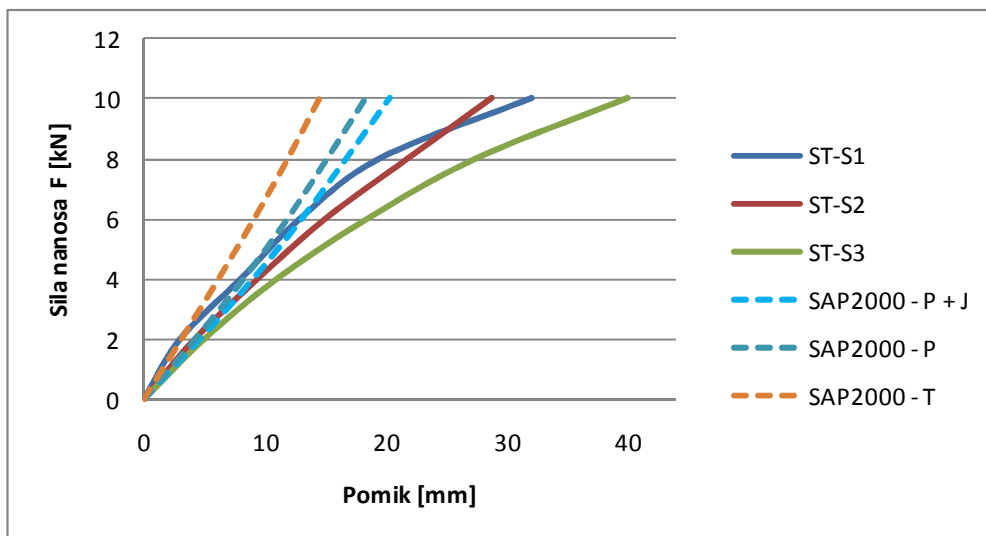
Ko sem definiral tri različne modele, za katere sem menil, da so zaradi svojih robnih pogojev najbolj smiselni, sem lahko izvedel primerjavo sile F , ki jo v korakih po 2 kN nanašam na vrh okvirja in pomika u . Tega merim na spodnji strani okvirja, in sicer pod silo F (slika 2.7). Rezultati analize ustrezajo numeričnemu modelu, v katerem so bile za adhezivno sredstvo uporabljene nelinearne vzmeti, opisane pod točko 4.2.

Iz diagrama na sliki 5.1 je razvidno, da se modela P in P+J le minimalno razlikujeta. Na osnovi tega lahko sklepam, da upoštevanje pločevine nima velike vloge, kljub temu pa je bolj pravilno, kot če je ne bi upošteval. V primeru modela P+J so pomiki nekoliko večji, ker je točka rotacije okvirja nekoliko nižja kot tam, kjer sem upošteval samo vpetje na mestu vijakov. Pomiki pri togem modelu so bistveno manjši, saj ne prihaja do dodatnih zdrsov v okolici podpiranja.

Poleg parametrične študije, pri kateri sem opravil primerjavo rezultatov ob različnih robnih pogojih, me je zanimala tudi primerjava z dejanskimi poskusi. Namen numerične simulacije je namreč prav ta, da se kolikor je mogoče približamo realnemu odzivu sistema. Tako sem rezultate, ki sem jih pridobil s pomočjo numerične analize, združil z rezultati iz poskusa, in primerjavo prikazal z diagramom na sliki 5.2. V primerjalnih diagramih sila – pomik zmoti dejstvo, da se pri povečevanju sile razlika pomika zmanjšuje, medtem ko poskusi kažejo drugačen odziv sistema.



Slika 5.1 - Diagram odnosa sila F - pomik u za različne modele (parametrična študija) za adheziv silikon Kõdiglaze S



Slika 5.2 - Diagram primerjave odnosa sila F - pomik u parametrične študije in rezultatov poskusov za adheziv silikon Ködiglaze S

5.2 Napetosti v steklu

Nazadnje sem preveril še največje tlačne in natezne napetosti v zasteklitvi, saj sem želel ugotoviti, ali je morda porušitev stekla kriterij porušitve, t.j. da se steklo poruši pred vsemi ostalimi elementi. Odločil sem se, da tlačne in natezne napetosti odčitam pri sili 10 kN in pri kritični sili, ko se numerična analiza zaustavi in neha konvertirati. Rezultati so prikazani v preglednici 5.1.

Preglednica 5.1 – Napetosti v steklu pri uporabi adheziva silikon Ködiglaze S

| | Silikon | | |
|---|---------|--------|---------|
| | P+J | P | T |
| Sila [kN] | 10 | 10 | 10 |
| Natezne napetosti [kN/mm ²] | 0.0042 | 0.0045 | 0.0042 |
| Tlačne napetosti [kN/mm ²] | -0.0195 | -0.021 | -0.011 |
| Pri največji dopustni sili [kN] | 17 | 17 | 20 |
| Natezne napetosti [kN/mm ²] | 0.0128 | 0.012 | 0.0075 |
| Tlačne napetosti [kN/mm ²] | -0.045 | -0.042 | -0.0234 |

Iz preglednice 2.2 razberem natezno in tlačno trdnost kaljenega stekla, ki znašata:

$$f_{t,0,k} = 0,045 \frac{kN}{mm^2},$$

$$f_{c,0,k} = 0,5 \frac{kN}{mm^2}.$$

Na osnovi napetosti v steklu, ki jih odčitam iz preglednice 5.1, lahko ugotovim, da se steklo ne poruši, saj pri sili 10 kN največja natezna napetost znaša $0,0045 \frac{kN}{mm^2} < f_{t,0,k} = 0,045 \frac{kN}{mm^2}$, največja tlačna napetost pa $-0,0195 \frac{kN}{mm^2} < f_{t,0,k} = 0,5 \frac{kN}{mm^2}$.

Enako preverjanje opravi pri kritični sili 17 kN, kjer največja natezna napetost znaša $0,0128 \frac{kN}{mm^2} < f_{t,0,k} = 0,045 \frac{kN}{mm^2}$, največja tlačna napetost pa $-0,0234 \frac{kN}{mm^2} < f_{t,0,k} = -0,5 \frac{kN}{mm^2}$.

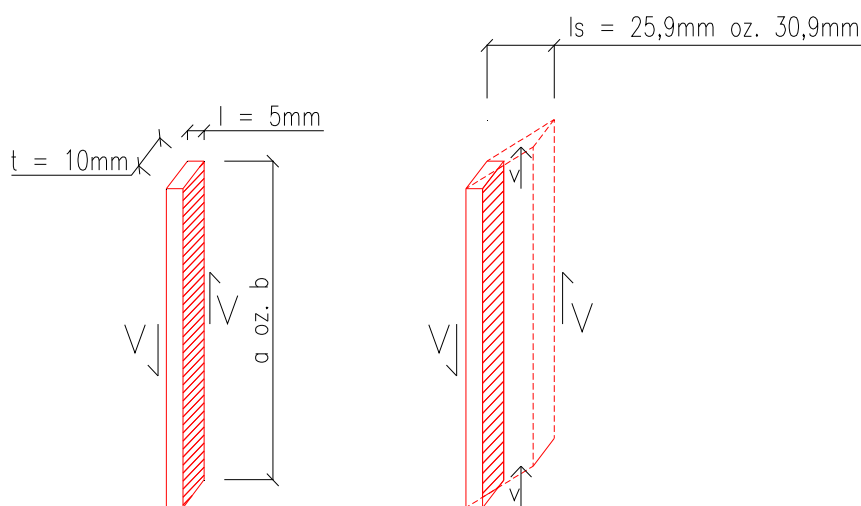
Na osnovi odčitanih vrednosti ter primerjave z natezno in tlačno trdnostjo kaljenega stekla ugotovim, da steklo z vidika porušitve ni kritično in da se nestabilnost v sistemu pojavi zaradi prekoračitve nosilnosti ostalih elementov, na primer adheziva ali stika pokončnika in venca.

5.3 Rezultati za spremenjeno strižno togost adheziva silikon Ködiglaze S

Odločim se še za drugačen, dodaten način modeliranja adhezivnega sredstva. Ta je zelo podoben tistemu, ki sem ga opisal v poglavju 4.2. Večina enačb za napetosti in deformacije (glej enačbe (4.1) – (4.3)) se pri tem ne spremeni, le v enačbi (4.4) parameter l (slika 4.7) nadomestim s parametrom ls (slika 5.3), iz česar sledi, da je:

$$\gamma = \frac{v}{ls} \rightarrow v = ls \gamma, \quad (5.1)$$

pri čemer je γ strižna deformacija (slika 3.11), v pomik v smeri sile V na robu adheziva ob steklu v mm (slika 5.3), ls pa predpostavljena debelina adheziva v mm (slika 5.3).



Slika 5.3 - Skica za določitev diagrama V - v

Za geometrijska parametra A in ls , ki nastopata v enačbi (5.1), velja:

$$A = t a, \text{ oziroma } A = t b,$$

kjer je:

$t = 10 \text{ mm}$ širina adheziva

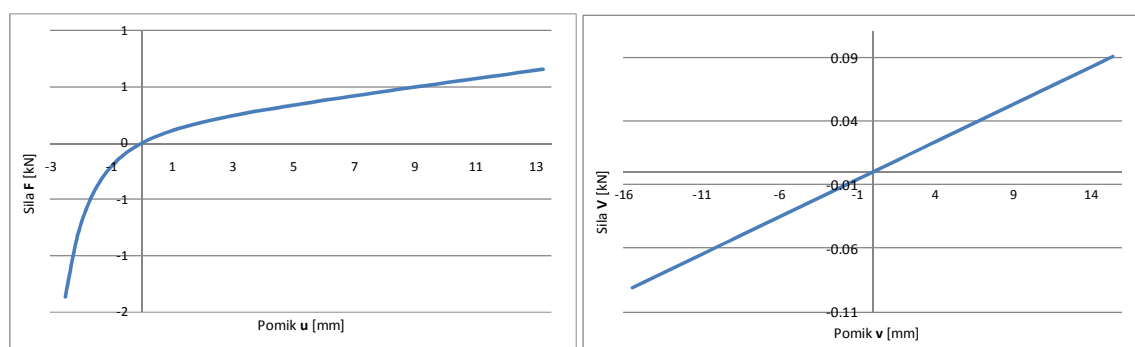
$a = 25 \text{ mm}$ dolžina ploskovnega končnega elementa v X smeri,

$b = 25,1 \text{ mm}$ dolžina ploskovnega končnega elementa v Z smeri,

$l = 5 \text{ mm}$ debelina adheziva

$l_s = 30,89 \text{ mm}$ v X smeri, oziroma $l_s = 25,86 \text{ mm}$ v Z smeri.

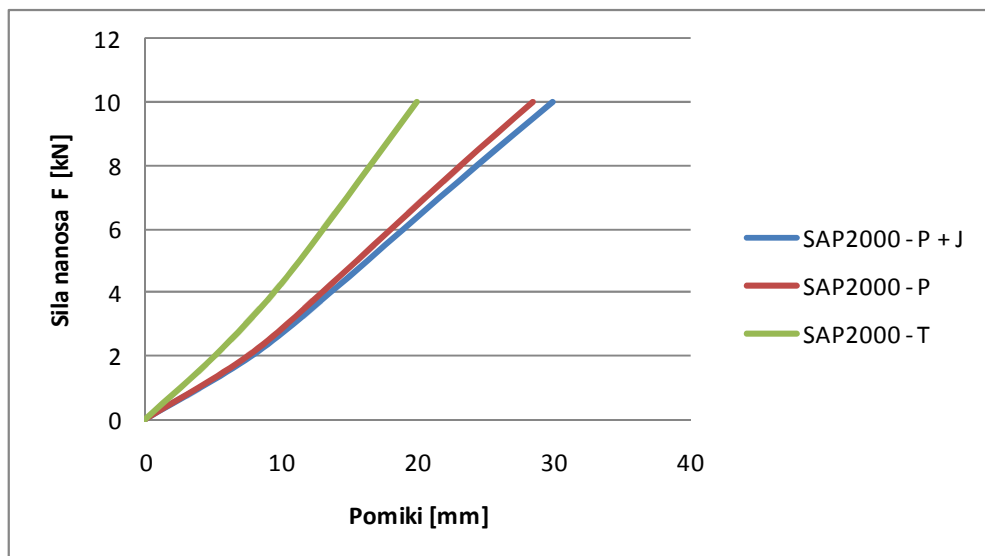
V tem primeru lahko tudi za dodatno izbrani način obravnavanja adhezivnega sredstva v numerični analizi določim togosti osnih vzmeti v smereh X in Z (sliki 4.4) ter togosti strižnih vzmeti v ravnini panela v smereh X in Z (slika 4.6). Odnos sila - pomik pri enoosni in enostrižni vzmeti za silikon Ködiglaze S je prikazan na sliki 5.4.



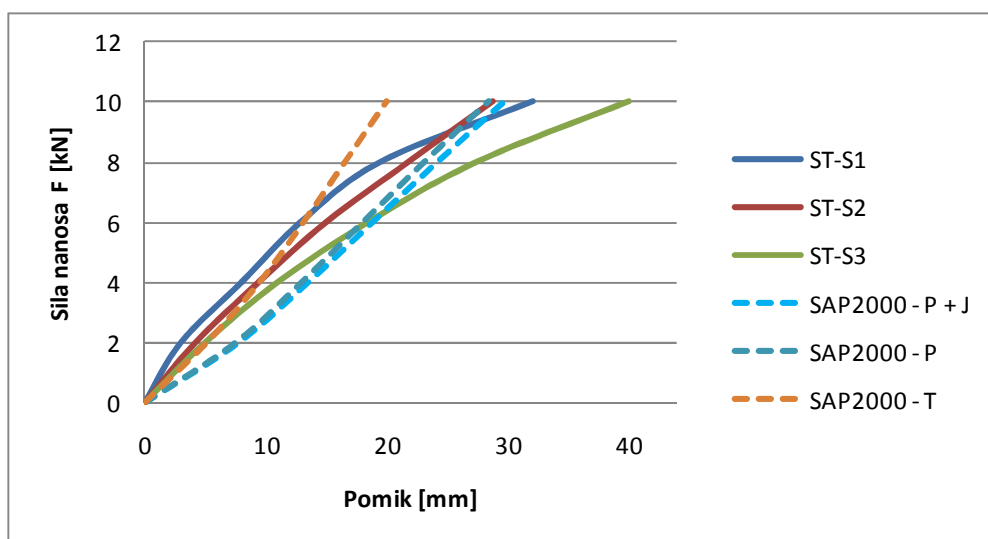
Slika 5.4 - Diagrama $F - u$ in $V - v$ za silikon Ködiglaze S, z upoštevanjem nelinearnih vzmeti opisanih pod točko 5.3

Ko določim lastnosti nelinearnih vzmeti, s katerimi nadomestim adhezivno sredstvo, lahko s pomočjo numerične analize določim iskani pomik sistema, ki ga merim na dnu okvirja, in sicer pod točko nanosa sile (slika 2.7). Rezultati parametrične študije in primerjava izračunanih pomikov s pomiki iz poskusa so prikazani na sliki 5.5 in 5.6.

Če pogledamo sliki 5.2 in 5.6, na katerih je prikazana primerjava pomikov, ki smo jih pridobili s pomočjo numerične analize, ter pomikov, ki smo jih pridobili s pomočjo poskusov, lahko opazimo, da so pomiki, izračunani s postopkom iz točke 5.3, večji kot pomiki iz točke 5.1. Razlog za to tiči v izbrani dolžini parametra, t.j. l (točka 5.1) oziroma l_s (točka 5.3), ki določa strižno obnašanje adheziva. Dejstvo, da je dolžina parametra l_s večja, privede do tega, da se pri enaki strižni sili, ki deluje na ploskvico izbranega delčka adhezivnega sredstva, izvrši večji pomik (sliki 4.9 in 5.4), posledično pa so tudi pomiki celotnega sistema večji.



Slika 5.5 - Diagram odnosa sila F - pomik u za različne modele (parametrična študija) za adheziv silikon Ködiglaze S, z upoštevanjem nelinearnih vzmeti opisanih pod točko 5.3



Slika 5.6 - Diagram primerjave odnosa sila F - pomik u parametrične študije in rezultatov poskusov za adheziv silikon Ködiglaze S, z upoštevanjem nelinearnih vzmeti opisanih pod točko 5.3

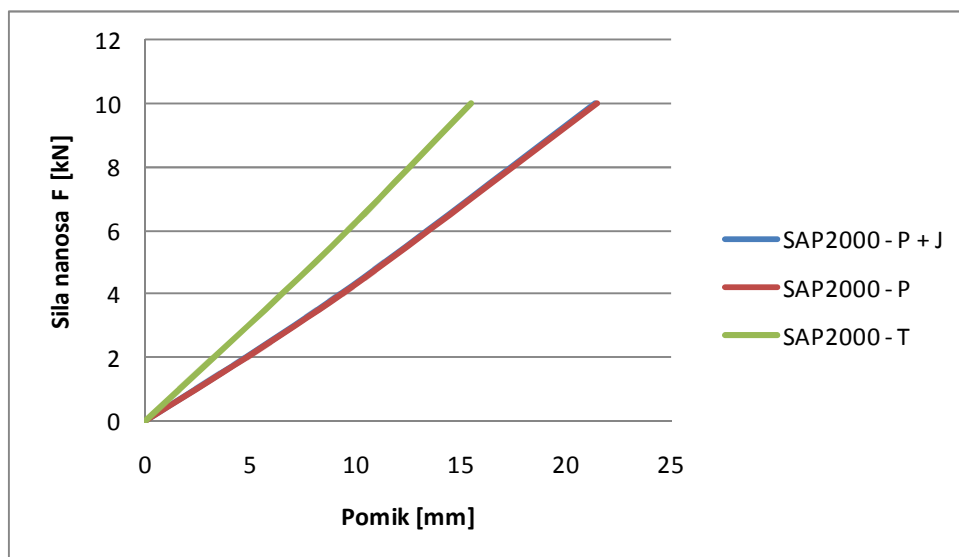
6 REZULTATI ANALIZ ZA LESENO-STEKLENO STENO S POLIURETANSKIM ADHEZIVOM

6.1 Pomiki

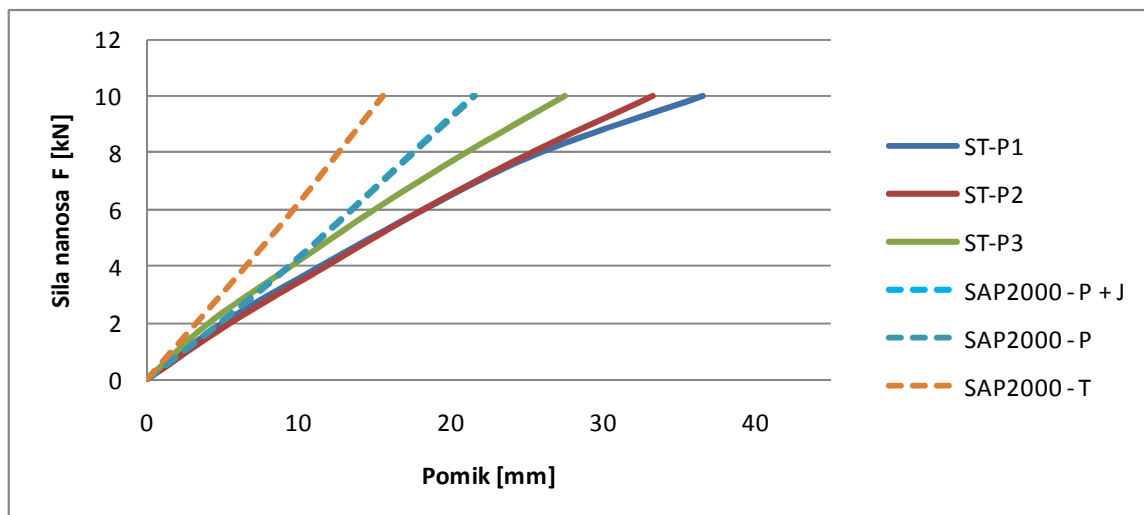
Analize, ki sem jo izvedel s silikonskim adhezivom tipa Ködiglaze S, sem ponovil s poliuretanskim adhezivom tipa Ködiglaze P. Tudi v tem primeru sem s pomočjo numerične analize določil odnos sile nanosa F , ki sem jo nanašal na zgornji del okvirja, in sicer v korakih po 2 kN, s pomikom u , ki sem ga meril pod silo nanosa (slika 2.7). Lastnosti uporabljenih nelinearnih vzmeti za adheziv, ki sem jih uporabil pri tej analizi, so opisane pod točko 4.2.

V primeru poliuretanskega veziva Ködiglaze P med modeloma P in P+J ni razlik (slika 6.1). Iz tega lahko sklepam, da kompleksnejše modeliranje velike jeklene podpore nima bistvene vloge, kljub temu pa so pomiki v primeru modela T pričakovano manjši. Razlog za to je večja togost celotnega sistema, kar je posledica povsem onemogočenih pomikov v okolici velike podpore.

Čeprav se odziva sistema pri uporabi silikona Ködiglaze S oziroma poliuretana Ködiglaze P nekoliko razlikujeta, je pri numerični analizi v območju končne sile spet vidno utrjevanje, medtem ko realno stanje kaže delno plastifikacijo.



Slika 6.1 - Diagram odnosa sila F - pomik u za različne modele (parametrična študija) za adheziv poliuretana Ködiglaze P



Slika 6.2 - Diagram primerjave odnosa sila F - pomik u parametrične študije in rezultatov poskusov za adheziv poliuretan Ködiglaze P

6.2 Napetosti v steklu

Tako kot pri silikonu Ködiglaze S, napetosti v steklu preverim tudi v primeru uporabe poliuretanskega veziva tipa Ködiglaze P. Vnovič odčitam napetosti pri sili 10 kN in pri sili, kjer numerična analiza ne konvergira več. Rezultati so prikazani v preglednici 6.1.

Preglednica 6.1 – Napetosti v steklu pri uporabi adheziva poliuretan Ködiglaze P

| | Poliuretan | | |
|---|------------|---------|---------|
| | P+J | P | T |
| Sila [kN] | 10 | 10 | 10 |
| Natezne napetosti [kN/mm ²] | 0.0036 | 0.0039 | 0.0036 |
| Tlačne napetosti [kN/mm ²] | -0.0169 | -0.0169 | -0.0091 |
| Pri največji dopustni sili [kN] | 14 | 14 | 18 |
| Natezne napetosti [kN/mm ²] | 0.0066 | 0.0084 | 0.006 |
| Tlačne napetosti [kN/mm ²] | -0.026 | -0.0308 | -0.0205 |

Na osnovi napetosti v notranjosti stekla, ki jih razberem iz preglednice 6.1, lahko hitro preverim in ugotovim, da se steklo ne poruši niti pri uporabi poliuretana Ködiglaze P, saj pri sili 10 kN največja natezna napetost znaša $0,0039 \frac{kN}{mm^2} < f_{t,0,k} = 0,045 \frac{kN}{mm^2}$, največja tlačna napetost pa $-0,0169 \frac{kN}{mm^2} < f_{t,0,k} = 0,5 \frac{kN}{mm^2}$. Enako preverim tudi pri kritični sili 14 kN in modelu P, kjer

največja natezna napetost znaša $0,0084 \frac{kN}{mm^2} < f_{t,0,k} = 0,045 \frac{kN}{mm^2}$, največja tlačna napetost pa $-0,0308 \frac{kN}{mm^2} < f_{t,0,k} = -0,5 \frac{kN}{mm^2}$.

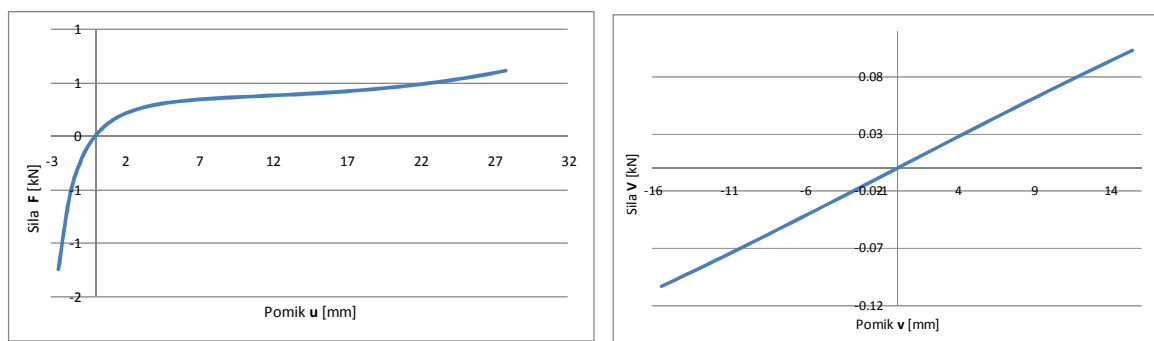
Iz primerjave napetosti v steklu je mogoče ugotoviti, da te ne vplivajo na porušitev sistema, saj tudi pri največji sili, ki jo dosežemo v numerični analizi, napetosti ne presegajo trdnosti kaljenega stekla.

6.3 Rezultati za spremenjeno strižno togost adheziva poliuretan Ködiglaze P

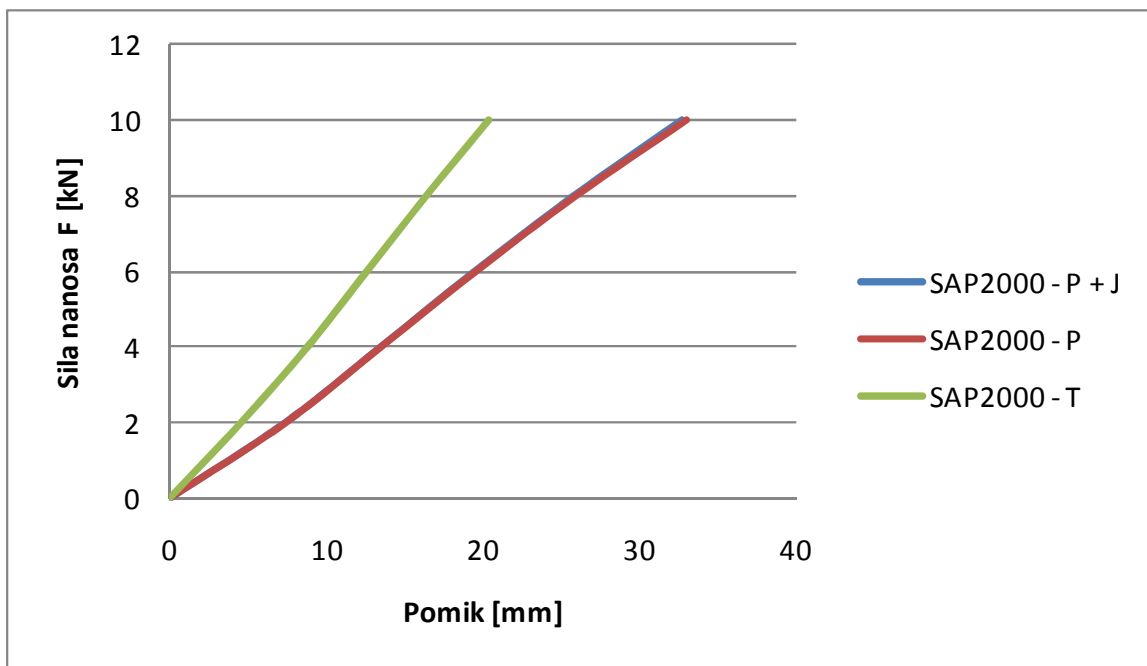
Način modeliranja adhezivnega sredstva, ki je opisan pod točko 5.3, uporabim tudi za modeliranje poliuretanskega adheziva tipa Ködiglaze P. Postopek določitve diagrama sila (F) – pomik (u) in strižna sila (V) – strižni pomik (v) je torej enak postopku pod točko 5.3. Diagrama, ki sta bila določena s tem postopkom, sta prikazana na sliki 6.3.

Ko sta diagrama $F - u$ in $V - v$ določena, lahko s pomočjo numerične analize izračunam želeni pomik. Rezultati analize, kjer prikažem parametrično študijo, pri kateri sem upošteval različne robne pogoje, ter primerjavo računskih in eksperimentalnih pomikov, so prikazani na slikah 6.4 in 6.5.

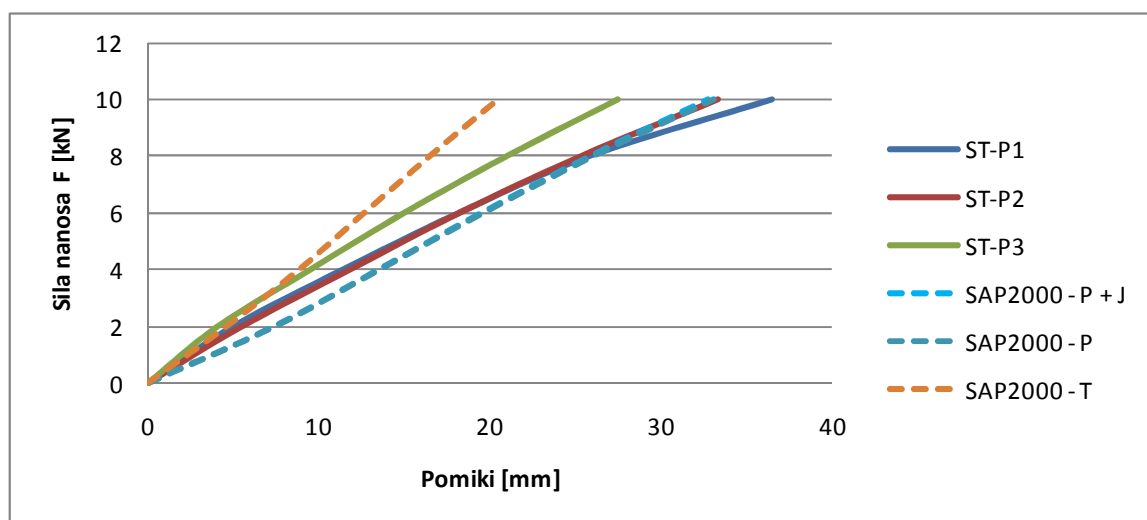
Tako kot pri uporabi silikona Ködiglaze S se tudi tukaj pokaže, da so pomiki sistema večji (glej sliki 6.2 in 6.5), če uporabim strižno dolžino l_s (točka 5.3), saj je ta daljša od dolžine parametra l (točka 6.1). To pomeni, da se pri enaki strižni sili, ki deluje na adhezivno sredstvo, izvrši večji strižni pomik adheziva, kar je mogoče opaziti na pomiku celotnega sistema.



Slika 6.3 - Diagrama $F - u$ in $V - v$ za poliuretan Ködiglaze P, z upoštevanjem nelinearnih vzmeti opisanih pod točko 5.3



Slika 6.4 - Diagram odnosa sila F - pomik u za različne modele (parametrična študija) za poliuretan Kōdiglaze P, z upoštevanjem nelinearnih vzmeti opisanih pod točko 5.3



Slika 6.5 - Diagram primerjave odnosa sila F - pomik u parametrične študije in rezultatov poskusov za adheziv poliuretan Kōdiglaze P, z upoštevanjem nelinearnih vzmeti opisanih pod točko 5.3

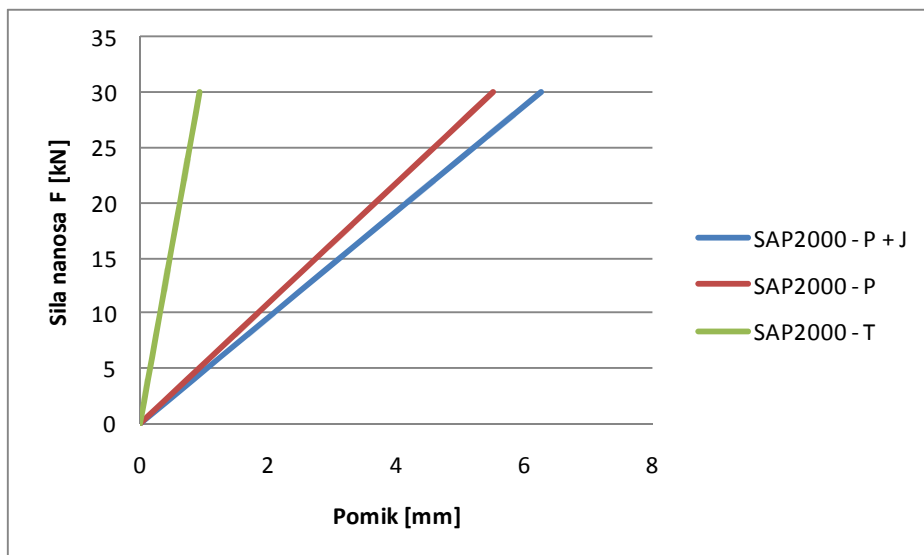
7 REZULTATI ANALIZ ZA LESENO-STEKLENO STENO Z EPOKSIDNIM ADHEZIVOM

7.1 Pomiki

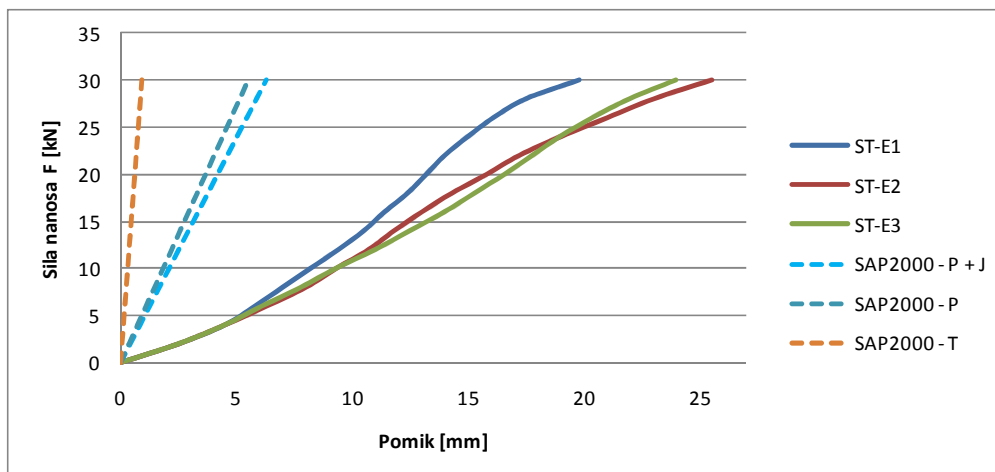
Parametrično študijo sem izvedel tudi v primeru uporabe adhezivnega sredstva epoksi Körapox 558. Zaradi materialnih lastnosti epoksija Körapox 558 se pri njegovi uporabi zasteklitve na leseni okvir pritrdi nekoliko drugače kot v primeru uporabe predhodno opisanega silikona Ködiglaze S oziroma poliuretana Ködiglaze P. Pritrjevanje zasteklitve je razvidno na slikah 2.3 in 2.4. Zaradi drugačne geometrije in obnašanja epoksija Körapox 558 je postopek določanja lastnosti nelinearnih vzmeti, ki v sledeči numerični analizi nadomestijo adheziv, opisan pod točko 4.3. Ko so nelinearne vzmeti določene v skladu s točko 4.3, lahko določim odnos med silo nanosa F in pomikom u , ki ga merim pod silo nanosa (slika 2.7).

Tudi pri uporabi epoksija se izkaže podobno kot pri uporabi prejšnjih dveh adhezivov. Med modeloma P in P+J skoraj ni razlik, rezultati pri modelu T pa odstopajo (slika 7.1).

Zaradi togosti samega adhezivnega sredstva v tem primeru delna plastifikacija, ni dobro vidna, potek $F - u$ je skoraj linearen in tak je tudi odziv, ki ga dobimo pri numerični analizi. Pomislek, ki se tukaj pojavi, pa se nanaša na ustreznost numeričnega modela, saj za razliko od drugih dveh adhezivnih sredstev analiza z epoksijem najbolj odstopa (slika 7.2).



Slika 7.1 - Diagram odnosa sila F - pomik u za različne modele (parametrična študija) za adheziv epoksi Körapox 558



Slika 7.2 - Diagram primerjave odnosa sila F - pomik u parametrične študije in rezultatov poskusov za adheziv epoksi Kōrapox 558

7.2 Napetosti v steklu

Sledi še preverjanje napetosti v primeru uporabe adheziva epoksi Kōrapox 558, tudi tokrat pri sili 10 kN in sili, kjer se numerična analiza zaustavi.

Preglednica 7.1 - Napetosti v steklu pri uporabi adheziva epoksi Kōrapox 558

| | Epoksi | | |
|---|--------|---------|---------|
| | P+J | P | T |
| Sila [kN] | 10 | 10 | 10 |
| Natezne napetosti [kN/mm ²] | 0.063 | 0.0171 | 0.05 |
| Tlačne napetosti [kN/mm ²] | -0.048 | -0.022 | -0.0385 |
| Pri največji dopustni sili [kN] | 40 | 40 | 40 |
| Natezne napetosti [kN/mm ²] | 0.225 | 0.063 | 0.18 |
| Tlačne napetosti [kN/mm ²] | -0.192 | -0.0825 | -0.14 |

Na osnovi napetosti v notranjosti stekla, ki jih razberem iz preglednice 7.1, lahko hitro ugotovim, da se steklo ne poruši niti v primeru uporabe epoksija, saj pri sili 10 kN največja natezna napetost znaša $0,0171 \frac{kN}{mm^2} < f_{t,0,k} = 0,045 \frac{kN}{mm^2}$, največja tlačna napetost pa $-0,0385 < f_{t,0,k} = 0,5 \frac{kN}{mm^2}$.

Enako preverimo pri kritični sili 40 kN, kjer največja natezna napetost znaša $0,225 \frac{kN}{mm^2} < f_{t,0,k} = 0,045 \frac{kN}{mm^2}$ največja tlačna napetost pa $-0,192 \frac{kN}{mm^2} < f_{t,0,k} = -0,5 \frac{kN}{mm^2}$.

Čeprav sem pri uporabi epoksija Kōrapox 558 sistem obremenil s silo, ki je bila bistveno večja kot sile, uporabljene pri prejšnjih dveh adhezivih, steklo še vedno ni merodajen kriterij porušitve, saj dejanske napetosti nikjer ne preokorajijo dopustnih.

7.3 Rezultati s spremenjeno strižno togostjo adheziva epoksi Kōrapox 558

Tudi pri spremenjeni togosti epoksidnega adheziva sem postopal podobno kot pri točki 4.3, le da sem v tem primeru enačbi (4.5) in (4.7), ki določata strižno silo, nadomestil z eno samo enačbo, ki velja tako za prečno kot za vzdolžno smer delovanja. Za strižno vzmet vzdolž in prečno na okvir torej velja (glej slike 4.10 – 4.12):

$V = 2 \tau A$ (2 je zato, ker imamo 2 sloja lepila) in $v = \gamma t$, kjer je

$A = l a$ oziroma $A = l b$,

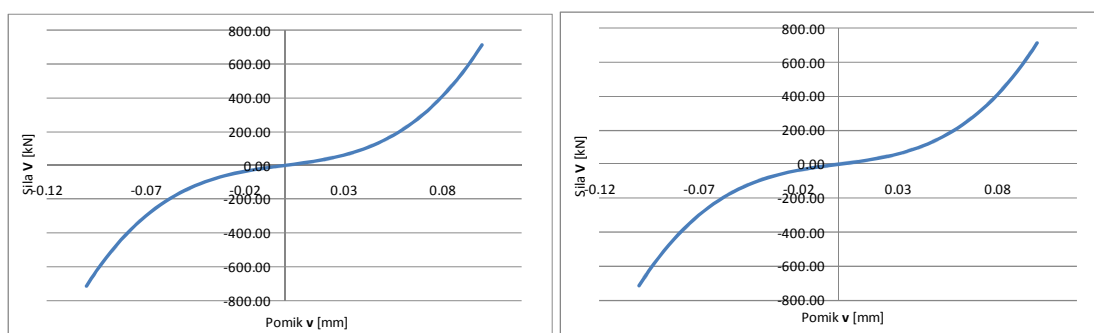
$l = 15 \text{ mm}$ širina enega sloja epoksija,

$a = 25 \text{ mm}$ je dolžina ploskovnega končnega elementa v X smeri,

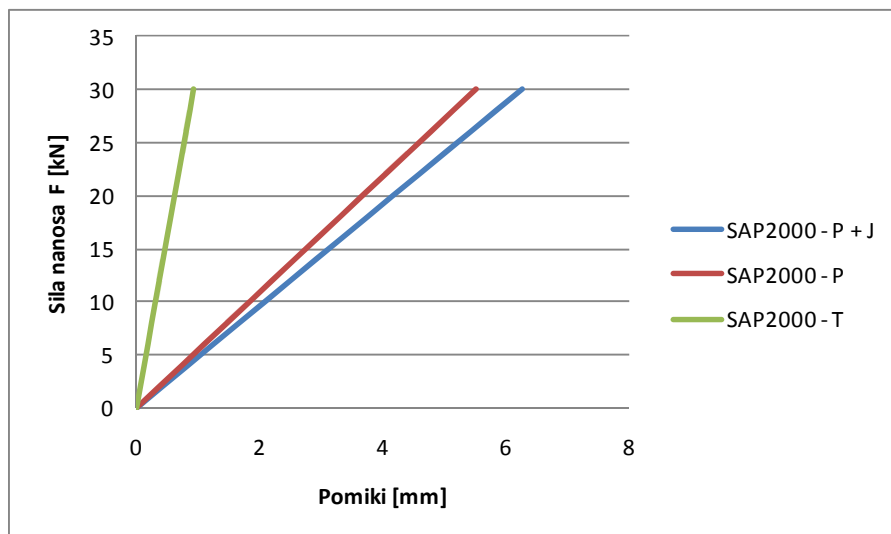
$b = 25,1 \text{ mm}$ je dolžina ploskovnega končnega elementa v Z smeri,

$t = 0,5 \text{ mm}$ debelina enega sloja epoksija.

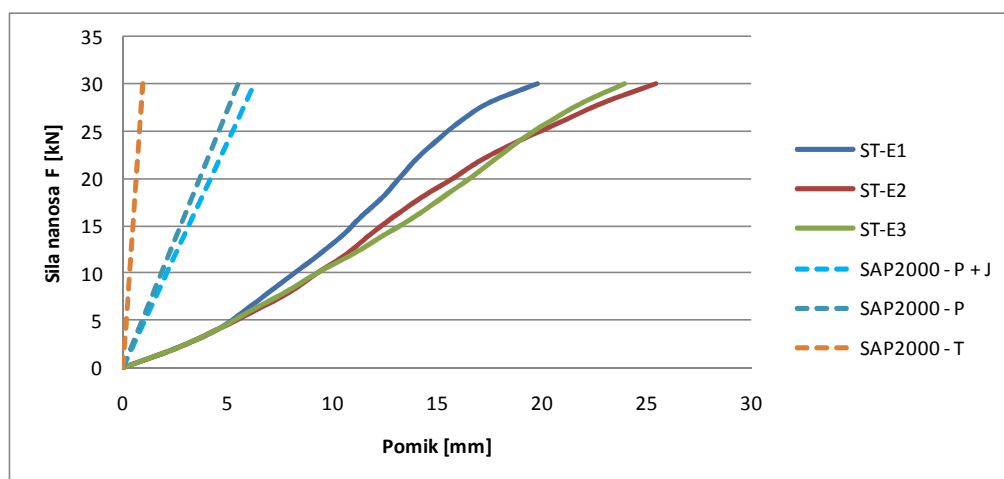
S pomočjo teh enačb in parametrov lahko določim diagrama za strig vzdolž okvirja in za strig prečno na okvir, kar je prikazano na sliki 7.3. Če primerjam rezultate, ki so bili dobljeni s togostjo vzmeti iz točke 4.3 (slika 7.2), in rezultate, za katere je bila uporabljena togost, opisana pod slednjo točko 7.3 (slika 7.5), lahko opazim, da razlike skoraj ni. To sem tudi sam pričakoval, saj so enačbe za določitev nelinearnih vzmeti skoraj enake, razlikuje pa se le upoštevanje možnega paraboličnega poteka napetosti, ki je bil upoštevan v postopku iz točke 4.3, izpuščen pa pri postopku iz točke 7.3.



Slika 7.3 - Diagrama $V - v$ za epoksi Kōrapox 558 vzdolžno (levo) in prečno (desno) na okvir, z upoštevanjem nelinearnih vzmeti opisanih pod točko 7.3



Slika 7.4 - Diagram odnosa sila F - pomik u za različne modele (parametrična študija) za adheziv epoksi Kōrapox 558, z upoštevanjem nelinearnih vzmeti opisanih pod točko 7.3



Slika 7.5 - Diagram primerjave odnosa sila F - pomik u parametrične študije in rezultatov poskusov za adheziv epoksi Kōrapox 558, z upoštevanjem nelinearnih vzmeti opisanih pod točko 7.3

8 NATANČNEJŠE MODELIRANJE VTISKOVANJA LESA PRAVOKOTNO NA VLAKNA

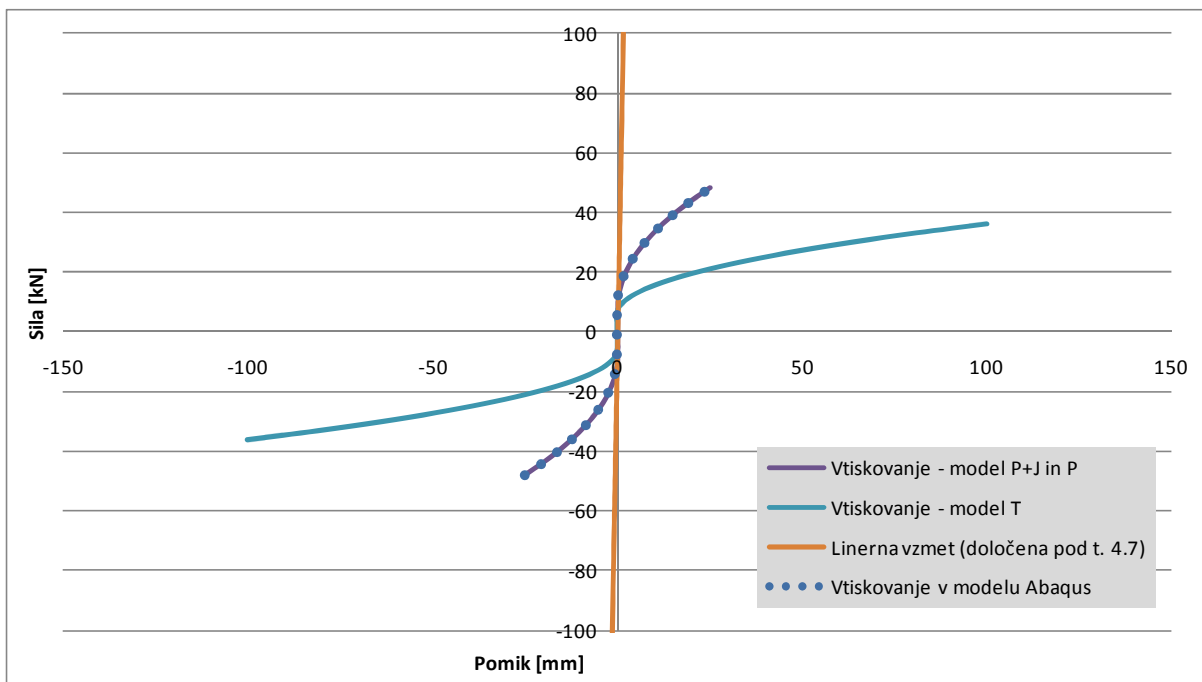
V primerjalnih diagramih sila F – pomik u , ki so v poglavjih 5-7 prikazani kot rezultati numerične analize, zmoti dejstvo, da se pri povečevanju sile razlika pomika zmanjšuje, medtem ko poskusi kažejo drugačen odziv sistema. Rezultati numerične analize nakazujejo na utrjevanje adhezivnih sredstev, kar z inženirskega vidika ni povsem smiselno.

Ker je bila jeklena podpora, s katero povežemo leseni okvir in aparat za preizkušanje, že razčlenjena (točki 4.5 in 4.6), sem se odločil, da bom uskladiril vzmet, ki predstavlja vtiskovanje lesa pravokotno na vlakna (točka 4.7).

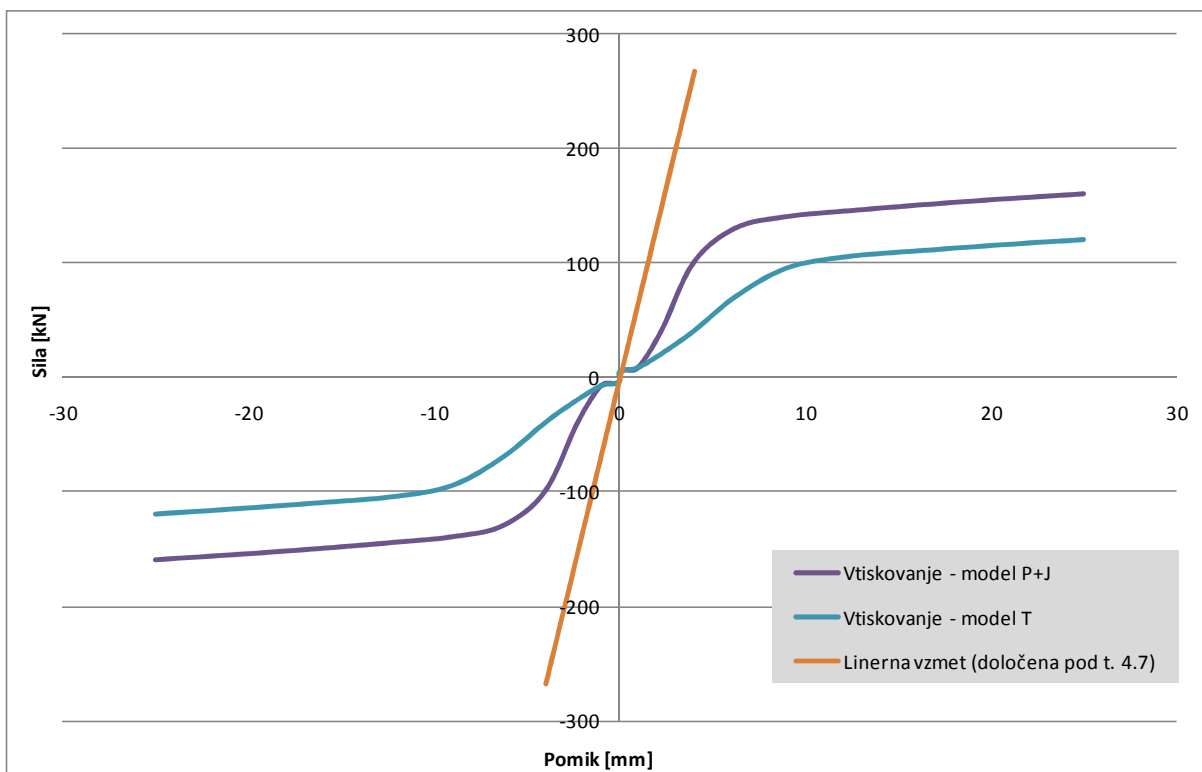
Vtiskovanje lesa pravokotno na vlakna je bilo pri numeričnih izračunih, ki so predstavljeni v poglavjih 5 - 7, predpostavljeno z linearno funkcijo vtiskovanja K_{\perp} , katere vrednost sem določil v točki 4.7. Linearno vzmet vtiskovanja zato v tem poglavju nadomestim z nelinearno vzmetjo, ki mi omogoča, da izničim navidezno utrjevanje sistema in se tako približam eksperimentalnim pomikom.

Iz rezultatov numeričnih analiz, opisanih v poglavjih 5 - 7, lahko opazim, da se pomiki pri modelu **T** v prvih korakih ujamejo s poskusi, nato pa se začne sistem utrjevati. Nasprotno je pri modelih **P+J in P** konstrukcija preveč podajna na začetku, v naslednjih korakih pa pade v območje pomikov, ki jih dobimo s pomočjo eksperimentalnih poskusov, in se nato še naprej utrjuje. Iz tega sledi, da moramo v prvih korakih nanosa sile F zagotoviti večjo začetno togost, s katero bi se približali eksperimentalnim pomikom, v nadaljevanju pa moramo izničiti navidezno utrjevanje sistema. Ob upoštevanju slednjih predpostavk sem s poskušanjem določil nelinearno funkcijo vtiskovanja, s katero sem želel doseči želeni učinek. Pri določitvi te funkcije sem si pomagal z eksperimentalno izmerjenim vtiskovanjem lesa (slika 2.10), ki je v predpostavljene nelinearne funkcij vtiskovanja upoštevan na začetku diagrama odnosa sila F – pomik u (slika 8.1 in 8.2).

Pri nadaljnji analizi sem upošteval nelinearne funkcije vtiskovanja, ki so prikazane na sliki 8.1 v primeru uporabe adheziva silikon Ködiglaze S oziroma poliuretana Ködiglaze P in na sliki 8.2 v primeru uporabe epoksija Körapox 558. Na obeh slikah je prikazana tudi linearna funkcija vtiskovanja K_{\perp} , ki je bila določena pod točko 4.7 in uporabljena pri numerični analizi v poglavjih 5 - 7.



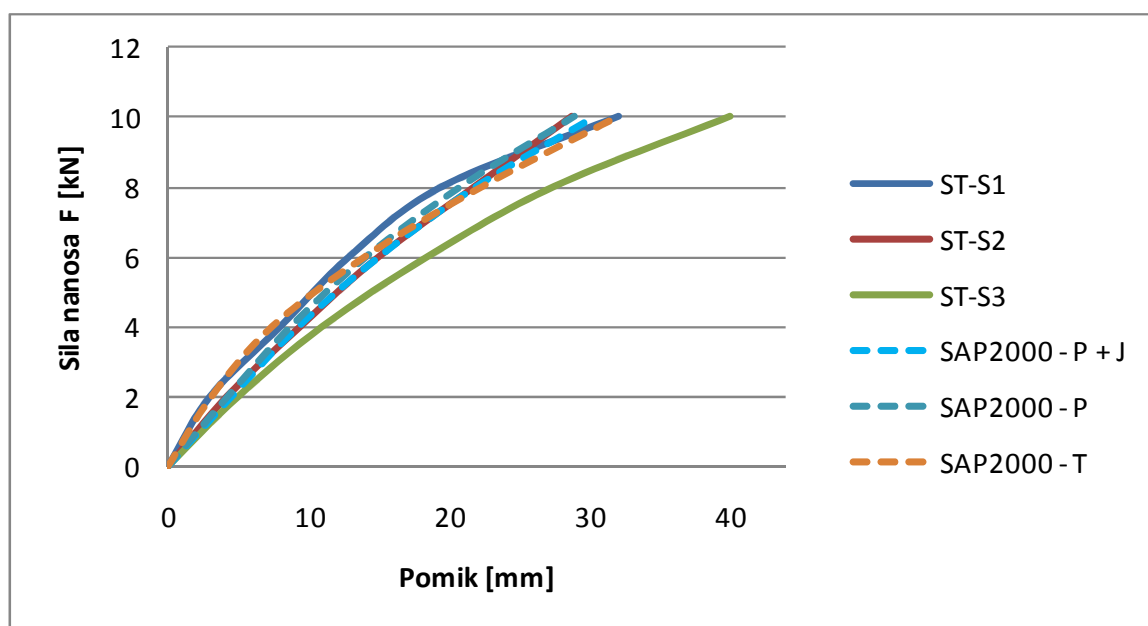
Slika 8.1 - Vzmet vtiskovanja, ki jo uporabim v primeru uporabe adheziva silikon Ködiglaze S ali poliuretana Ködiglaze P. Za primerjavo sta dodani še funkciji vtiskovanja linearne vzmeti iz točke 4.7 in vzmet, ki sem jo uporabil pri analizi s programom Abaqus.



Slika 8.2 - Vzmet vtiskovanja, ki sem jo uporabil v primeru uporabe adheziva epoksi Körapox 558. Za primerjavo je dodana še funkcija vtiskovanja linearne vzmeti iz točke 4.7.

8.1 Primerjava pomikov za silikon Ködiglaze S

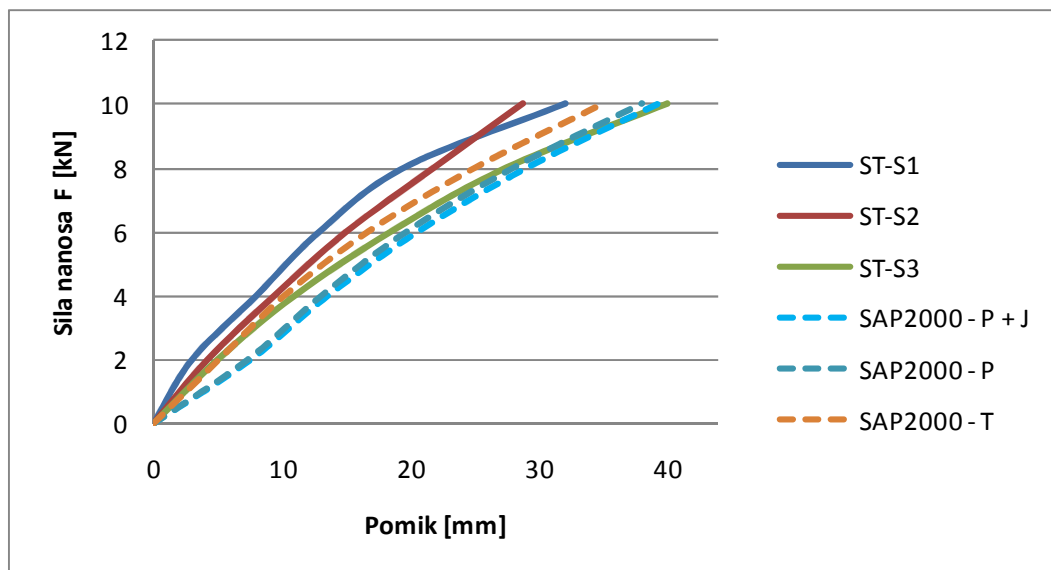
Na diagramu na sliki 8.3 so prikazani rezultati analize, pri kateri sem upošteval nelinearno funkcijo vtiskovanja lesa pravokotno na vlakna (slika 8.1) in nelinearne vzmeti za adheziv, ki so opisane pod točko 4.2. Iz rezultatov je razvidno, da je uporaba nelinearne funkcije vtiskovanja smiselna, saj z njo dosežem primerljiv odziv med numerično analizo in eksperimentalnim poskusom. Tukaj pa se pojavi težava enolične določitve funkcije vtiskovanja, saj lahko to določimo le s pomočjo že znanih pomikov, ki smo jih pridobili na osnovi poskusov, ter s pomočjo dejansko izmerjenega vtiskovanja lesa pravokotno na vlakna.



Slika 8.3 - Diagram primerjave odnosa sila F - pomik u parametrične študije in rezultatov poskusov za adheziv silikon Ködiglaze S, z upoštevanjem nelinearne funkcije vtiskovanja lesa in nelinearnih vzmeti določenih pod točko 4.2

8.1.1 Pomiki s spremenjeno strižno togostjo adheziva silikon Ködiglaze S

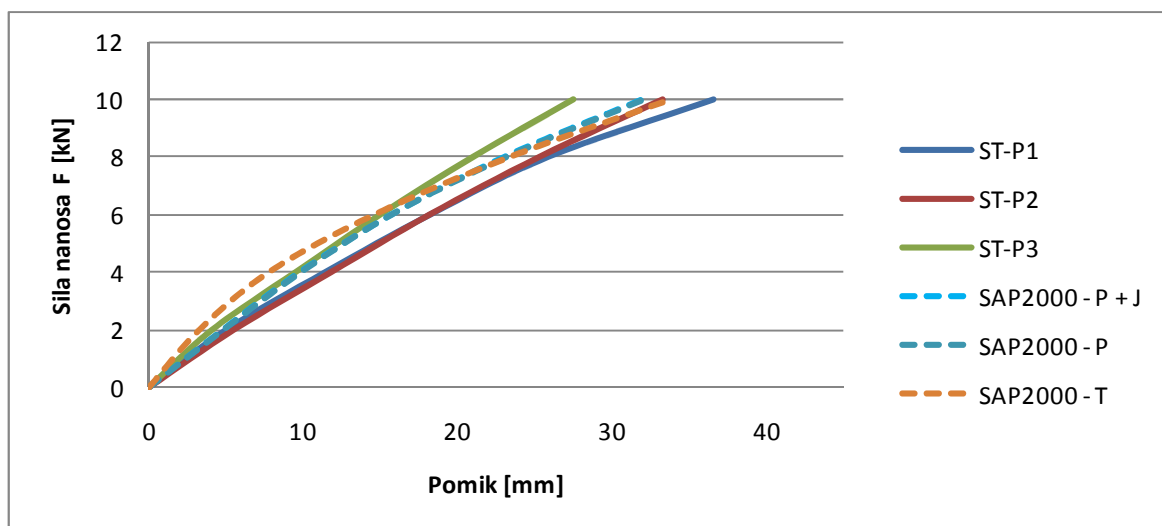
Enako funkcijo vtiskovanja (slika 8.1) sem uporabil tudi, ko sem želel izračunati pomik sistema, pri katerem sem upošteval spremenjene strižne togosti nelinearnih vzmeti adheziva. Te so določene s postopkom, ki je predstavljen v poglavju 5.3. Tako kot v točki 5.3 se tudi tukaj izkaže, da so v primeru spremenjene togosti adheziva pomiki nekoliko večji, saj je dolžina parametra l_s (točka 5.3) večja kot dolžina parametra l (4.2). Strižni pomik je odvisen prav od zadnjih dveh parametrov. Rezultati numerične analize s spremenjeno strižno togostjo, ki sem jo določil v točki 5.3 in kjer sem upošteval nelinearne vzmeti vtiskovanja, so prikazani na sliki 8.4.



Slika 8.4 - Diagram primerjave odnosa sila F - pomik u parametrične študije in rezultatov poskusov za adheziv silikon Ködiglaze S, z upoštevanjem nelinearne funkcije vtiskovanja lesa in nelinearnih vzmeti določenih pod točko 5.3

8.2 Primerjava pomikov za poliuretan Ködiglaze P

Numerično analizo, pri kateri sem uporabil nelinearno funkcijo vtiskovanja (slika 8.1) in nelinearne vzmeti, določene s postopkom 4.2, sem opravil tudi v primeru uporabe adheziva poliuretan Ködiglaze P. Končni razmislek o rezultatih analize je podoben kot v primeru uporabe silikona tipa Ködiglaze S. Nelinearna vzmet vtiskovanja pripomore k boljšemu ujemanju numeričnih in eksperimentalnih rezultatov, ne moremo je pa enolično določiti. Rezultati so prikazani na sliki 8.5.

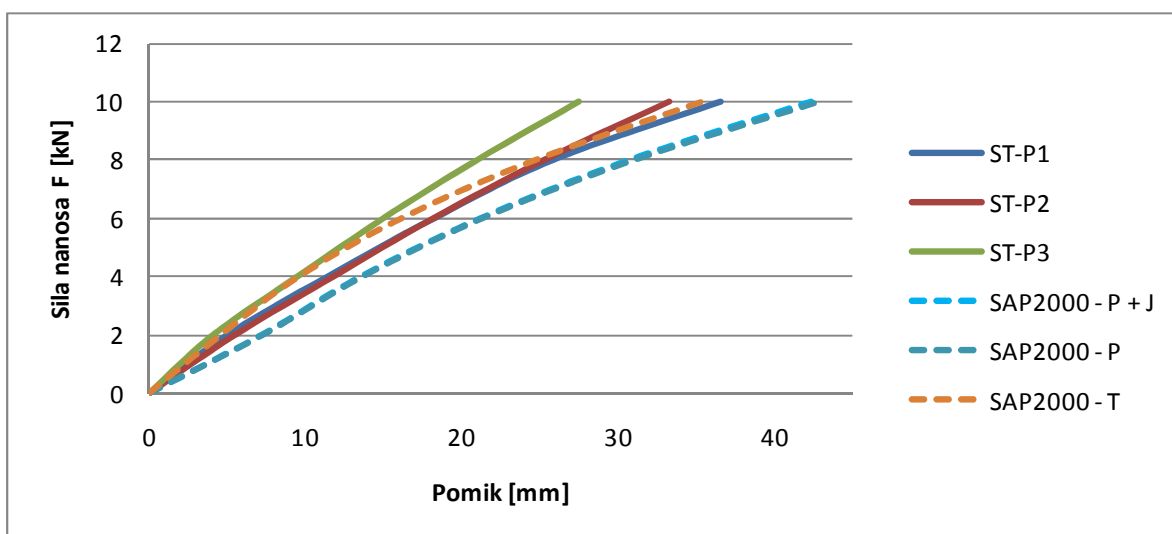


Slika 8.5 - Diagram primerjave odnosa sila F - pomik u parametrične študije in rezultatov poskusov za adheziv poliuretan Ködiglaze P, z upoštevanjem nelinearne funkcije vtiskovanja lesa in nelinearnih vzmeti določenih pod točko 4.2

8.2.1 Pomiki s spremenjeno strižno togostjo adheziva poliuretan Ködiglaze P

Na sliki 8.6 so prikazani rezultati analize, pri kateri sem upošteval nelinearne funkcije vtiskovanja lesa (slika 8.1) in nelinearne vzmeti adheziva, ki so do določene s postopkom iz točke 5.3.

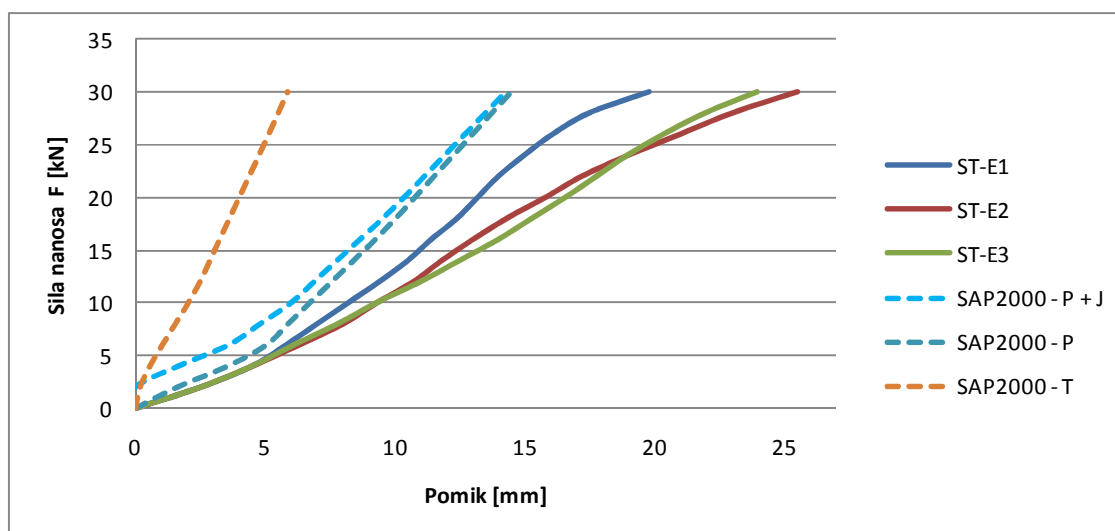
Če primerjamo pomike na slikah 8.5 in 8.6, hitro opazimo, da so ti v primeru spremenjene strižne togosti spet večji.



Slika 8.6 - Diagram primerjave odnosa sila F - pomik u parametrične študije in rezultatov poskusov za adheziv poliuretan Ködiglaze P, z upoštevanjem nelinearne funkcije vtiskovanja lesa in nelinearnih vzmeti določenih pod točko 5.3

8.3 Primerjava pomikov za epoksi Körapox 558

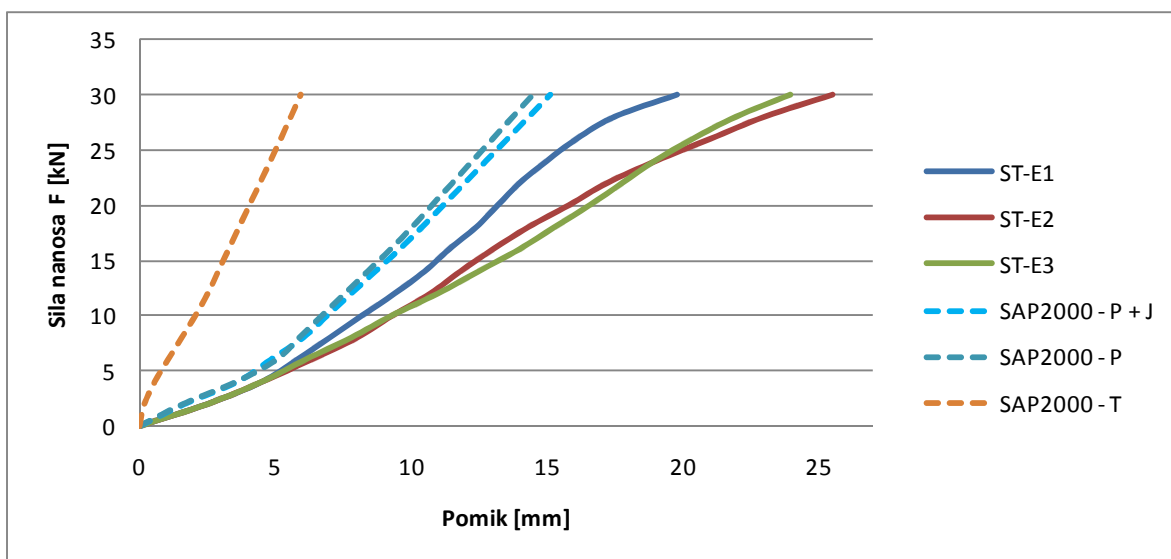
Numerično analizo sem izvedel tudi v primeru uporabe adheziva epoksi Körapox 558, za katerega zaradi drugačnih materialnih lastnosti določim posebno nelinearno funkcijo vtiskovanja, ki je prikazana na sliki 8.2. Nelinearne vzmeti, ki nadomestijo adhezivno sredstvo, so določene po postopku iz točke 4.3. Kljub nelinearni funkciji vtiskovanja se odziv sistema pri uporabi epoksija Körapox 558 ne približa dejanskim rezultatom in še vedno ostaja pretog.



Slika 8.7 - Diagram primerjave odnosa sila F - pomik u parametrične študije in rezultatov poskusov za adheziv epoksi Körapox 558, z upoštevanjem nelinearne funkcije vtiskovanja lesa in nelinearnih vzmeti določenih pod točko 4.3

8.3.1 Pomiki s spremenjeno strižno togostjo adheziva epoksi Kōrapox 558

Na sliki 8.8 so prikazani rezultati numerične analize, pri kateri sem upošteval spremenjeno strižno togost adheziva in sem nelinearne vzmeti določil s postopkom iz točke 7.3. Glede na to, da se postopka določitve togosti vzmeti, ki sta opisana pod točko 4.3 in 7.3, ne razlikujeta prav veliko, tudi pri pomikih iz ene in druge analize ni velike razlike. Tako kot pomiki na sliki 8.7 tudi pomiki na sliki 8.8 odstopajo od eksperimentalnih pomikov, in sicer kljub temu, da sem tukaj uporabil nelinearno funkcijo vtiskovanja (slika 8.2).



Slika 8.8 - Diagram primerjave odnosa sila F - pomik u parametrične študije in rezultatov poskusov za adheziv epoksi Kōrapox 558, z upoštevanjem nelinearne funkcije vtiskovanja lesa in nelinearnih vzmeti določenih pod točko 7.3

9 PRIMERJAVA Z NATANČNEJŠO ANALIZO Z ABAQUSOM

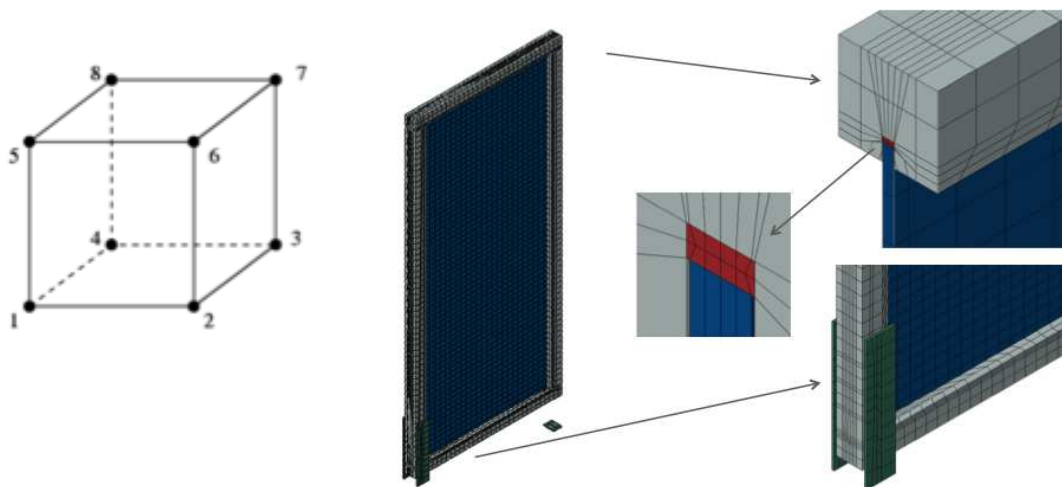
9.1 Razlika med modeloma v SAP-u in Abaqus

Diplomant 1. stopnje bolonjskega študija Toni Klemenčič in mlada raziskovalka Sara Piculin sta vzporedno z numerično analizo s programom SAP2000 opravljala tudi natančnejšo numerično simulacijo s programom Abaqus [15], [24].

Bistvena razlika, ki se pojavi med analizama, so končni elementi drugačnega tipa (slika 9.1) in natančnost integracije vzdolž elementov. Za razliko od SAP-a, pri katerem so bili uporabljeni linijski in ploskovni končni elementi, Abaqus uporablja tridimenzionalne končne elemente. Zaradi fizikalnih lastnosti materialov lahko prostorski končni elementi natančneje opišejo njihov odziv pri izpostavitvi obtežbe.

Materialne lastnosti lesa, stekla in veznih sredstev so pri obeh analizah enake, vključno z materialnim modelom adheziva silikon. Navsezadnje je materialni odziv silikona, ki se ustrezno upošteva v numerični simulaciji s programom SAP, pridobljen s pomočjo programa Abaqus.

Ker gre samo za razliko v obliki končnih elementov, je primerjava med numeričnima analizama videti povsem smiselna. Analiza s programom Abaqus je bila izvedena za adheziva silikon Ködiglaze S in poliuretan Ködiglaze P, in sicer za model, pri katerem upoštevamo vtiskovanje lesa pravokotno na vlakna in zdrse vijakov v jekleni podpori, torej primerjamo modela **P+J**. Nelinearna funkcija vtiskovanja lesa pravokotno na vlakna, ki je bila uporabljena pri analizi s SAP-om in Abaqusom, je prikazana na sliki 8.1. Uporabljena funkcija je tako za SAP kot za Abaqus enaka. V nadaljevanju so prikazani rezultati analize z upoštevanjem nelinearne funkcije vtiskovanja lesa in nelinearnih vzmeti za adheziv, ki jih v prvem primeru določim s postopkom iz točke 4.2, v drugem pa s postopkom iz točke 5.3.



Slika 9.1 - Oblika uporabljenih končnih elementov v programu Abaqus

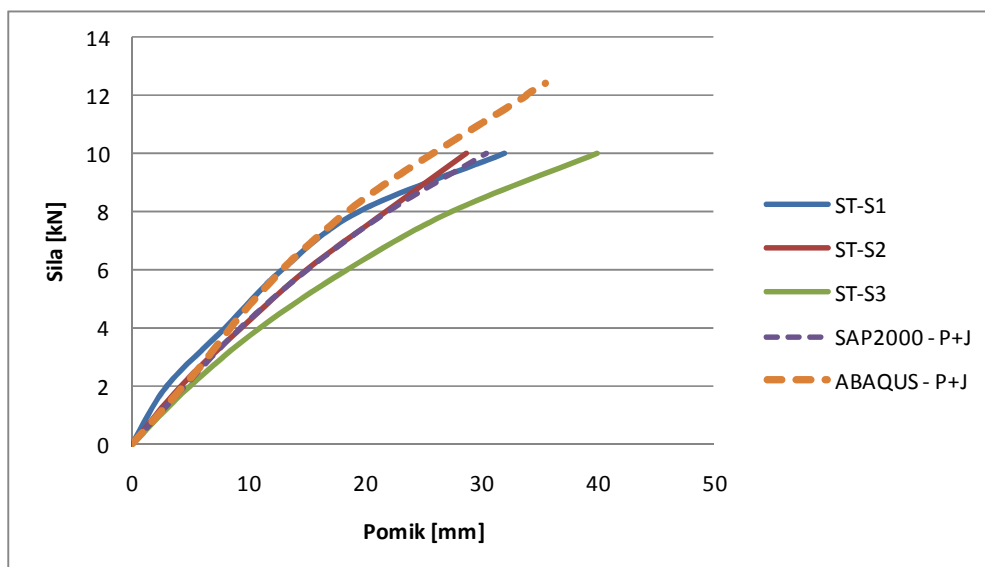
9.2 Primerjava pomikov pridobljenih s programom SAP2000, Abaqusom in eksperimentom za adheziv silikon Ködiglaze S

Na sliki 9.2 je prikazana primerjava pomikov, ki jih dobimo s pomočjo poskusov in numeričnih analiz, opravljenih s programom SAP2000 ter Abaqusom. Pri numerični analizi s SAP-om so nelinearne vzmeti za adheziv bile določene s postopkom iz točke 4.2, funkcija vtiskovanja lesa pa je bila v obeh programih enaka in je prikazana na sliki 8.1

Iz primerjalnega diagrama je razvidno manjše odstopanje pomikov. Odgovor na odstopanje diagramov lahko najdemo v kohezivnih elementih, ki so bili uporabljeni v programu Abaqus, in štirih vzmeteh v območju vtiskovanja lesa pravokotno na vlakna, ki v Abaqusu nadomestijo eno linijsko vzmet iz programa SAP.

Pri analizi s programom SAP v kotih okvirja nimamo momentnega spoja, saj upoštevamo dejstvo, da koti nimajo rotacijske togosti, zato se venca na pokončnika priključujeta s členki. V Abaqusu se pa elementi med seboj povezujejo s kohezivnimi elementi, katerih rotacijska togost ni ničelna. To povzroči, da je ves okvir nekoliko bolj tog kot model iz programa SAP, kar je razvidno na diagramu primerjave pomikov.

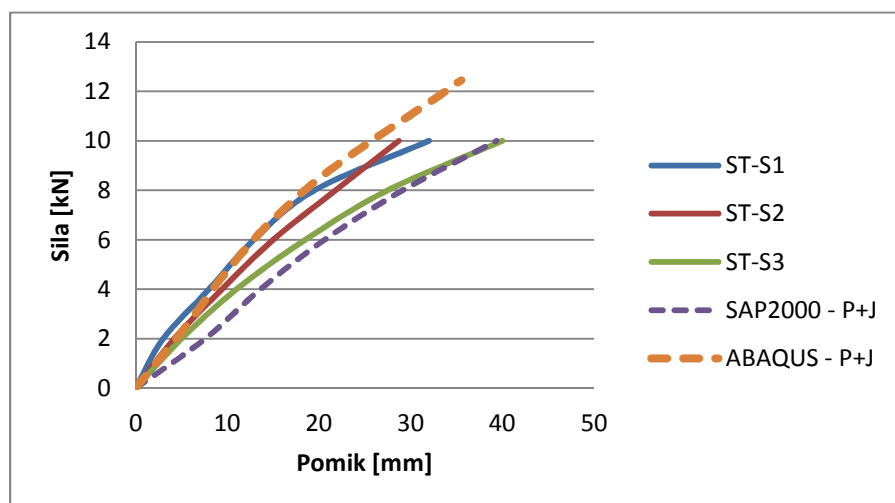
Predvidevamo, da je odziv nekoliko drugačen tudi zaradi vzmeti na mestu vtiskovanja, saj se modeliranje te podpore, zaradi uporabe prostorskih končnih elementov razlikuje od modeliranja pri SAP-u. V SAP-u slednjo vzmet modeliramo kot linijsko vzmet, v Abaqusu pa kot štiri linijske vzmeti, ki se priključujejo na vozlišča tridimenzionalnega končnega elementa.



Slika 9.1 - Primerjava pomikov pridobljenih s poskusi, programom SAP2000 in Abaqus za adheziv silikon Ködiglaze S, ob upoštevanju nelinearne funkcije vtiskovanja lesa in nelinearnih vzmeti za adheziv določenih po postopku iz točke 4.2

9.2.1 Pomiki s spremenjeno strižno togostjo adheziva silikon Ködiglaze

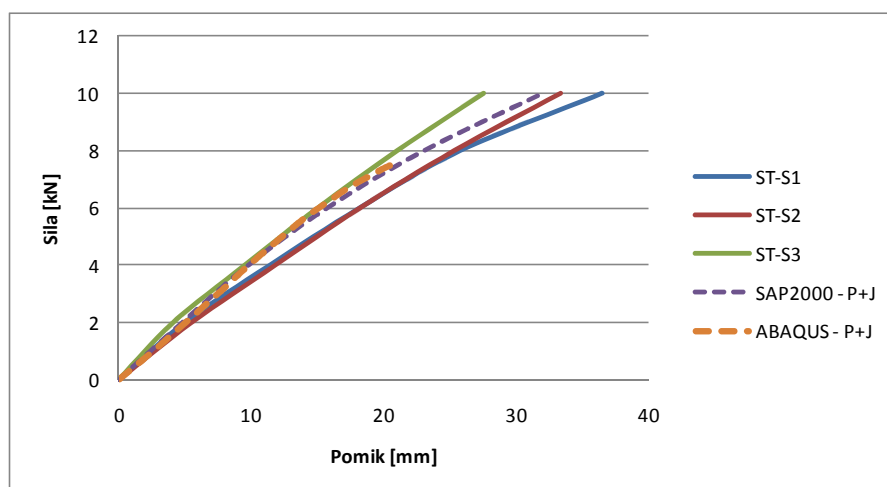
Nadaljeval sem z analizo, pri kateri sem v numeričnem modelu SAP-a spremenil strižno togost adheziva, in sicer s postopkom, ki je opisan v točki 5.3. Model v Abaqusu ostane nespremenjen, prav tako je enaka tudi nelinearna funkcija vtiskovanja lesa.



Slika 9.2 - Primerjava pomikov pridobljenih s poskusi, programom SAP2000 in Abaqus za adheziv silikon Ködiglaze S, ob upoštevanju nelinearne funkcije vtiskovanja lesa in nelinearnih vzmeti za adheziv določenih po postopku iz točke 5.3

9.3 Primerjava pomikov poskusov, programa SAP2000 in Abaqus za adheziv poliuretan Ködiglaze P

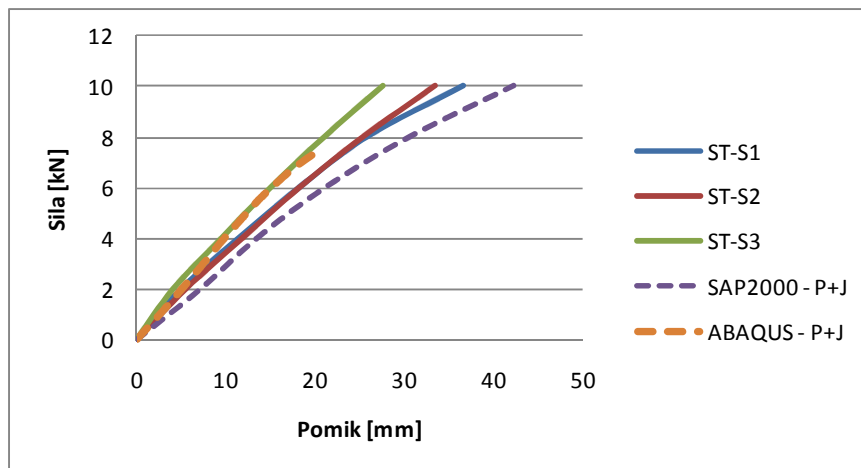
Primerjalno analizo izvedemo tudi z uporabo adheziva poliuretan Ködiglaze P, kjer so nelinearne vzmeti adheziva ponovno določene po postopku iz točke 4.2. Pri tem je bila uporabljena nelinearna vzmet vtiskovanja lesa predstavljena na sliki 8.1. Rezultati analize so prikazani na sliki 9.4.



Slika 9.3 - Primerjava pomikov pridobljenih s poskusi, programom SAP2000 in Abaqus za adheziv poliuretan Ködiglaze P, ob upoštevanju nelinearne funkcije vtiskovanja lesa in nelinearnih vzmeti za adheziv določenih po postopku iz točke 4.2

9.3.1 Pomiki s spremenjeno strižno togostjo adheziva poliuretan Ködiglaze

Kot zadnjo primerjavo izvedem še analizo, pri kateri upoštevam nelinearne vzmeti adheziva, ki sem jih določil s postopkom iz 5.3. Če primerjamo pomike na slikah 9.4 in 9.5 lahko vnovič vidimo, da so v primeru spremenjene strižne togosti pomiki večji in tudi odstopanje od analize izvedene s programom Abaqus je v tem primeru večje.



Slika 9.4 - Primerjava pomikov pridobljenih s poskusi, programom SAP2000 in Abaqus za adheziv poliuretan Ködiglaze P, ob upoštevanju nelinearne funkcije vtiskovanja lesa in nelinearnih vzmeti za adheziv določenih po postopku iz točke 5.3

10 ZAKLJUČEK

Modeliranje numeričnega modela je bilo zaradi prisotnosti različnih materialov in veznih sredstev težavno, saj smo želeli, da bi bili eksperimentalni rezultati in rezultati, pridobljeni s pomočjo numeričnih analiz, čim bolj podobni. Potreben je bil temeljit razmislek, kako obnašanje veznega sredstva prenesti v program za numerične analize, kako zaobjeti zdrse vijakov na mestu jeklene podpore ter kako pravilno predpostaviti vtiskovanje lesa pravokotno na vlakna v območju tlačne podpore.

V začetni fazi izdelave numeričnega modela je največ težav povzročalo pravilno modeliranje nelinearnih vzmeti, s katerimi ustvarimo vez med lesenim okvirjem in zasteklitvijo. Te v numeričnem modelu predstavljajo materialne lastnosti adhezivnega sredstva, zato mora biti računsko obnašanje vzmeti primerljivo z dejanskim odzivom adheziva. Težava je v tem, da četudi so bili izvedeni eksperimentalni preskusi na leseno steklenih stenastih elementih, še vedno ne poznamo dejanskega obnašanja adheziva znotraj sistema, to pa nam oteži določitev računskih vzmeti. Prav zato sta bila v študiji upoštevana dva mogoča načina deformiranja, s katerima zajamemo predvideno deformacijo adheziva.

Sledila je določitev zdrsa vijakov v jekleni podpori in vtiskovanje lesa pravokotno na vlakna. Modul zdrsa vijakov je določen v skladu s SIST EN 1995-1-1 in njegova variacija ni mogoča. Težava se pojavi pri določitvi vtiskovanja lesa. V prvi fazi vtiskovanje opredelimo z linearno funkcijo in modulom vtiskovanja K_{\perp} , kar se pri parametrični študiji izkaže kot ne povsem idealna rešitev. Študija pokaže, da se pomiki sicer približajo eksperimentom, a se sistem pri večji obremenitvi utruje. Inženirsko gledano to ni povsem smiselno in ni v skladu s preskusi, zato se odločimo, da v nadaljnjih korakih linearno vzmet vtiskovanja nadomestimo z nelinearno vzmetjo. Ta je bila določena na podlagi vtiskovanja lesa pravokotno na vlakna, ki smo ga izmerili med preskusi, in nekoliko korigirana med numerično analizo, saj smo le tako lahko dosegli skorajšnje ujemanje eksperimentalnih in numeričnih rezultatov. Pojavi se torej problem, da za opis vtiskovanja lesa ne obstaja enoten način, sploh če želimo nelinearen odziv. Metoda sicer privede do pravilnega odziva lesenega okvirja, kar je jasno razvidno iz parametrične študije, ne podaja pa enolične rešitve problema. Iskanje enolične rešitve, s katero bi lahko opisali nelinearno vtiskovanje lesa, lahko predstavlja naslednji korak študije.

Študija je pokazala pomembnost pravilnega in natančnega upoštevanja lastnosti materialov, adhezivnih sredstev in robnih pogojev sistema. Vse te komponente lahko bistveno in enakovredno vplivajo na odziv sistema, kar je bilo v nalogi prikazano z različnimi modeli in ob upoštevanju različnih možnosti deformiranja adheziva ter vtiskovanja lesa pravokotno na vlakna. Ker je vpliv posameznega parametra enako pomemben, je težko oceniti ali trditi, kateri parameter najbolj pripomore k ujemanju oziroma odstopanju rezultatov. V našem primeru analize s programom SAP2000 in v njem predpostavljenim numeričnim modelom se vtiskovanje lesa izkaže kot merodajen

parameter. Z vpeljavo nelinearne funkcije vtiskovanja smo dosegli ujemanje računskih in eksperimentalnih pomikov, vendar šele po tem, ko smo preizkusili različne načine deformiranja z različnimi načini deformiranja adheziva in različna korigiranja drugih robnih pogojev. Iz tega sledi, da bi bila analiza tovrstnih problemov enostavnejša in pravilnejša, če bi lahko funkcijo vtiskovanja lesa pravokotno na vlakna enolično določili, tako pa moramo še vedno parametre korigirati in usklajevati v skladu s preskusi, zaradi česar je modeliranje takih numeričnih modelov kompleksen problem.

Določitev enoličnih rešitev, s katerimi bi poenostavili analizo tovrstnih problemov, bi pripomogla k hitrejšemu in cenejšemu razvoju tovrstnih leseno steklenih stenastih elementov, saj bi drage in prostorsko potratne preskuse lahko nadomestili z numeričnimi simulacijami.

VIRI

- [1] Montažne gradnje. 2013. SLONEP.
<http://www.slonep.net/montazne-hise/montazna-gradnja/> (Pridobljeno 6. 7. 2013.)
- [2] KAGER Hiše. 2013.
<http://www.kager.si/hise-kager/> (Pridobljeno 6. 7. 2013.)
- [3] Ber, B., Premrov, M., Kuhta, M. 2012. Horizontalna nosilnost stenskih elementov s steklenimi obložnimi ploščami v montažni leseni gradnji. V: Zbornik 34. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 211-218.
- [4] Rapoc, E. 2010. Zasnova nizkoenergetske montažne lesene hiše. Diplomsko naloga. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo (samozaložba E. Rapoc): 1, 3, 4 f.
- [5] Beg, D. (ur.), Pogačnik, A. (ur.). 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: poglavje 5: Projektiranje lesenih konstrukcij: p. 5-87 – 5-92, 5-112.
- [6] Ber, B. 2013. Kager Hiše. Osebna komunikacija. (Pridobljeno 10. 7. 2013.)
- [7] Gorišek, Ž. 2013. Fizikalno-tehnološke karakteristike lesa
<http://www.lesena-gradnja.si/html/pages/si-clanki-materijal-tehnologija-fizikalno-tehnoloske.htm>
(Pridobljeno 4. 11. 2013.)
- [8] Frlan, M. 2011. Mehanske lastnosti lameliranega stekla. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Frlan): 7, 8, 9 f.
- [9] Katalog proizvajalca silikona Shin-Etsu. 2013.
http://www.silicone.jp/e/catalog/pdf/rubber_e.pdf (Pridobljeno 5. 11. 2013.)
- [10] Amstock, Joseph S. 2000. Handbook of adhesives and sealants in construction, New York, McGraw-Hill: p. 2.1 – 2.12, 12.1 – 12.21, 13.1 – 13.24.
- [11] Polyurethane Technologies. 2013.
http://purelast.com.ua/about_polyurethanes/mechanical_properties.html (Pridobljeno 5. 11. 2013.)
- [12] Epotek. 2013.
<http://www.epotek.com/site/> (Pridobljeno 5. 11. 2013.)
- [13] UL Ides. 2013.
<http://plastics.ides.com/generics/13/epoxy-epoxy> (Pridobljeno 5. 11. 2013.)
- [14] Kuhta, M. 2010. Numerično modeliranje vpliva veznih sredstev na horizontalno nosilnost lesenih okvirnih stenskih elementov. Doktorska disertacija. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo (samozaložba M. Kuhta): 7, 8, 13, 93, 94, 95 f.
- [15] Piculin, S., Klemenčič, T., Kocjan, M., Brank, B., Ber, B., Premrov, M. 2013. Simulacije eksperimentov na leseno-steklenih panelih. Članek. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakultet za gradbeništvo in geodezijo. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo. V pripravi. Osebna komunikacija. (Pridobljeno 3. 12. 2013.)
- [16] Abaqus Analysis User's Manual (6.11). 2013.
<http://abaqus.ethz.ch:2080/v6.11/books/usb/default.htm?startat=pt05ch21s05abm07.html> (Pridobljeno 29. 11. 2013.)

[17] Kozem Šilih, E. 2012. Priročnik za izračun togosti in nosilnosti lesenih okvirnih stenskih elementov z odprtinami. Priročnik. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo: p. 10 - 12.

[18] Kömmerling. 2013.
<http://www.koe-chemie.com/gla.php> (Pridobljeno 29. 11. 2013.)

[19] Obrtna zbornica Slovenije. 2013.
<http://www.svetovanje.si/ForumSporocila.asp?IDForum=18&ID=477&IDpm=-1> (Pridobljeno 3. 12. 2013.)

[20] Zakonodaja RS. 2013.
http://zakonodaja.gov.si/rpsi/r00/predpis_ZAKO1660.html (Pridobljeno 3. 12. 2013.)

[21] Korez, M. 2013. Statična in dinamična analiza montažne lesene hiše s povečanim deležem stekla. Diplomsko naloga. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo (samozaložba M. Korez): 5, 6 f.

[22] Applied Mechanics of Solids. 2013.
http://solidmechanics.org/text/Chapter3_5/Chapter3_5.htm (Pridobljeno 3. 12. 2013.)

[23] SAP2000. 2013.
<http://www.csiamerica.com/sap2000> (Pridobljeno 10. 12. 2013.)

[24] Klemenčič, T. 2013. Analiza obnašanja leseno steklenega panela pri horizontalni obtežbi. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Korez): 8 f.

[25] SAP2000. 2014.
<https://wiki.csiamerica.com/dosearchsite.action?queryString=Multi-linear+Elastic> (Pridobljeno 22. 1. 2014.)

[26] Computers and Structures, Inc. 1997. SAP2000 : integrated finite element analysis and design of structures: Analysis reference Volume 1, Berkeley, Calif., U.S.A.: p. 251 – 254.

[27] Ber, B., Premov, M., Štrukelj, A., Kuhta, M. 2013. Experimental study of timber-glass composite wall elements. V: Belis, J. (ur.), Louter, C. (ur.). COST Action TU0905 Mid-term Conference on Structural Glass. Boca Raton ... [etc.]: CRC Press, cop. 2013, str. 253-260, graf. prikazi, ilustr.

SEZNAM PRILOG

PRILOGA A: NOTRANJE STATIČNE KOLIČINE PRI UPORABI ADHEZIVA SILIKON KÖDIGLAZE S

PRILOGA B: NOTRANJE STATIČNE KOLIČINE PRI UPORABI ADHEZIVA POLIURETAN KÖDIGLAZE P

PRILOGA C: NOTRANJE STATIČNE KOLIČINE PRI UPORABI ADHEZIVA EPOKSI KÖRAPOX 558

V prilogah prikazujem potek notranje statičnih količin v primeru uporabe posameznega adhezivnega sredstva za numerični model P+J z upoštevanjem linearne funkcije vtiskovanja lesa. Prikazane so osne sile v veznem sredstvu in osne, prečne sile ter moment v lesenem okvirju. Iz diagramov je moč razbrati kako na razporeditev osnih sil vpliva togost posameznega veznega sredstva in način upoštevanja robnih pogojev. Vse notranje sile so izračunane za primer, ko so nelinearne vzmeti adheziva določene po postopku opisanem v točki 4.2 za silikon Ködiglaze S oziroma poliuretan Ködiglaze P in v točki 4.3 za epoksi Körapox 558.

PRILOGA A: NOTRANJE STATIČNE KOLIČINE PRI UPORABI ADHEZIVA SILIKON KÖDIGLAZE S

NOTRANJE STATIČNE KOLIČINE V ADHEZIVU SILIKON KÖDIGLAZE S

- Slika A 1 – Osna sila v adhezivu Ködiglaze S v zgornjem vencu
- Slika A 2 - Osna sila v adhezivu Ködiglaze S v levem pokončniku
- Slika A 3 - Osna sila v adhezivu Ködiglaze S v desnem pokončniku
- Slika A 4 - Osna sila v adhezivu Ködiglaze S v spodnjem vencu

OSNE SILE V LESENUM OKVIRJU

- Slika A 5 - Osna sila v lesenem okvirju - zgornji venec
- Slika A 6 - Osna sila v lesenem okvirju - levi pokončnik
- Slika A 7 Osna sila v lesenem okvirju - desni pokončnik
- Slika A 8 - Osna sila v lesenem okvirju - spodnji venec

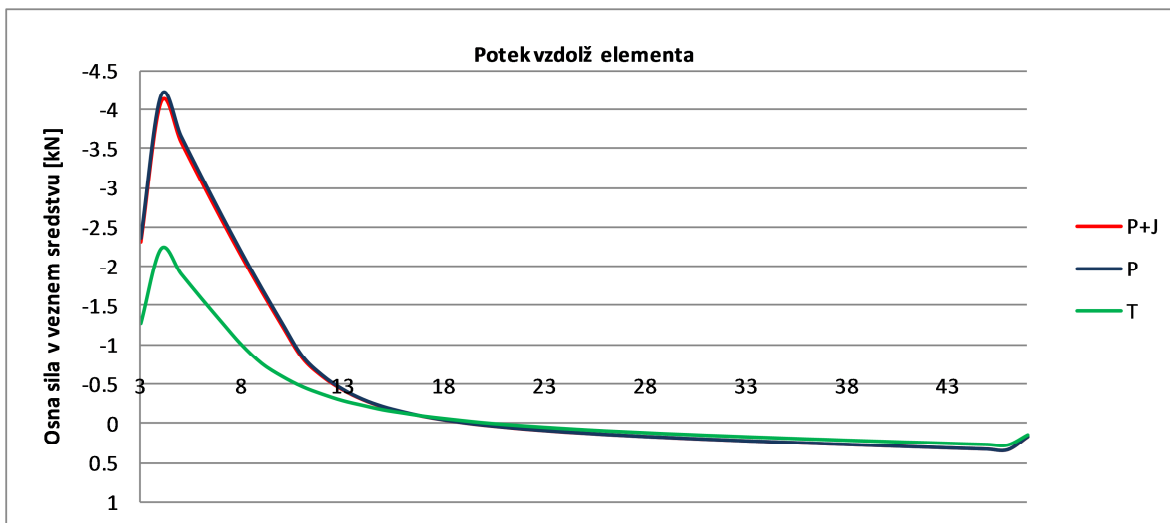
PREČNE SILE V LESENUM OKVIRJU

- Slika A 9 - Prečna sila v lesenem okvirju - zgornji venec
- Slika A 10 - Prečna sila v lesenem okvirju - levi pokončnik
- Slika A 11 - Prečna sila v lesenem okvirju - desni pokončnik
- Slika A 12 - Prečna sila v lesenem okvirju - spodnji venec

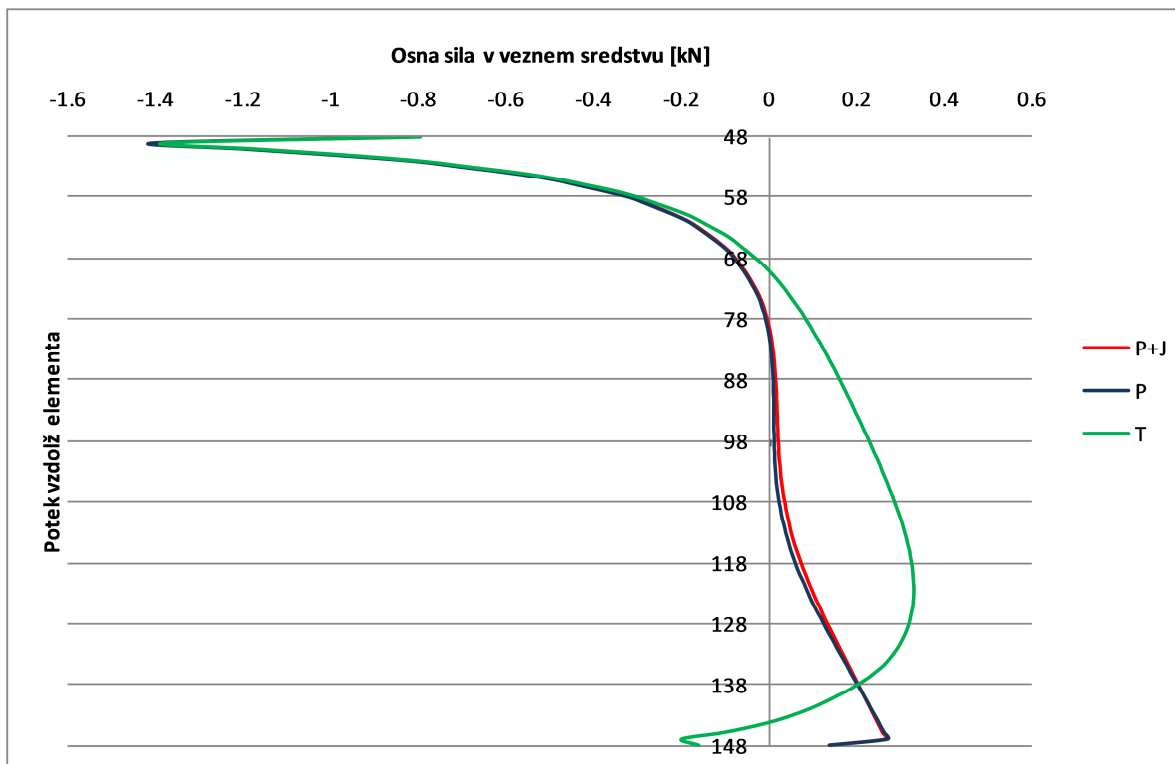
UPOGIBNI MOMENT

- Slika A 13 - Upogibni moment v lesenem okvirju - zgornji venec
- Slika A 14 - Upogibni moment v lesenem okvirju - levi pokončnik
- Slika A 15 - Upogibni moment v lesenem okvirju - desni pokončnik
- Slika A 16 - Upogibni moment v lesenem okvirju - spodnji venec

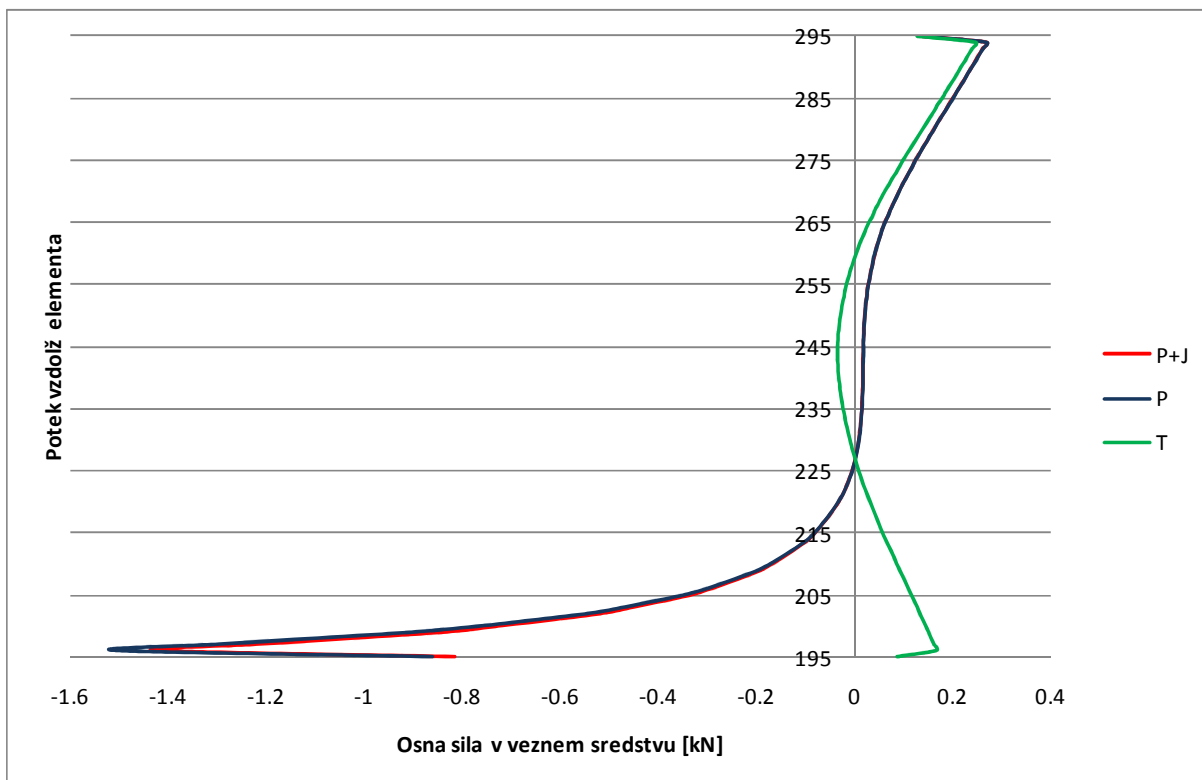
NOTRANJE STATIČNE KOLIČINE V ADHEZIVU SILIKON KÖDIGLAZE S



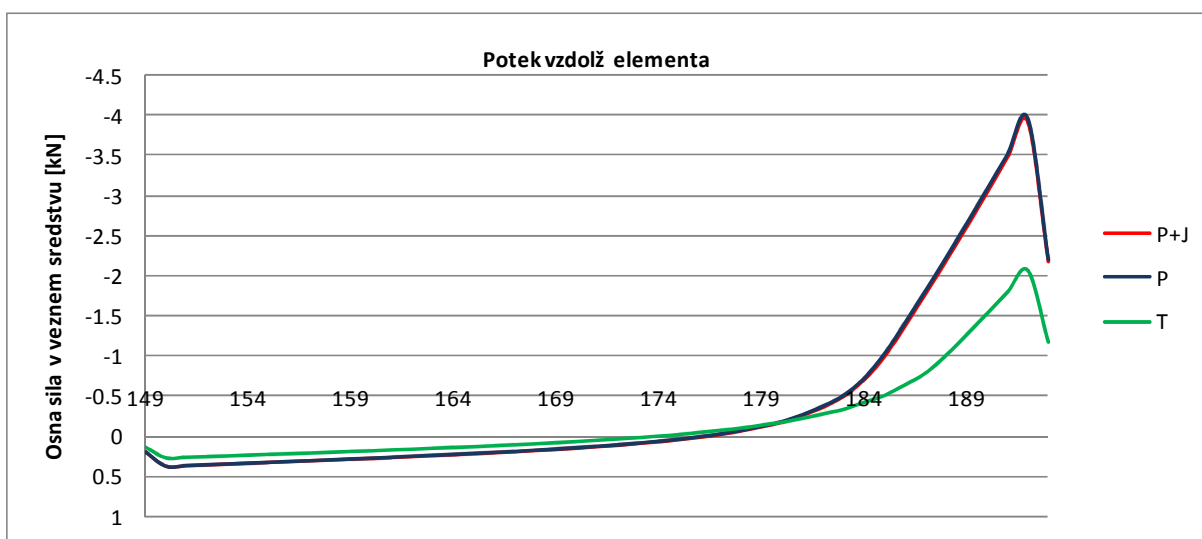
Slika A 1 – Osna sila v adhezivu Ködiglaze S v zgornjem vencu



Slika A 2 - Osna sila v adhezivu Ködiglaze S v levem pokončniku

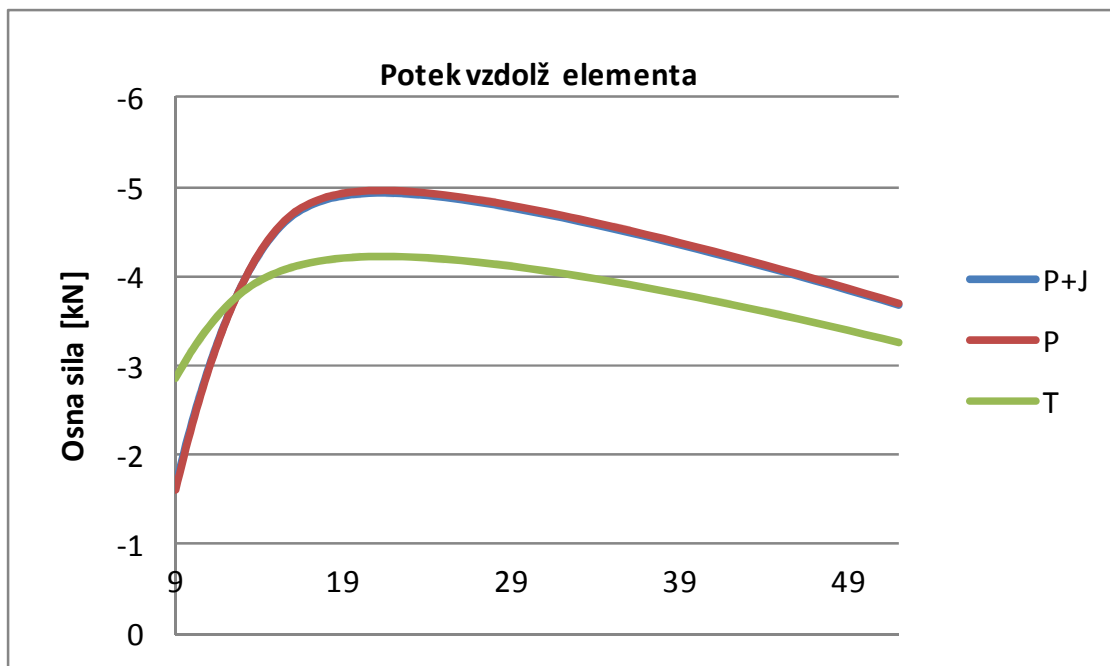


Slika A 3 - Osna sila v adhezivu Ködiglaze S v desnem pokončniku

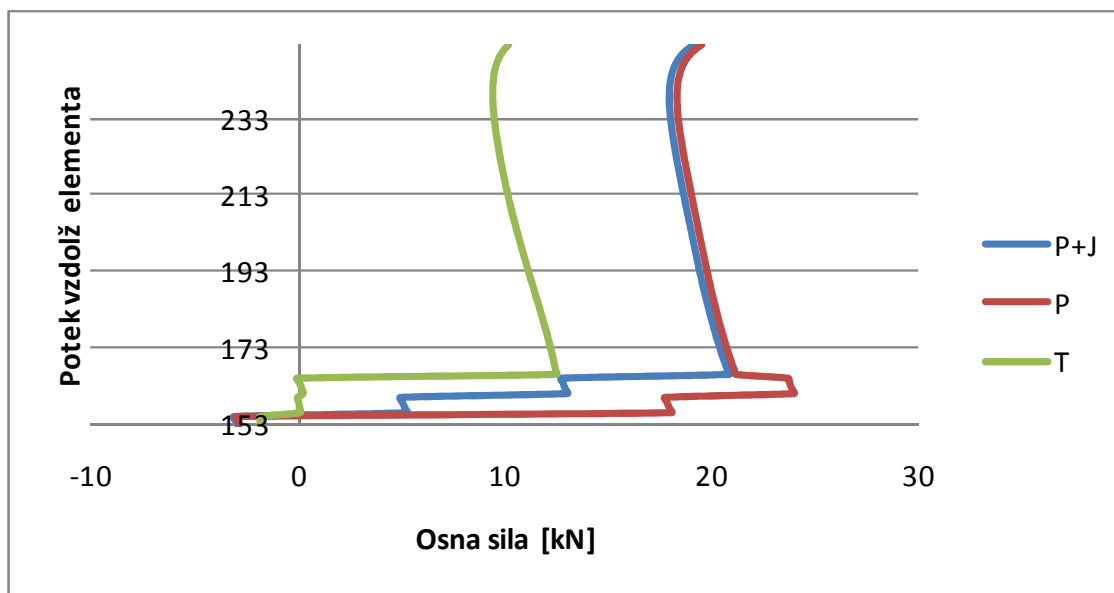


Slika A 4 - Osna sila v adhezivu Ködiglaze S v spodnjem vencu

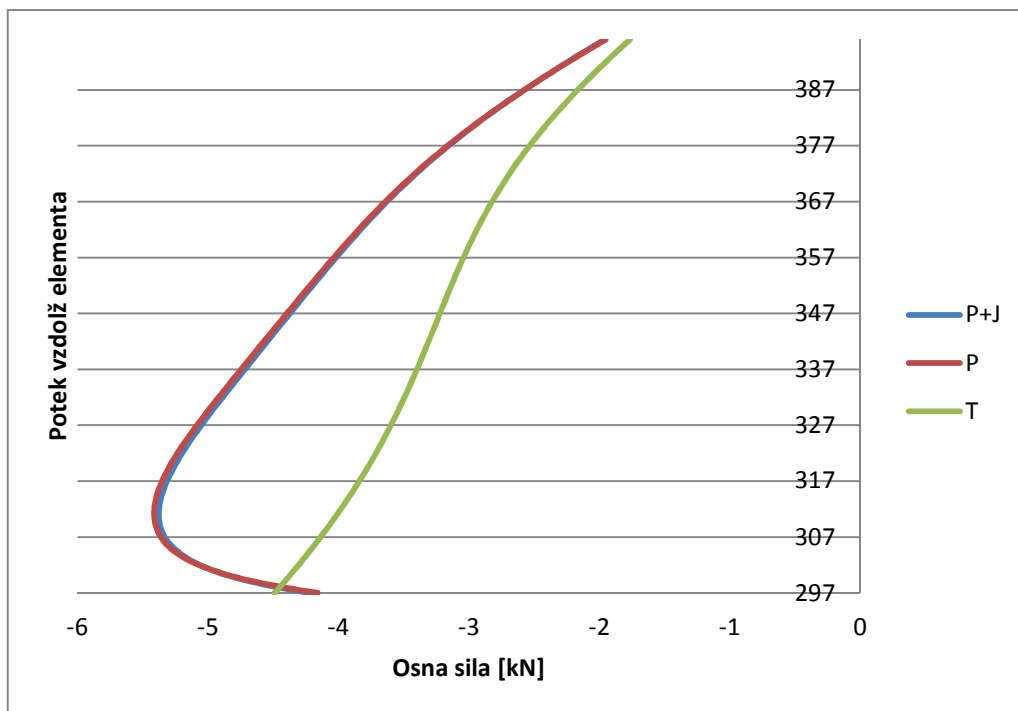
OSNE SILE V LESEMEM OKVIRJ



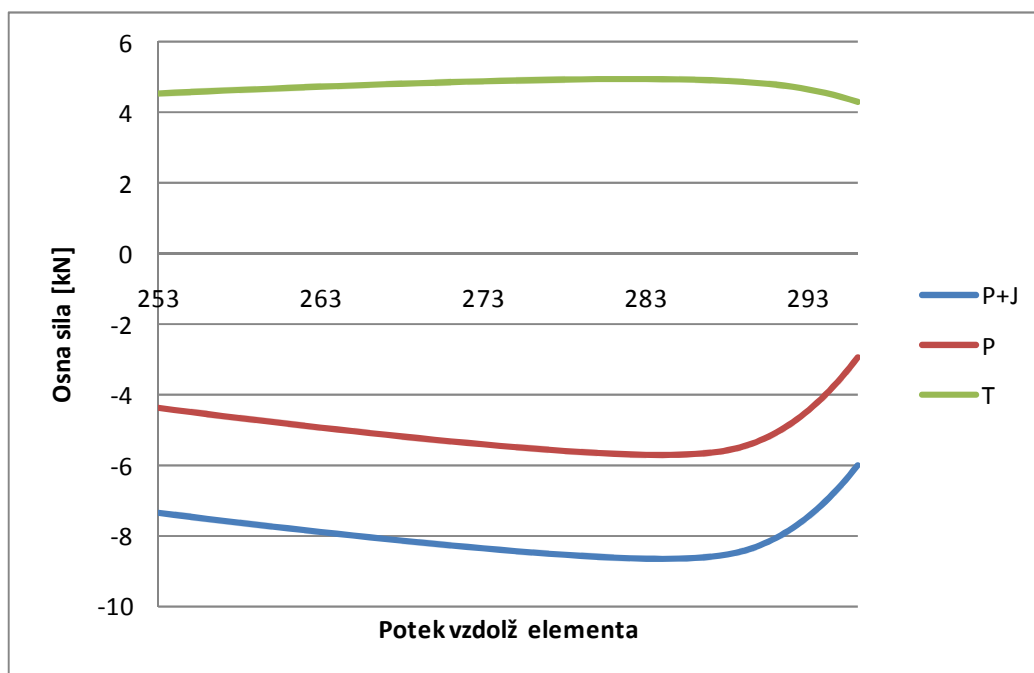
Slika A 5 - Osna sila v lesenem okvirju - zgornji venec



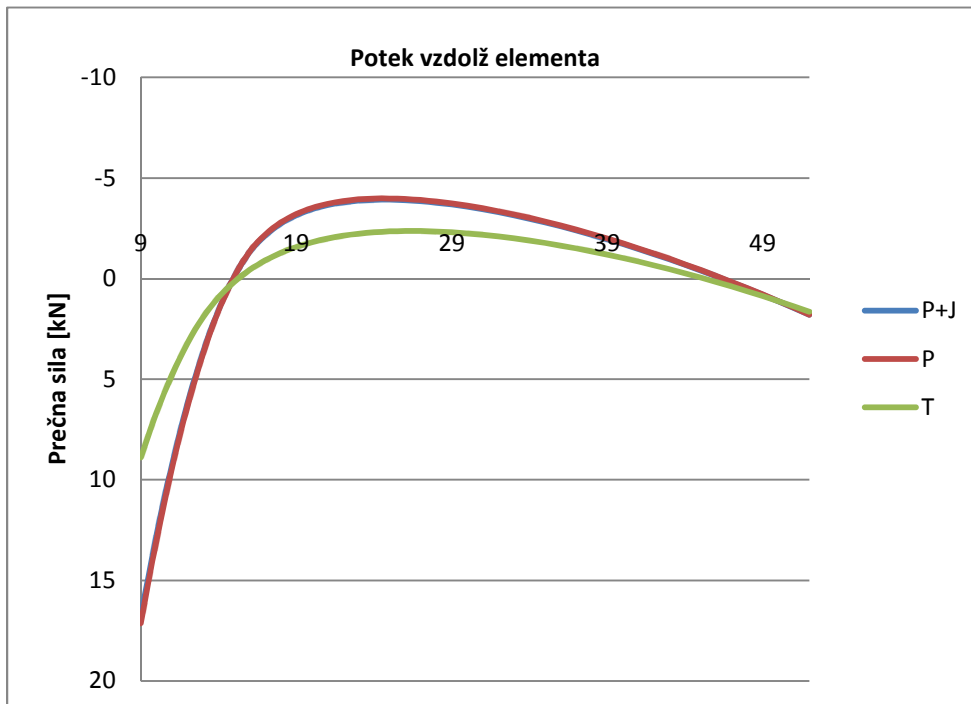
Slika A 6 - Osna sila v lesenem okvirju - levi pokončnik



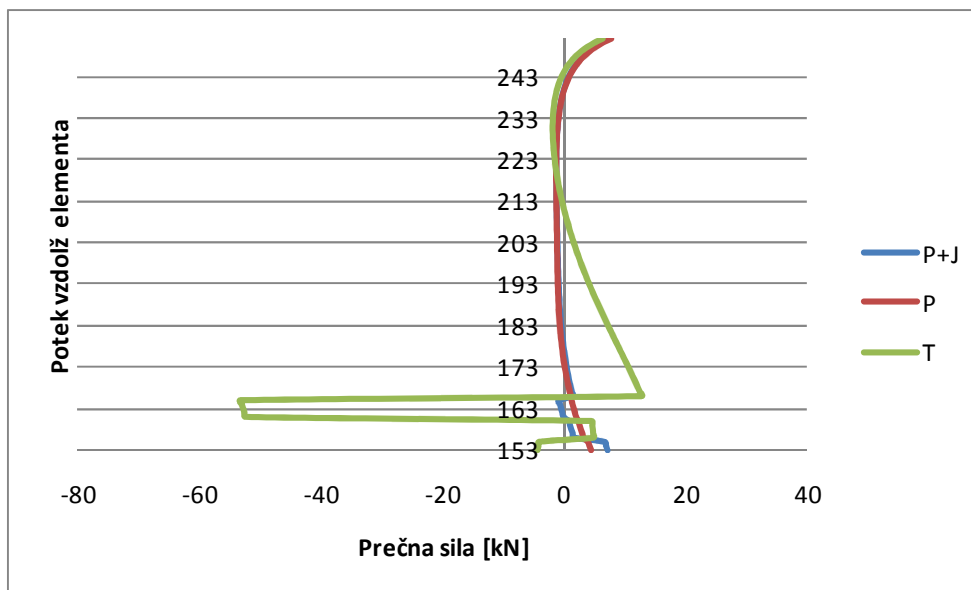
Slika A 7 Osna sila v lesenem okvirju - desni pokončnik



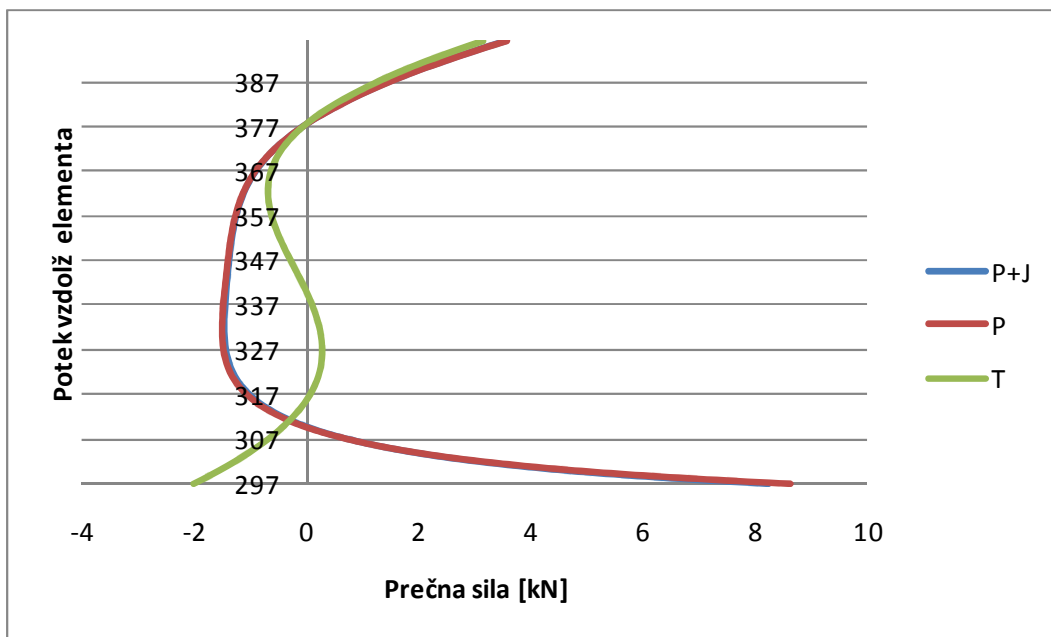
Slika A 8 - Osna sila v lesenem okvirju - spodnji venec

PREČNE SILE V LESENUM OKVIRJU

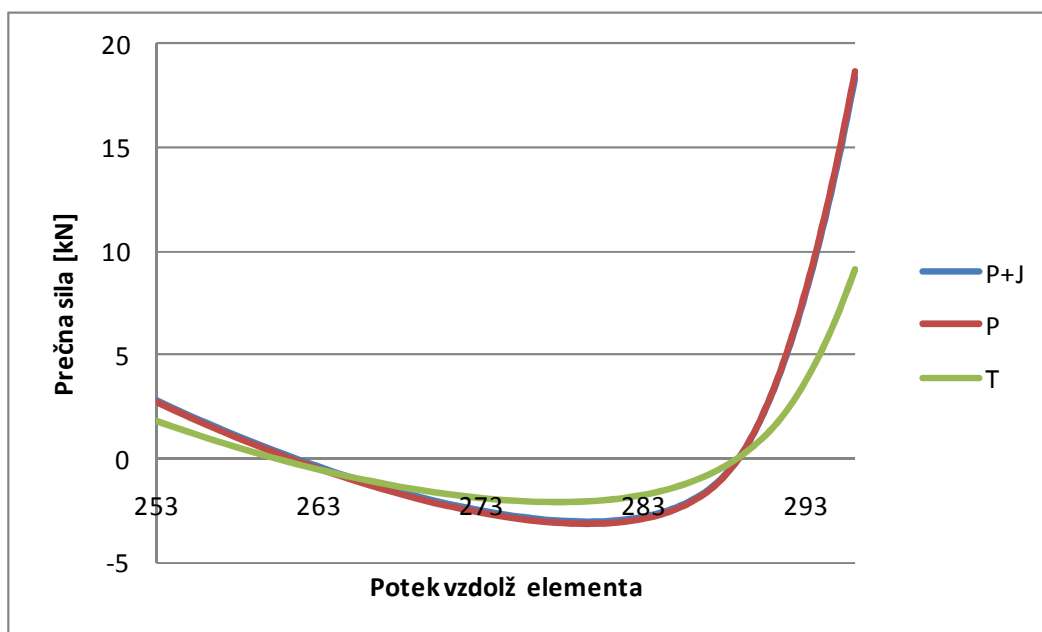
Slika A 9 - Prečna sila v lesenem okvirju - zgornji venec



Slika A 10 - Prečna sila v lesenem okvirju - levi pokončnik

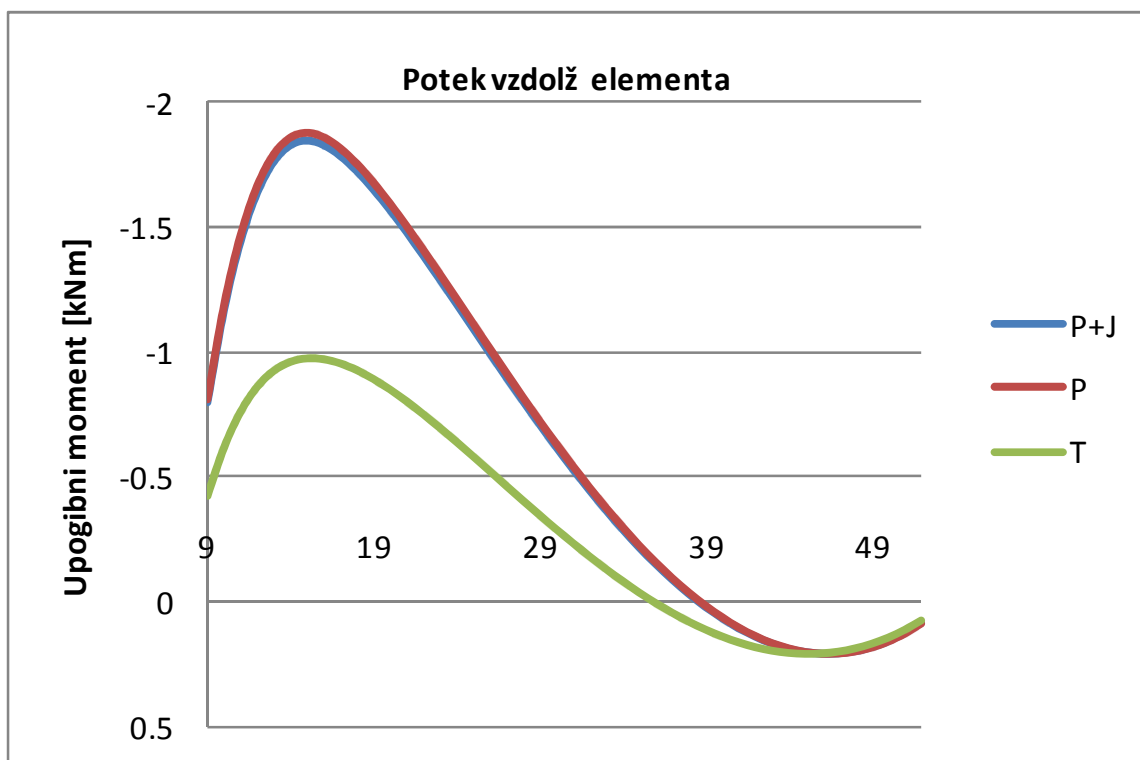


Slika A 11 - Prečna sila v lesenem okvirju - desni pokončnik

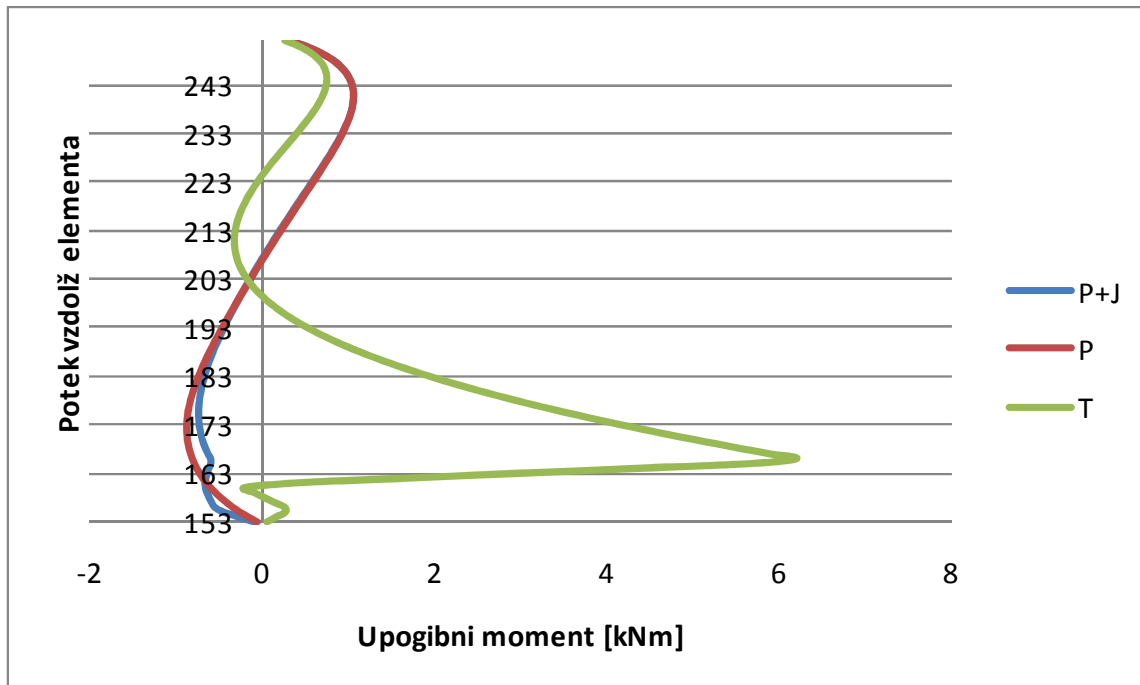


Slika A 12 - Prečna sila v lesenem okvirju - spodnji venec

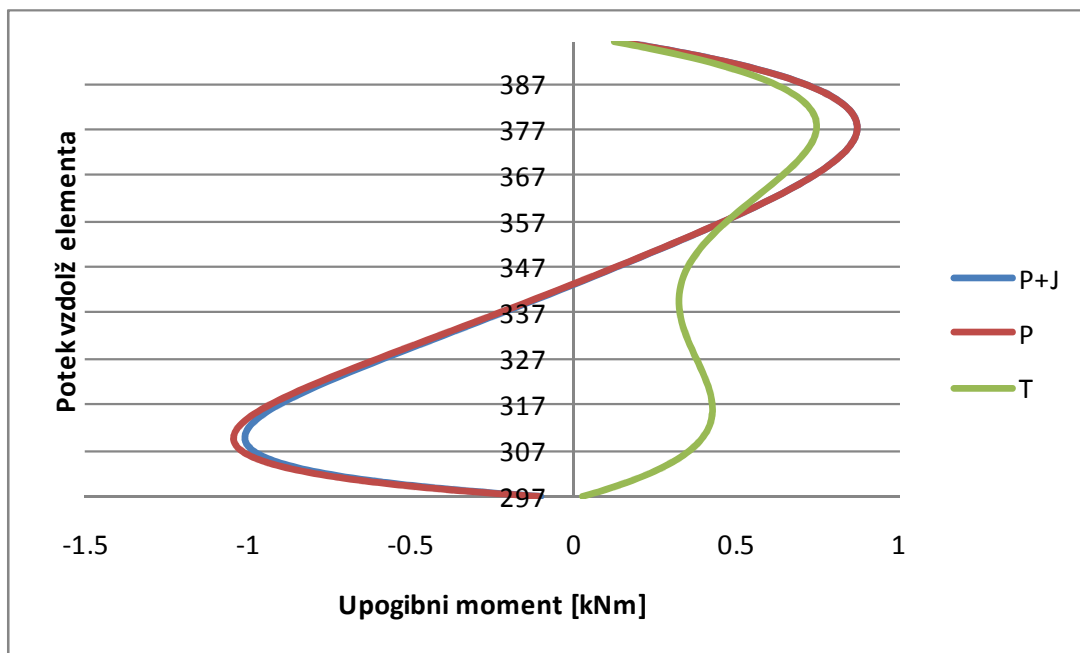
UPOGIBNI MOMENT



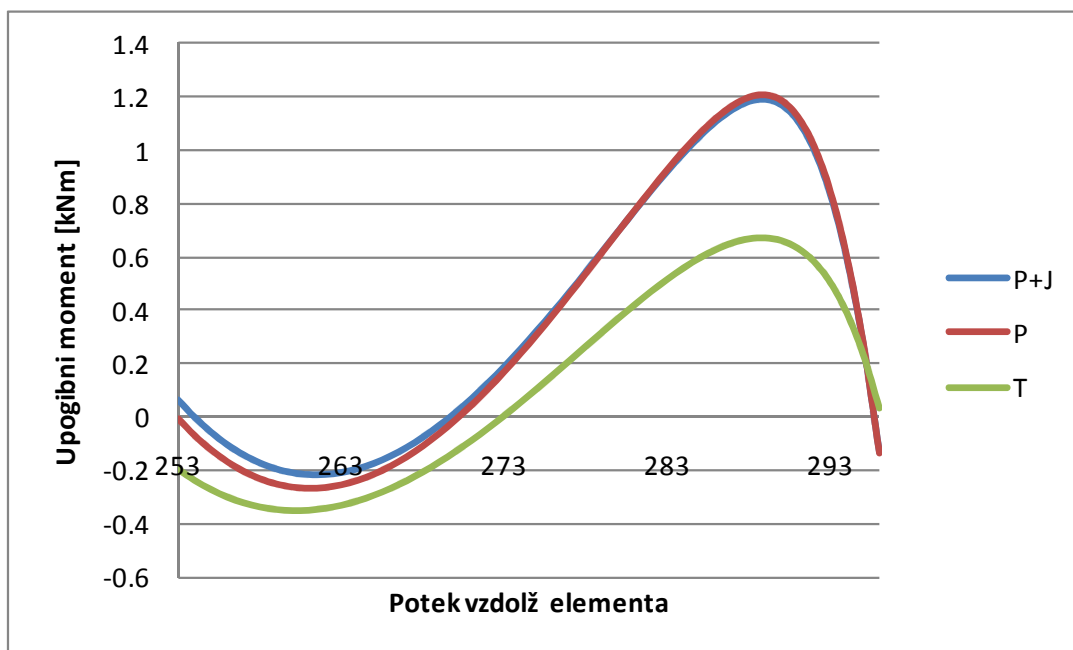
Slika A 13 - Upogibni moment v lesenem okvirju - zgornji venec



Slika A 14 - Upogibni moment v lesenem okvirju - levi pokončnik



Slika A 15 - Upogibni moment v lesenem okvirju - desni pokončnik



Slika A 16 - Upogibni moment v lesenem okvirju - spodnji venec

PRILOGA B: NOTRANJE STATIČNE KOLIČINE PRI UPORABI ADHEZIVA POLIURETAN KÖDIGLAZE P

NOTRANJE STATIČNE KOLIČINE V ADHEZIVU KÖDIGLAZE P

- Slika B 1 - Osna sila v adhezivu Ködiglaze P v zgornjem vencu
- Slika B 2 - Osna sila v adhezivu Ködiglaze P v levem pokončniku
- Slika B 3 - Osna sila v adhezivu Ködiglaze P v desnem pokončniku
- Slika B 4 - Osna sila v adhezivu Ködiglaze P v spodnjem vencu

OSNE SILE V LESENUM OKVIRJU

- Slika B 5 - Osna sila v lesenem okvirju - zgornji venec
- Slika B 6 - Osna sila v lesenem okvirju - levi pokončnik
- Slika B 7 - Osna sila v lesenem okvirju - desni pokončnik
- Slika B 8 - Osna sila v lesenem okvirju - spodnji venec

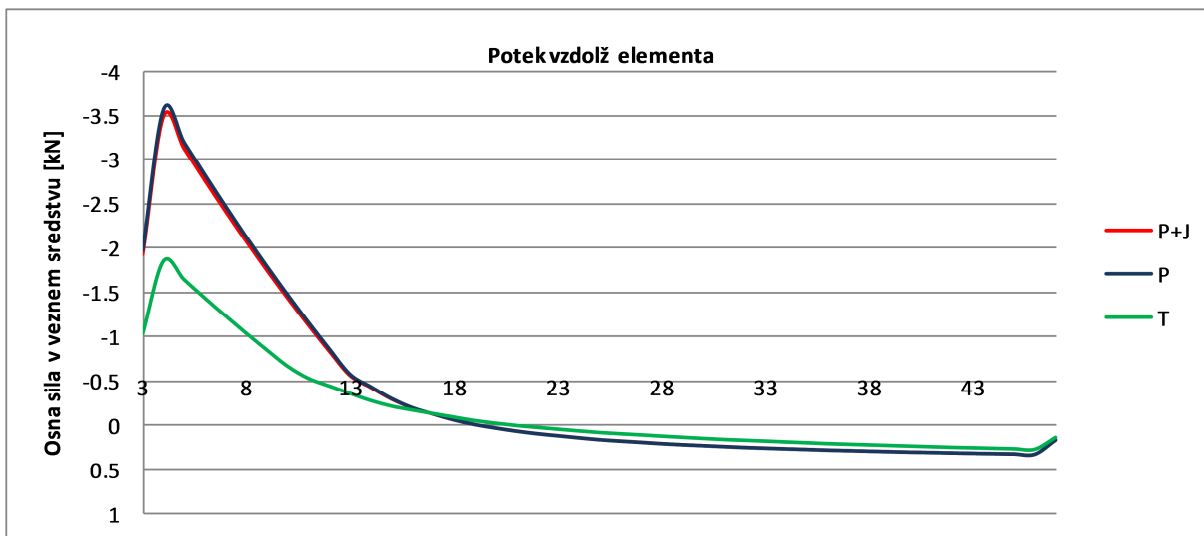
PREČNA SILA V LESENUM OKVIRJU

- Slika B 9 - Prečna sila v lesenem okvirju - zgornji venec
- Slika B 10 - Prečna sila v lesenem okvirju - levi pokončnik
- Slika B 11 - Prečna sila v lesenem okvirju - desni pokončnik
- Slika B 12 - Prečna sila v lesenem okvirju - spodnji venec

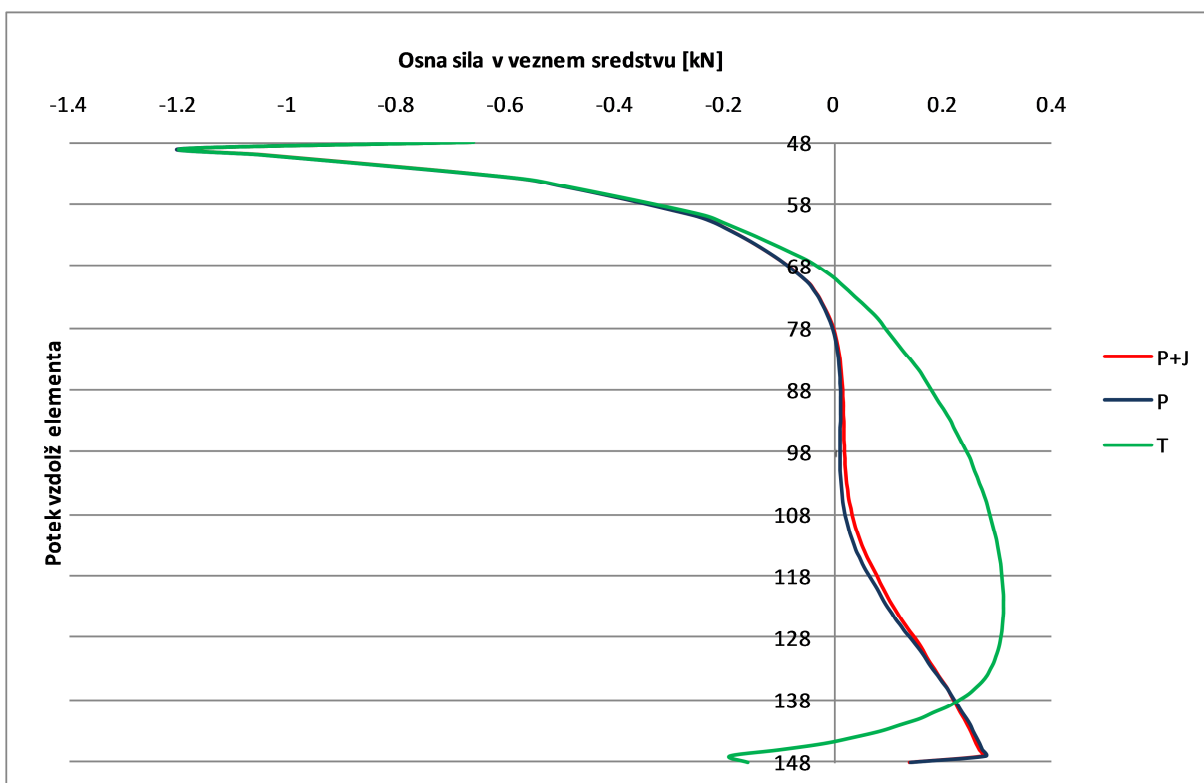
UPOGIBNI MOMENT V LESENUM OKVIRJU

- Slika B 13 - Upogibni moment v lesenem okvirju - zgornji venec
- Slika B 14 - Upogibni moment v lesenem okvirju - levi pokončnik
- Slika B 15 - Upogibni moment v lesenem okvirju - desni pokončnik
- Slika B 16 - Upogibni moment v lesenem okvirju - spodnji venec

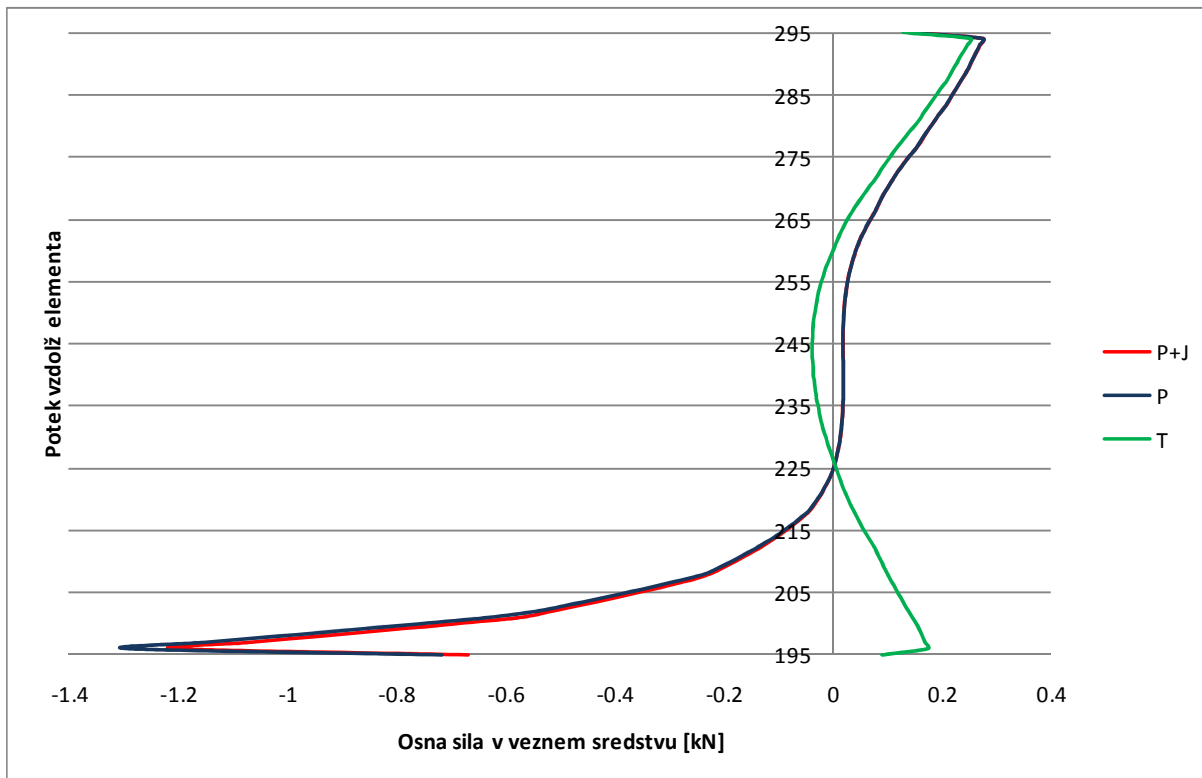
NOTRANJE STATIČNE KOLIČINE V ADHEZIVU POLIURETAN KÖDIGLAZE P



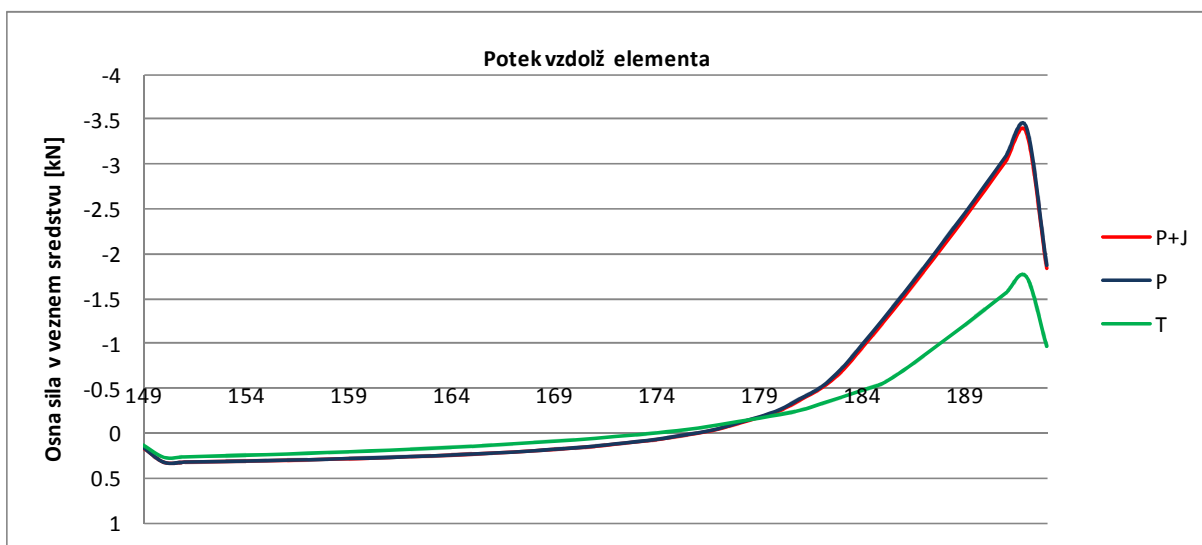
Slika B 1 - Osna sila v adhezivu Ködiglaze P v zgornjem vencu



Slika B 2 - Osna sila v adhezivu Ködiglaze P v levem pokončniku

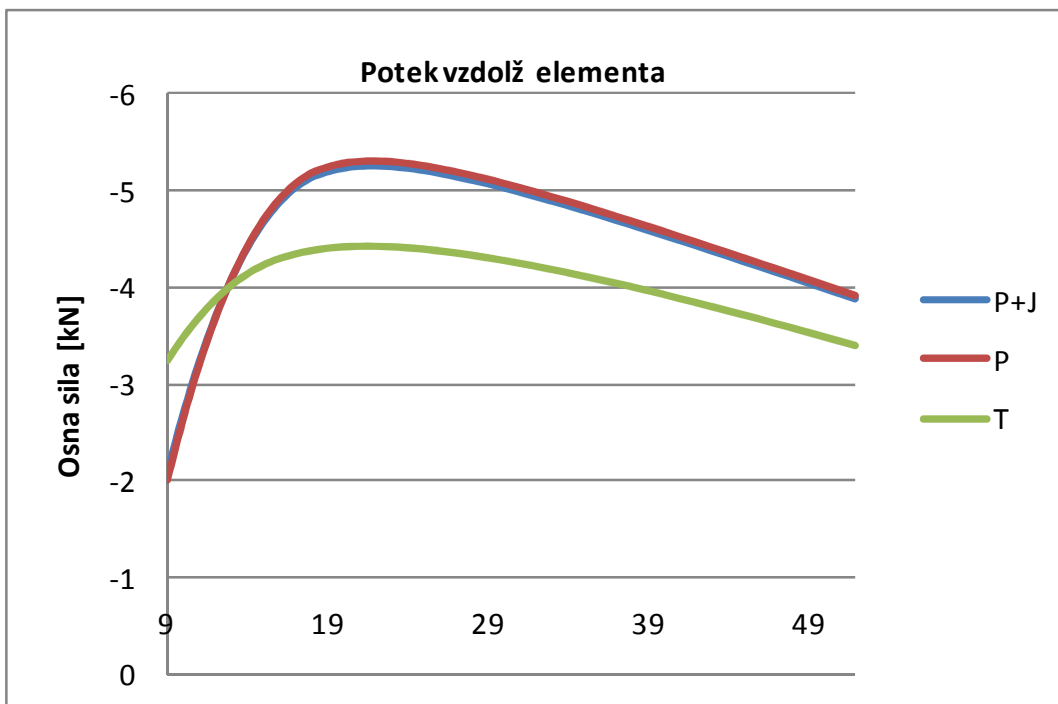


Slika B 3 - Osna sila v adhezivu Ködiglaze P v desnem pokončniku

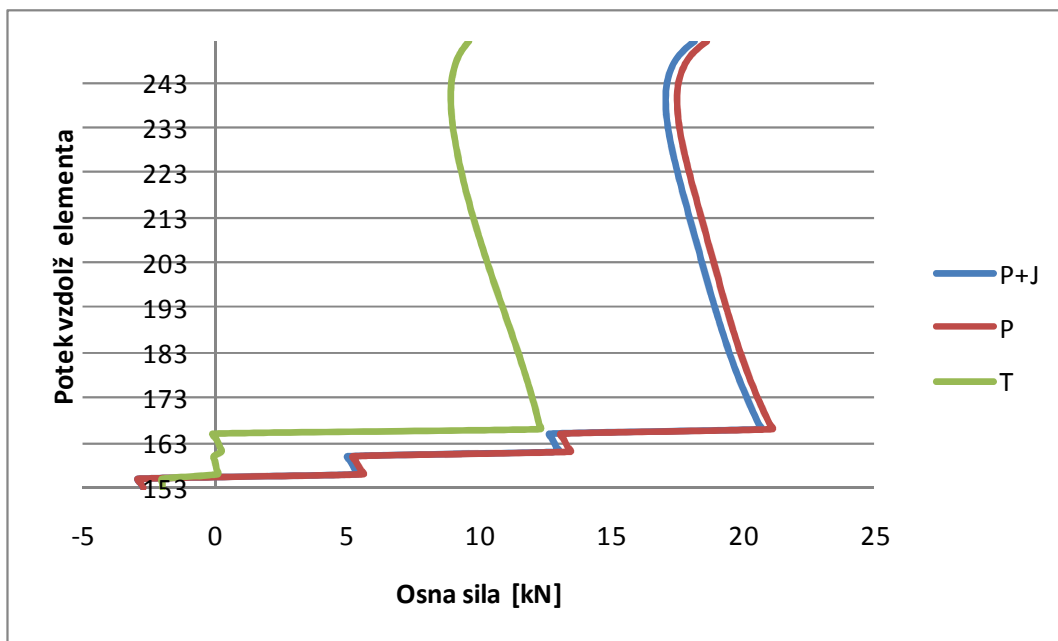


Slika B 4 Osna sila v adhezivu Ködiglaze P spodnjem vencu

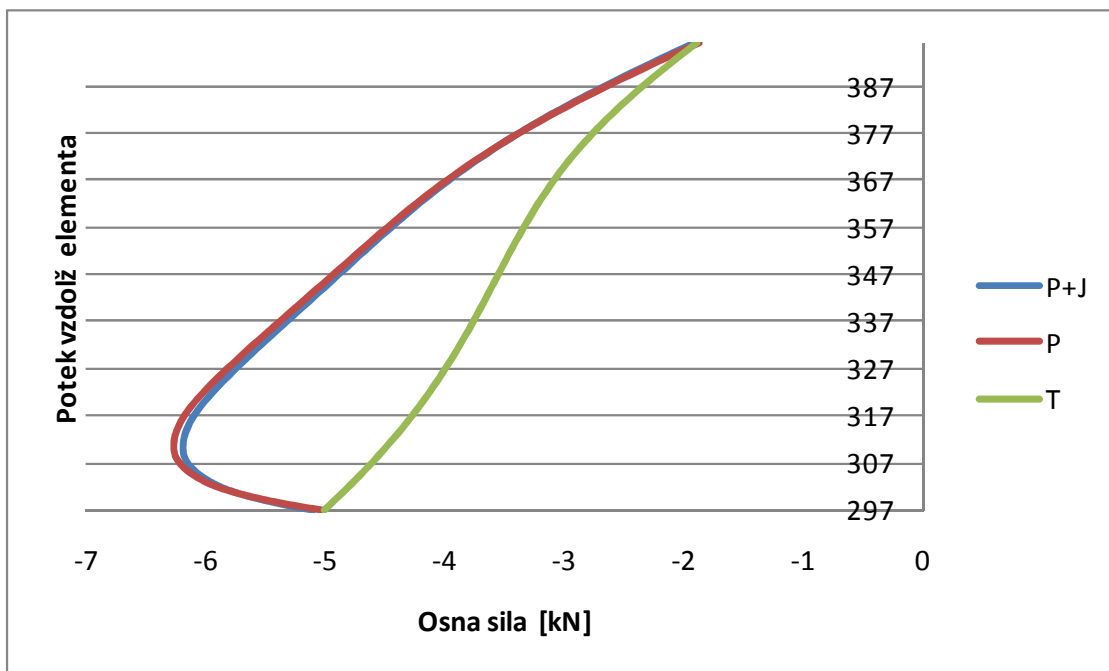
OSNE SILE V LESENUM OKVIRJU



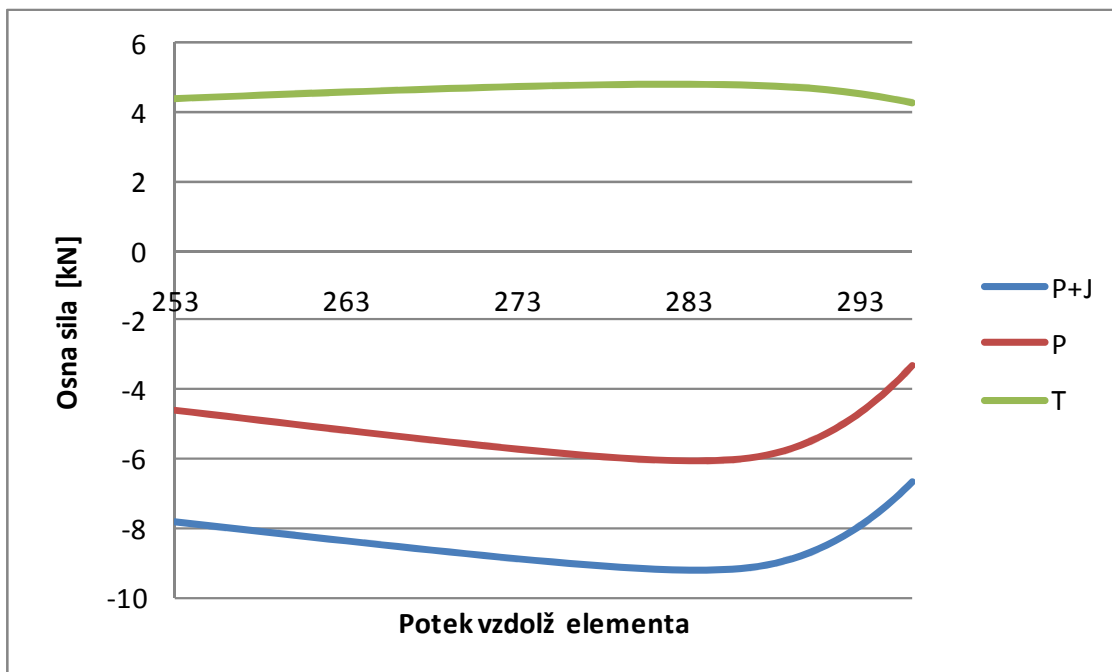
Slika B 5 - Osna sila v lesenem okvirju - zgornji venec



Slika B 6 - Osna sila v lesenem okvirju - levi pokončnik

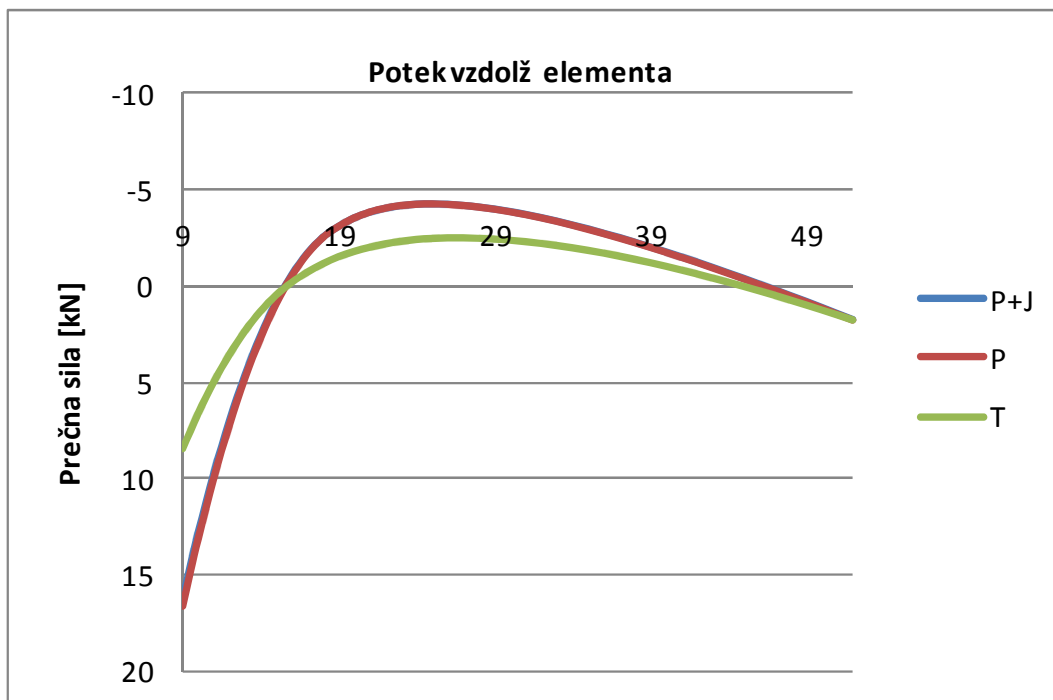


Slika B 7 - Osna sila v lesenem okvirju - desni pokončnik

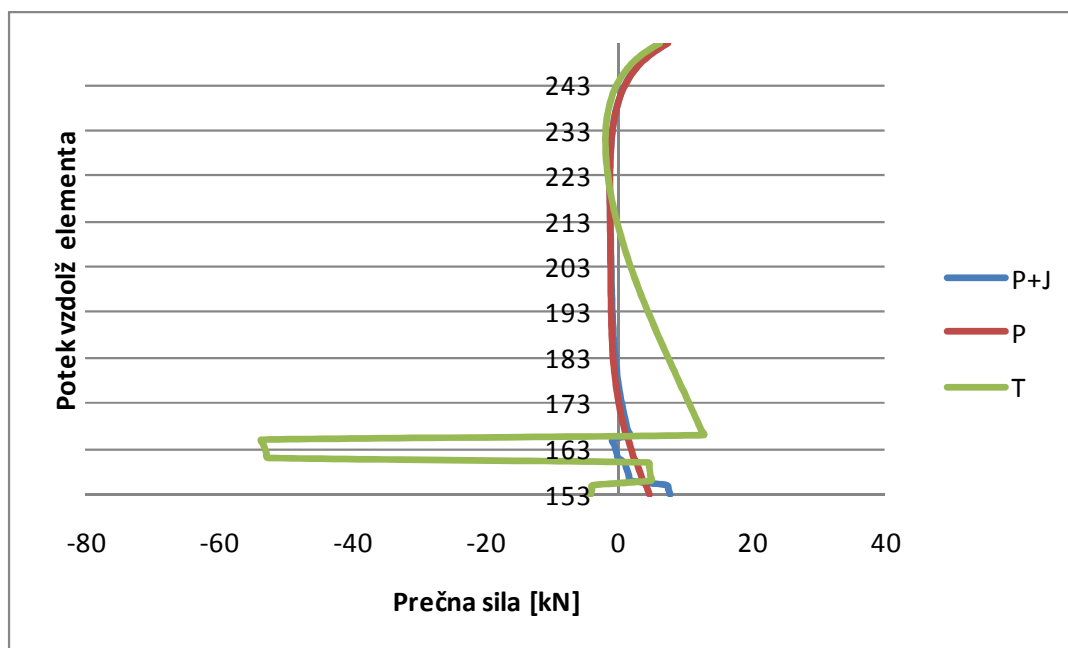


Slika B 8 - Osna sila v lesenem okvirju - spodnji venec

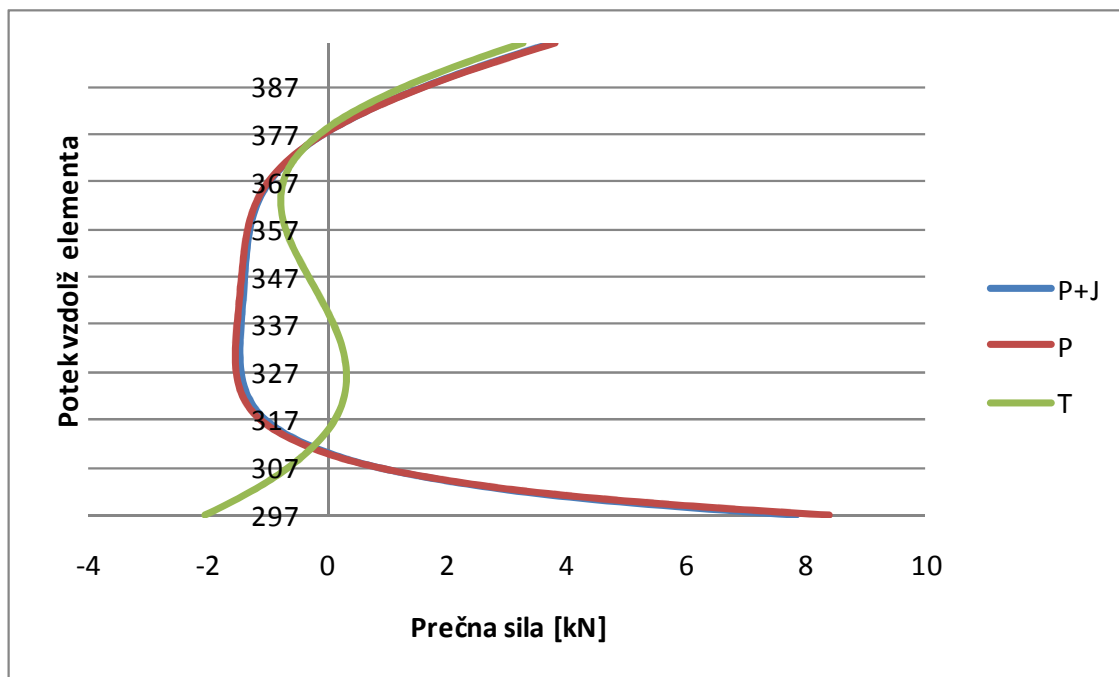
PREČNA SILA V LESENUM OKVIRJU



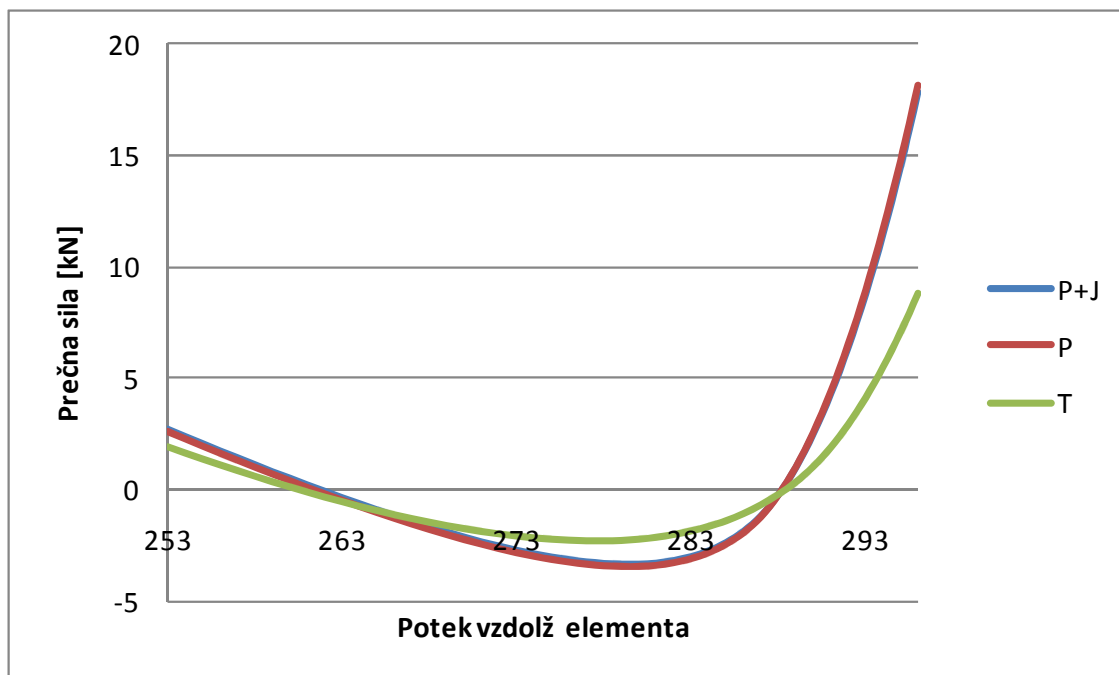
Slika B 9 - Prečna sila v lesenem okvirju - zgornji venec



Slika B 10 - Prečna sila v lesenem okvirju - levi pokončnik

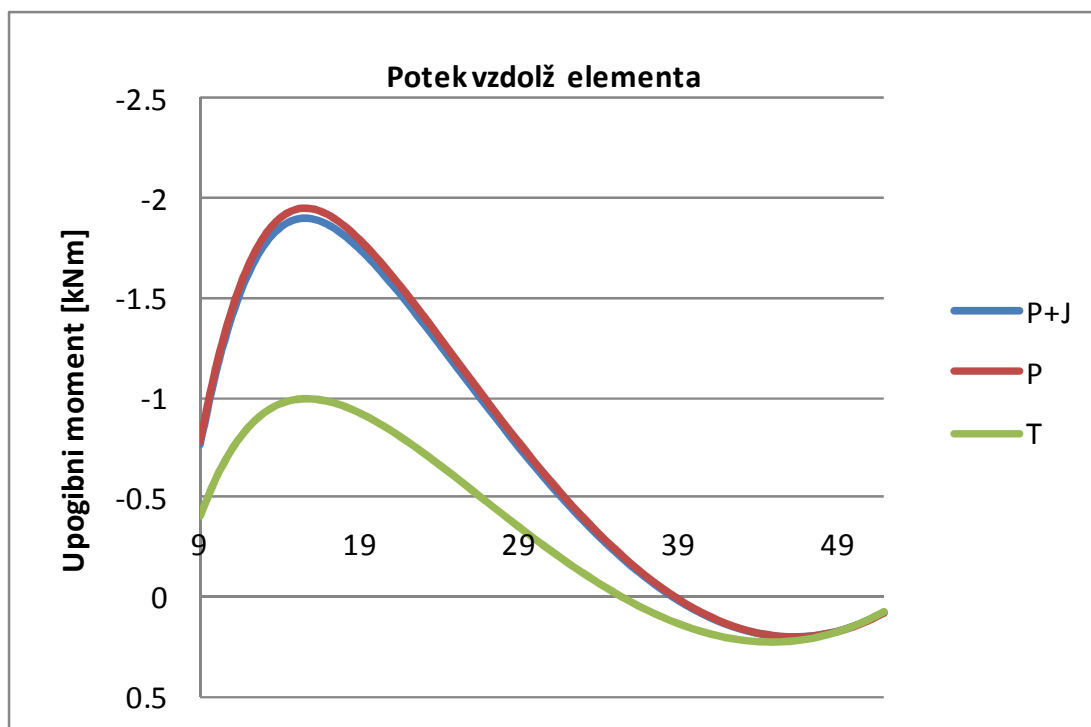


Slika B 11 - Prečna sila v lesenem okvirju - desni pokončnik

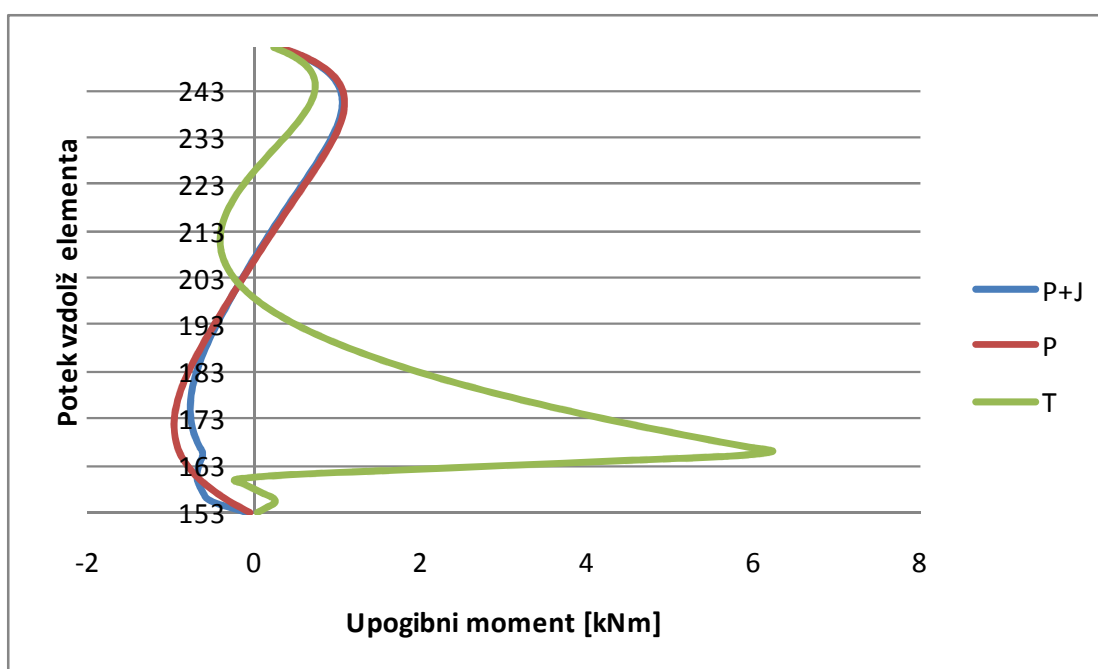


Slika B 12 - Prečna sila v lesenem okvirju - spodnji venec

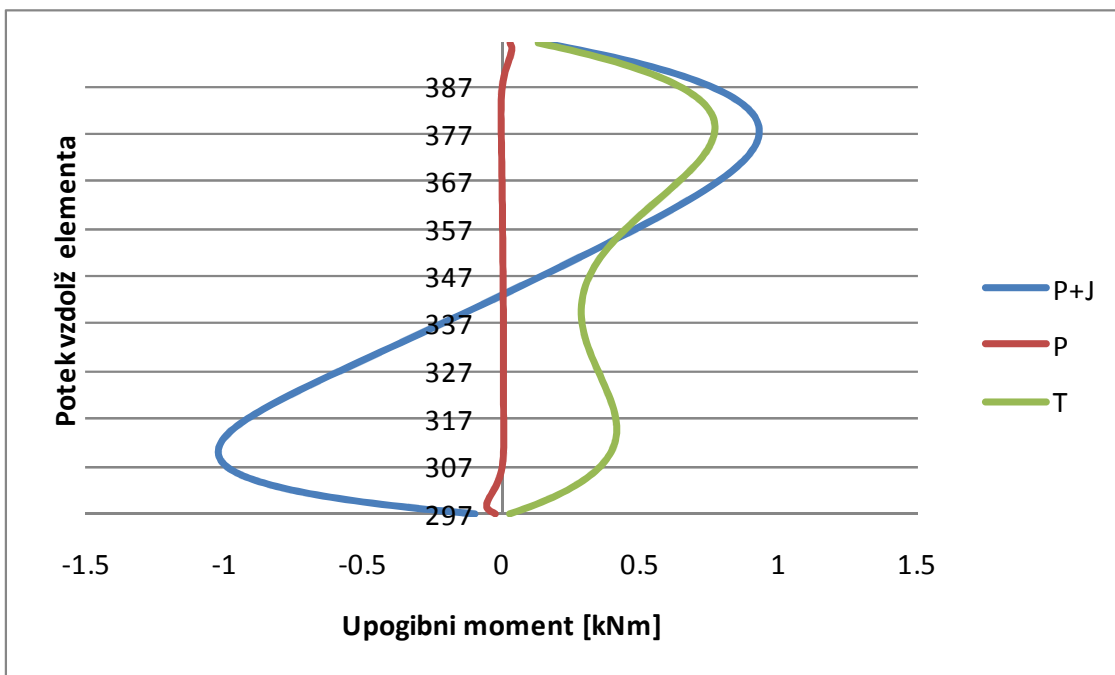
UPOGIBNI MOMENT V LESENEM OKVIRJU



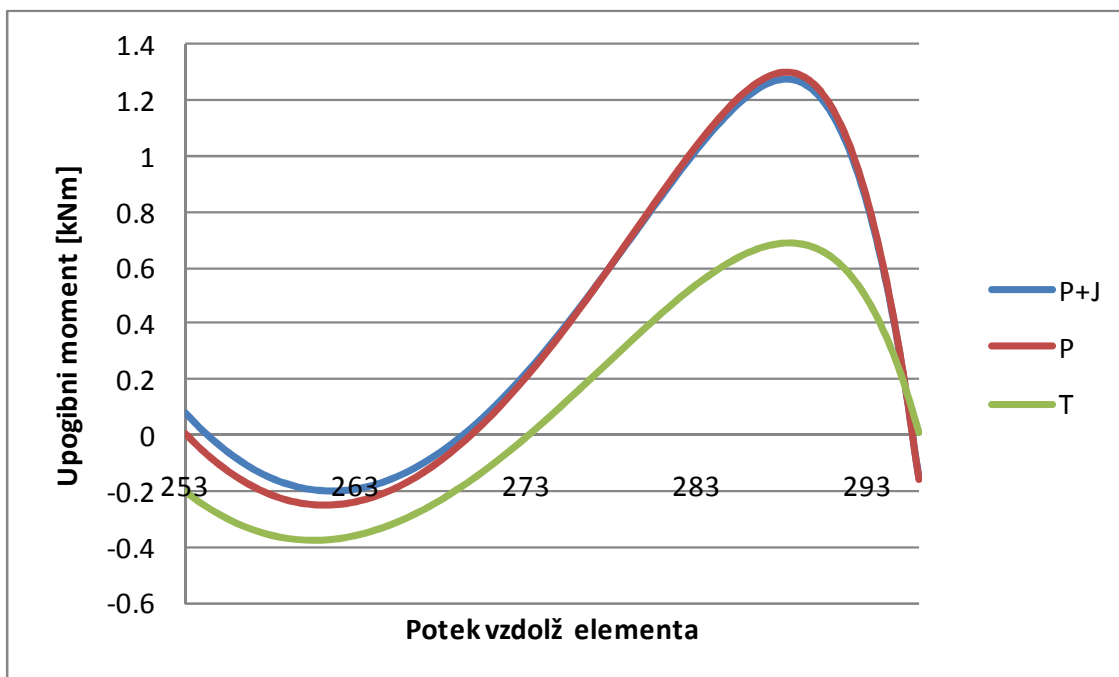
Slika B 13 - Upogibni moment v lesenem okvirju - zgornji venec



Slika B 14 - Upogibni moment v lesenem okvirju - levi pokončnik



Slika B 15 - Upogibni moment v lesenem okvirju - desni pokončnik



Slika B 16 - Upogibni moment v lesenem okvirju - spodnji venec

PRILOGA C: NOTRANJE STATIČNE KOLIČINE PRI UPORABI ADHEZIVA EPOKSI KÖRAPOX 558

NOTRANJE STATIČNE KOLIČINE V ADHEZIVU EPOKSI KÖRAPOX 558

- Slika C 1 - Osna sila v adhezivu Körapox 558 v zgornjem vencu
- Slika C 2 - Osna sila v adhezivu Körapox 558 v levem pokončniku
- Slika C 3 - Osna sila v adhezivu Körapox 558 v desnem pokončniku
- Slika C 4 - Osna sila v adhezivu Körapox 558 v spodnjem vencu

OSNE SILE V LESENUM OKVIRJU

- Slika C 5 - Osna sila v lesenem okvirju - zgornji venec
- Slika C 6 - Osna sila v lesenem okvirju - levi pokončnik
- Slika C 7 - Osna sila v lesenem okvirju - desni pokončnik
- Slika C 8 - Osna sila v lesenem okvirju - spodnji venec

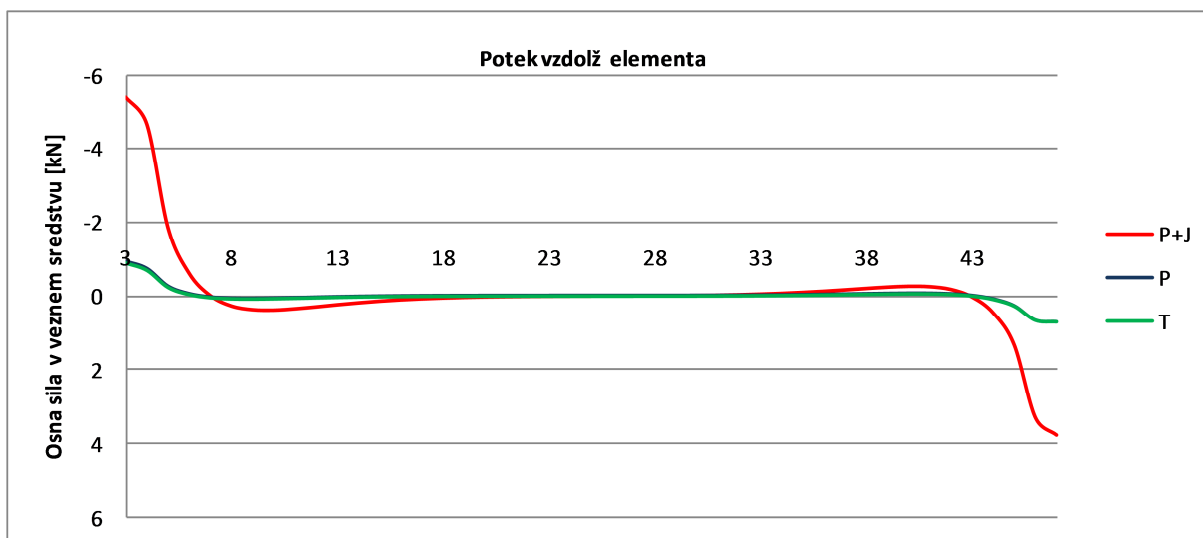
PREČNA SILA V LESENUM OKVIRJU

- Slika C 9 - Prečna sila v lesenem okvirju - zgornji venec
- Slika C 10 - Prečna sila v lesenem okvirju - levi pokončnik
- Slika C 11 - Prečna sila v lesenem okvirju - desni pokončnik
- Slika C 12 - Prečna sila v lesenem okvirju - spodnji venec

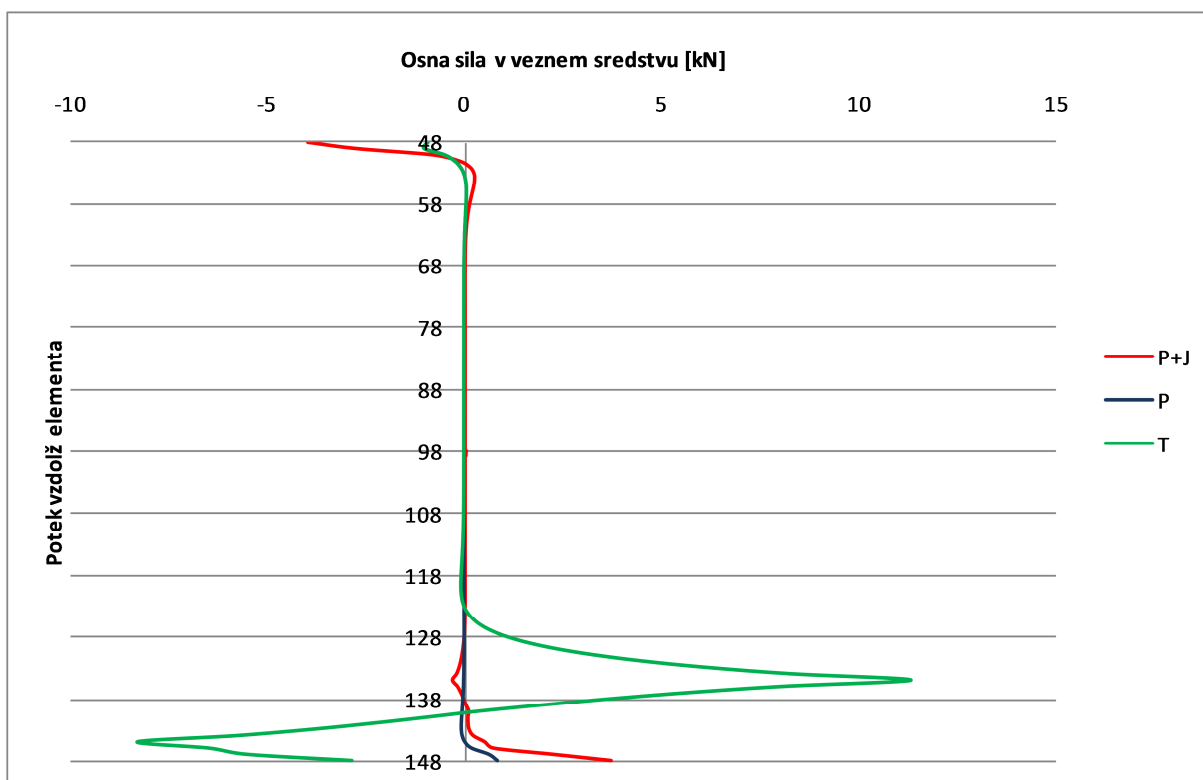
UPOGIBNI MOMENT V LESENUM OKVIRJU

- Slika C 13 - Upogibni moment v lesenem okvirju - zgornji venec
- Slika C 14 - Upogibni moment v lesenem okvirju - levi pokončnik
- Slika C 15 - Upogibni moment v lesenem okvirju - desni pokončnik
- Slika C 16 - Upogibni moment v lesenem okvirju - spodnji venec

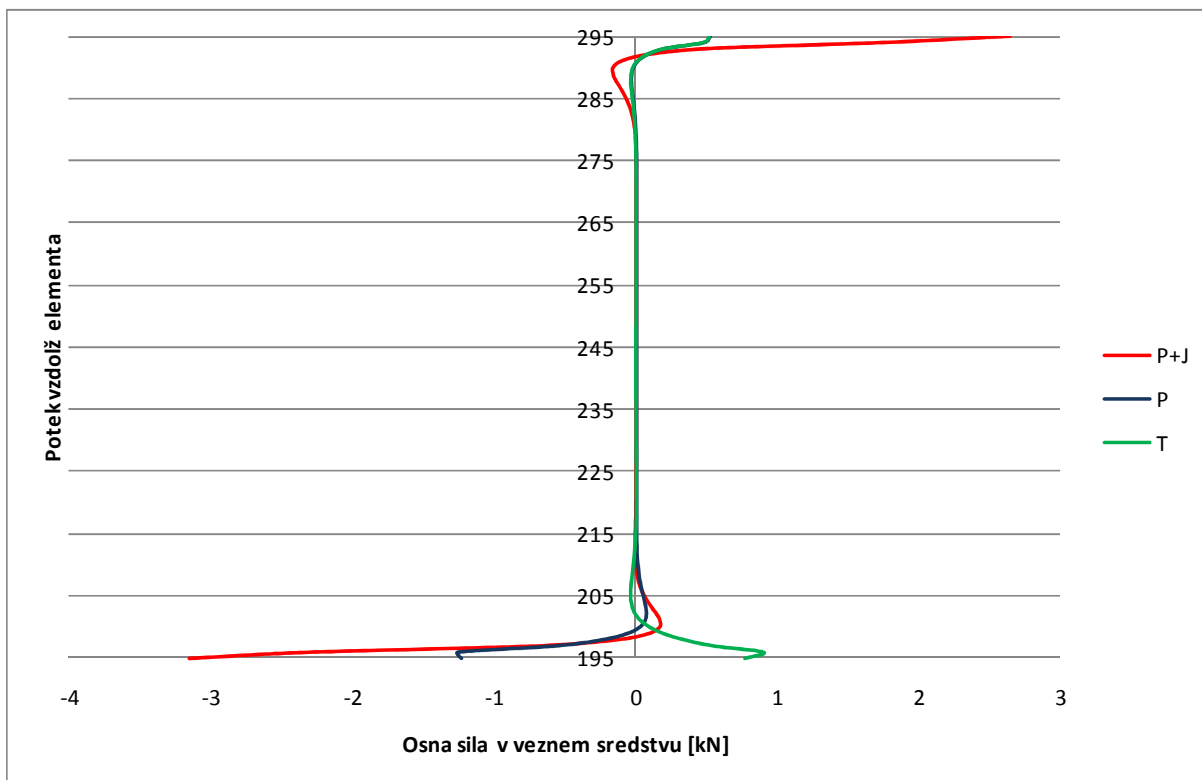
NOTRANJE STATIČNE KOLIČINE V ADHEZIVU EPOKSI KÖRAPOX 558



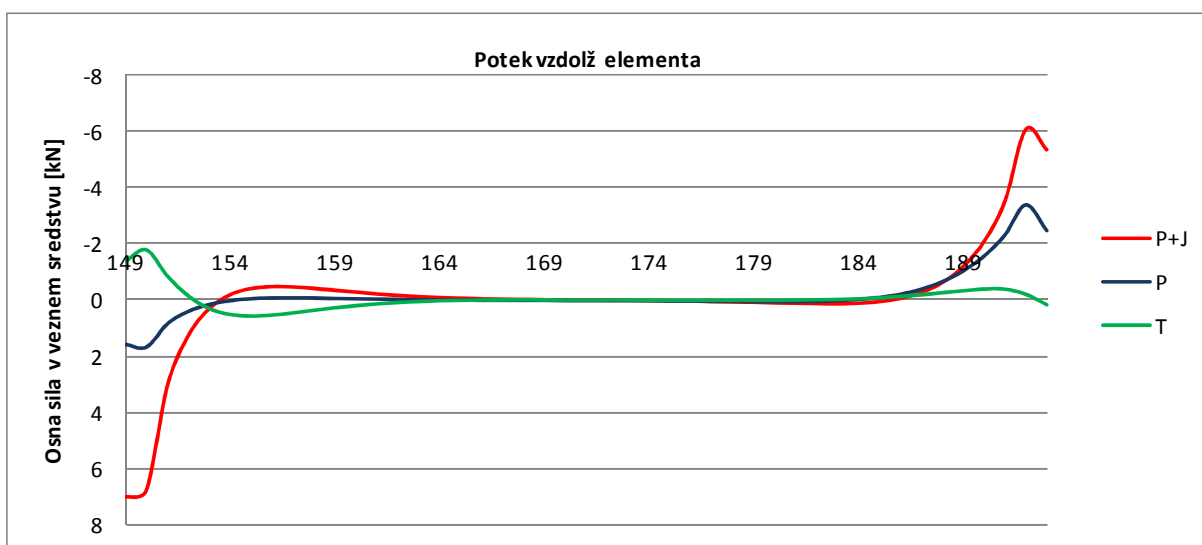
Slika C 1- Osna sila v adhezivu Körapox 558 v zgornjem vencu



Slika C 2- Osna sila v adhezivu Körapox 558 v levem pokončniku

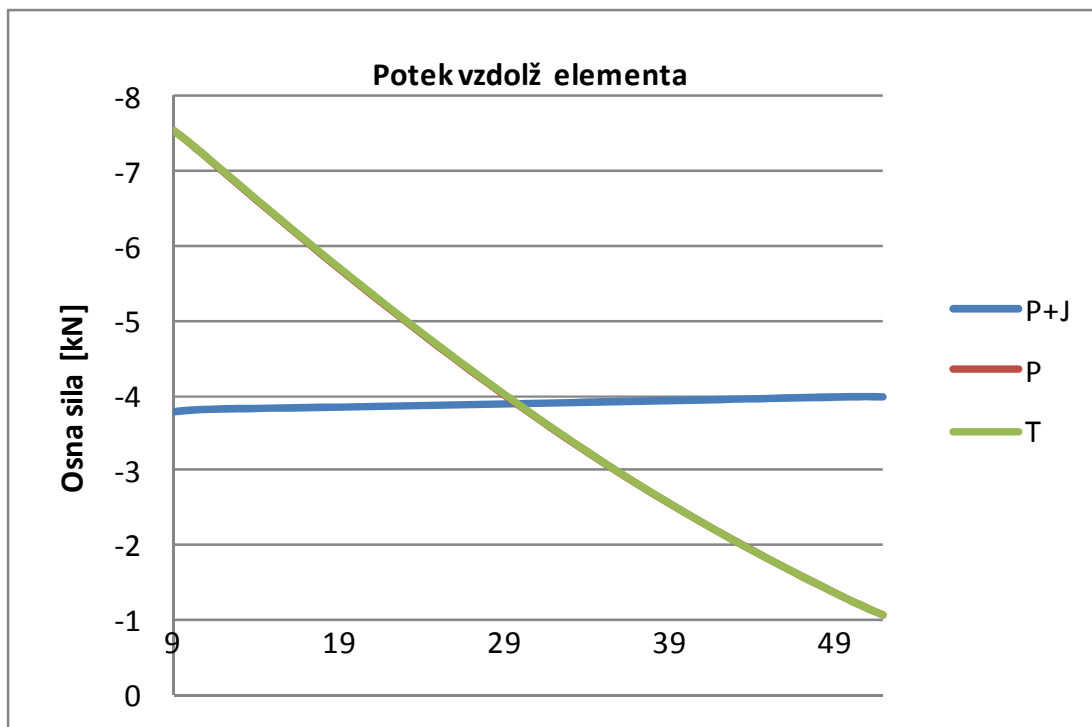


Slika C 3 - Osna sila v adhezivu Kōrapox 558 v desnem pokončniku

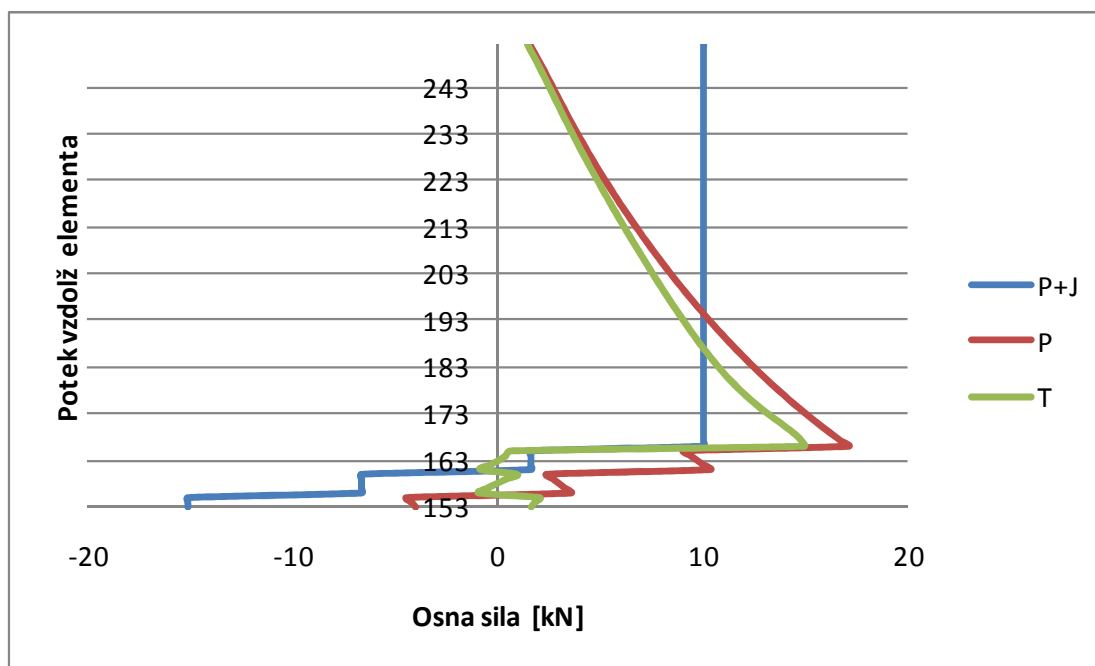


Slika C 4 - Osna sila v adhezivu Kōrapox 558 v spodnjem vencu

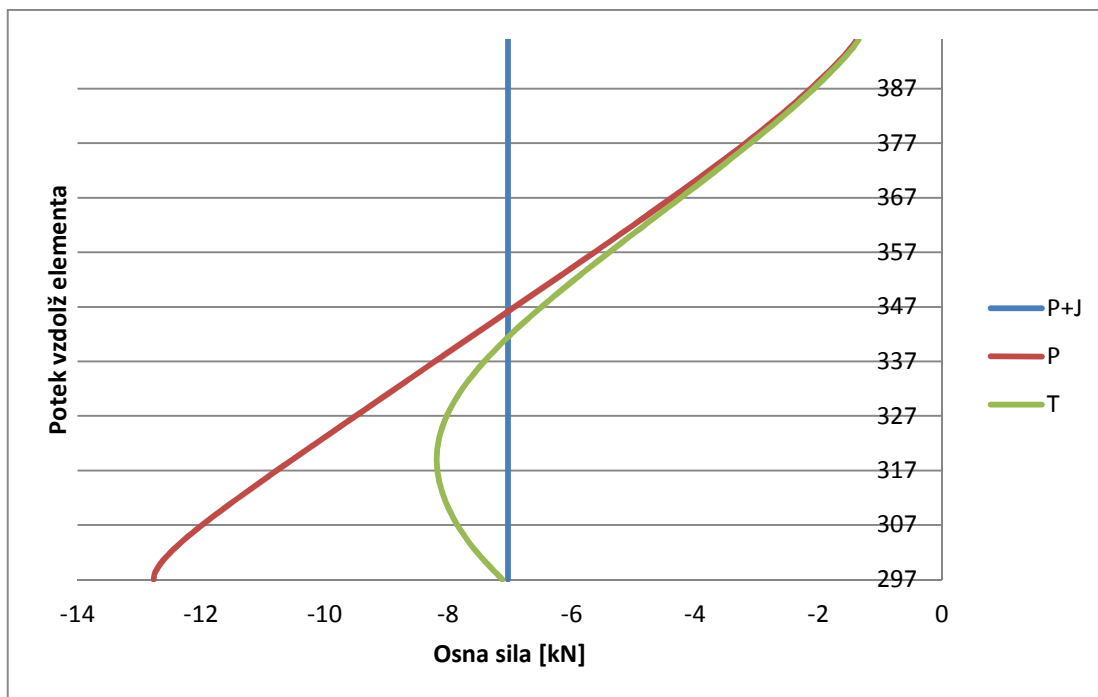
OSNE SILE V LESENUM OKVIRJU



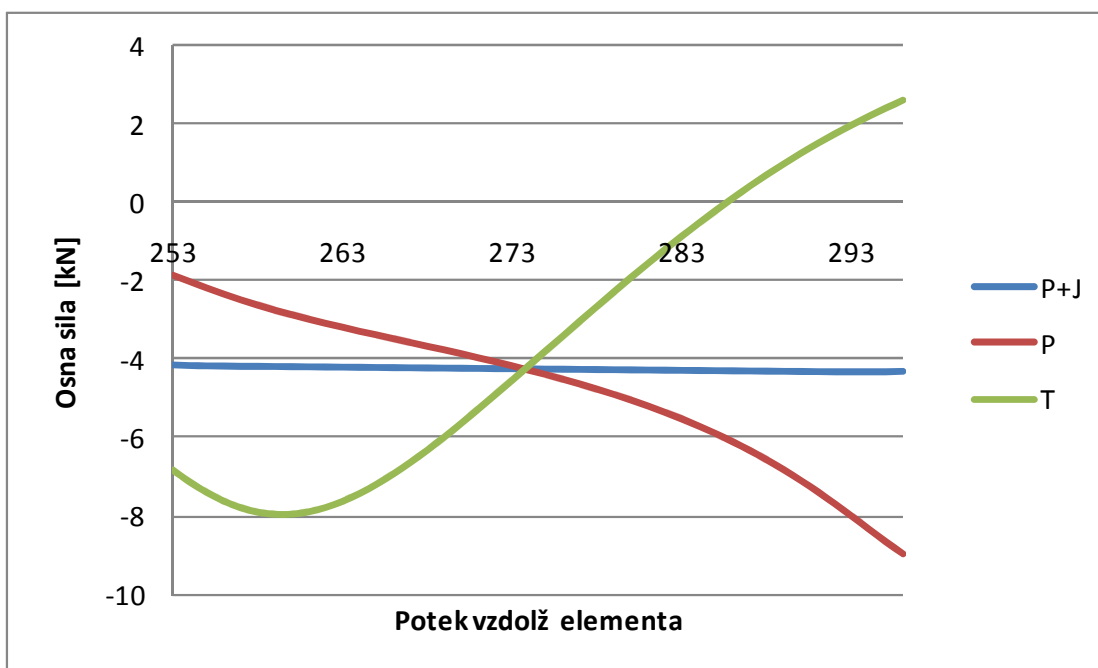
Slika C 5 - Osna sila v lesenem okvirju - zgornji venec



Slika C 6 - Osna sila v lesenem okvirju - levi pokončnik

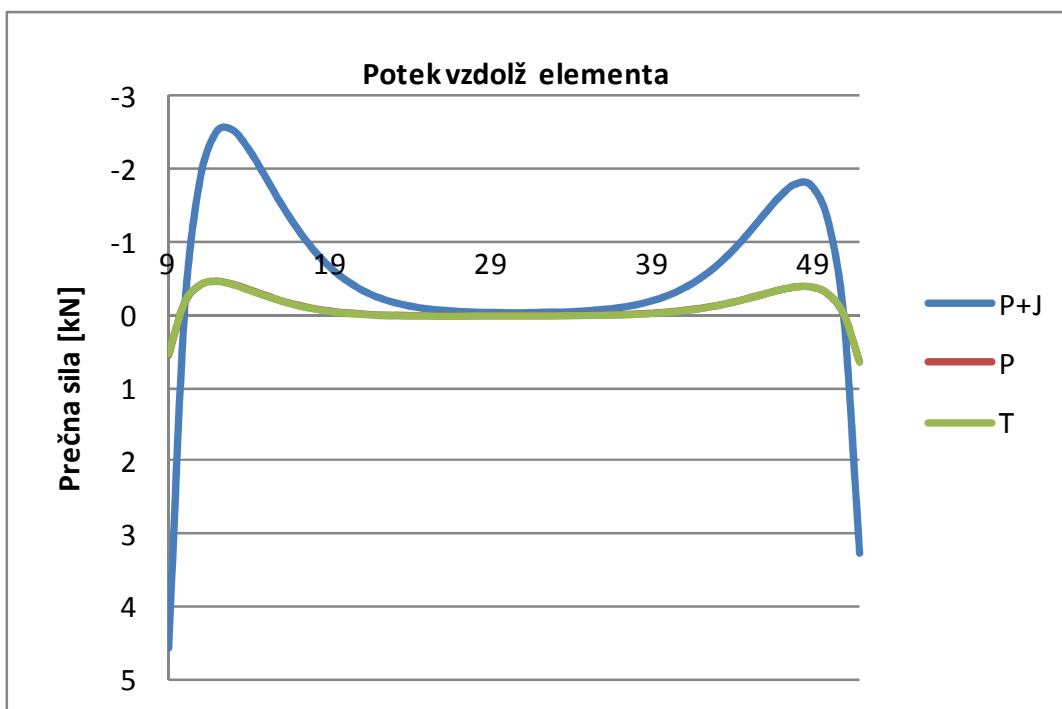


Slika C 7 - Osna sila v lesenem okvirju - desni pokončnik

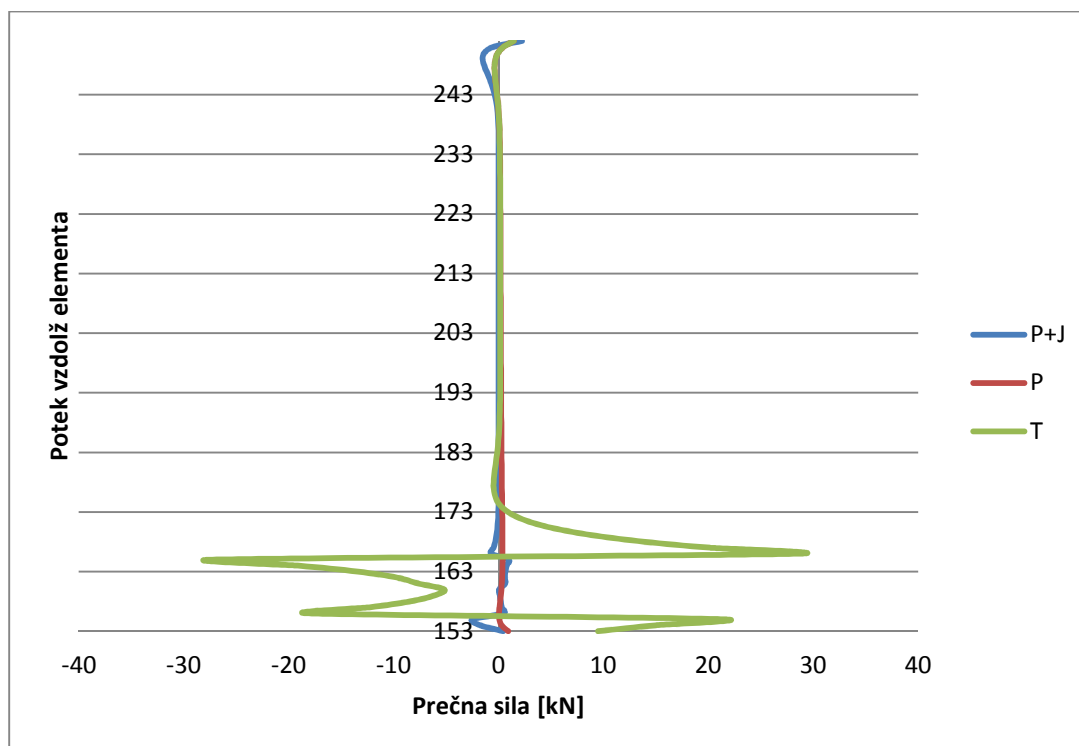


Slika C 8 - Osna sila v lesenem okvirju - spodnji venec

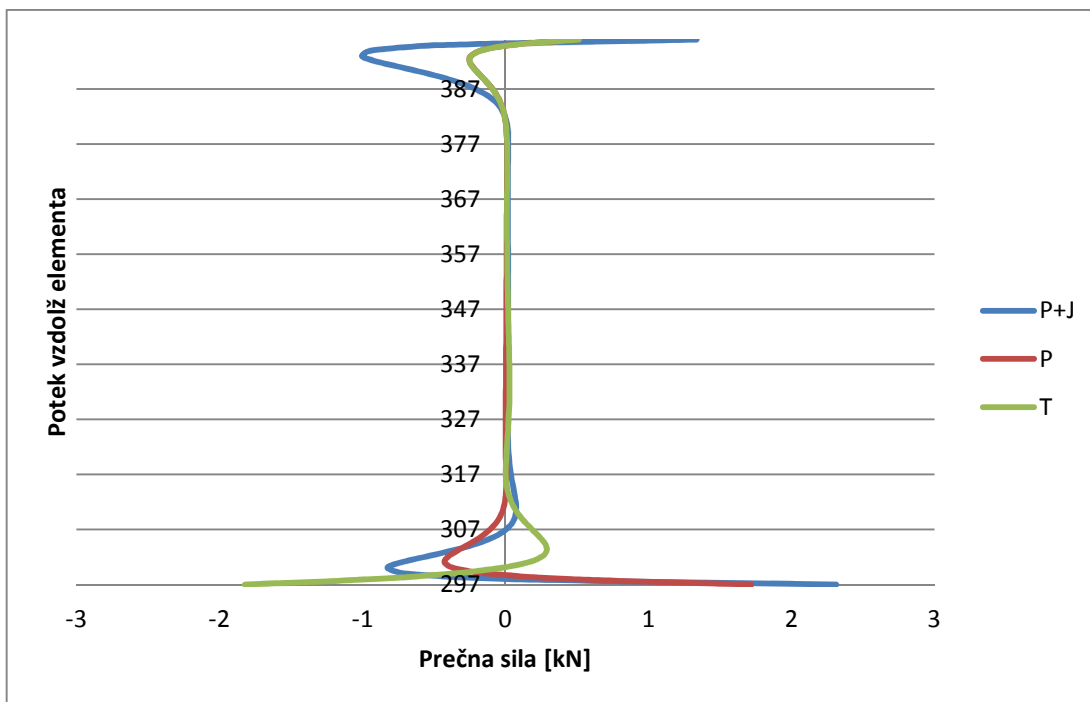
PREČNA SILA V LESENUM OKVIRJU



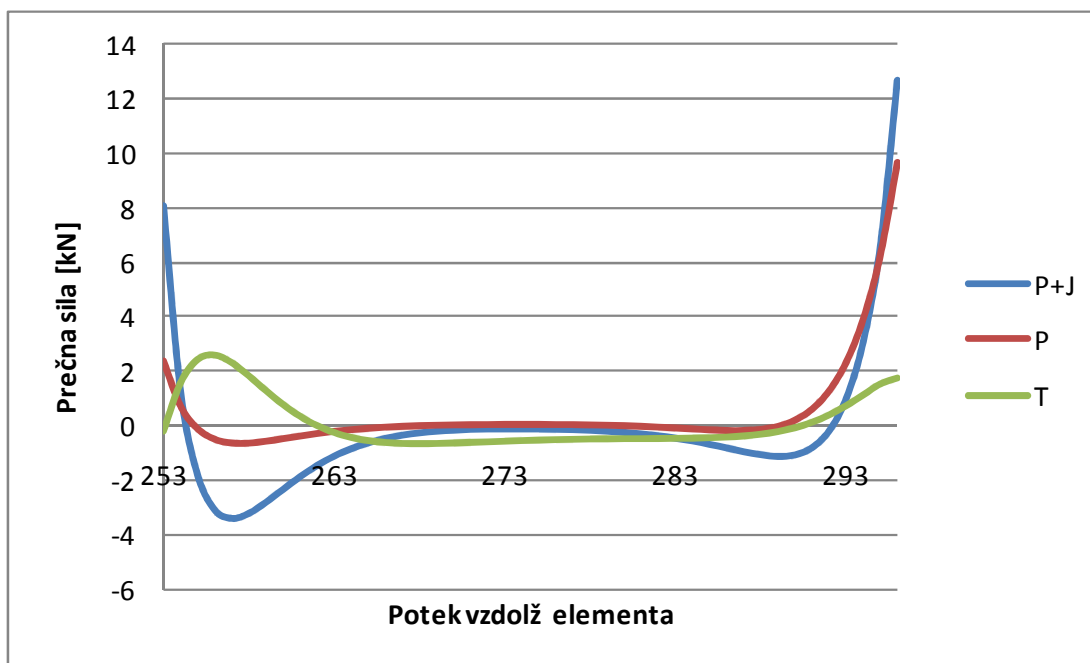
Slika C 9 - Prečna sila v lesenem okvirju - zgornji venec



Slika C 10 - Prečna sila v lesenem okvirju - levi pokončnik

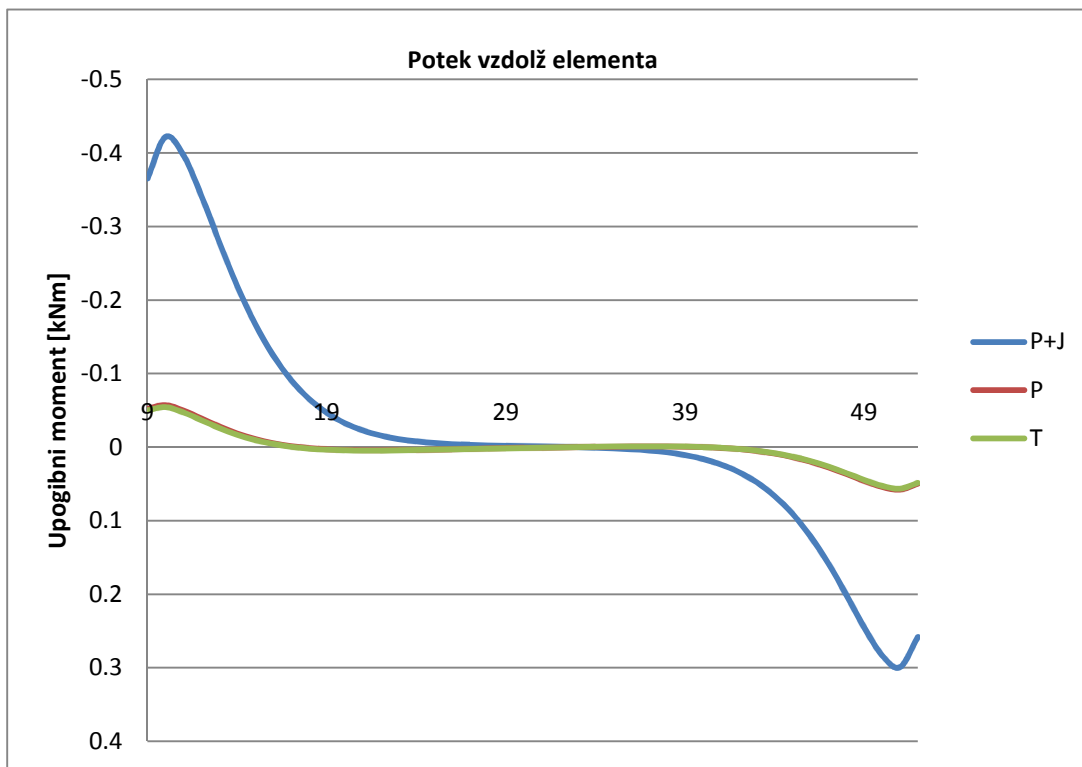


Slika C 11 - Prečna sila v lesenem okvirju - desni pokončnik

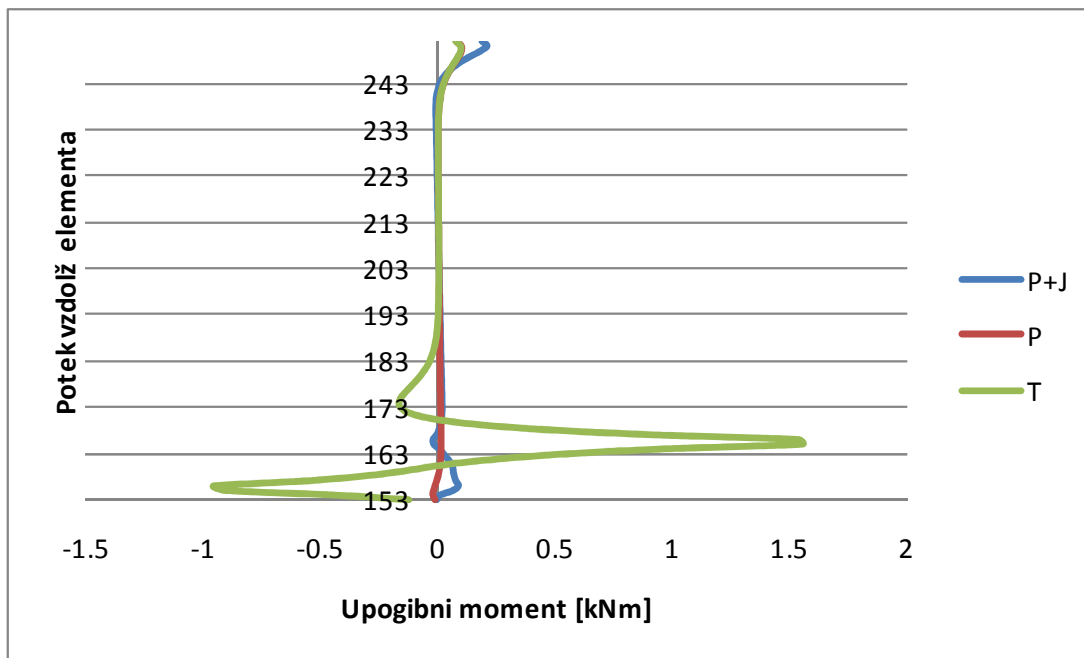


Slika C 12 - Prečna sila v lesenem okvirju - spodnji venec

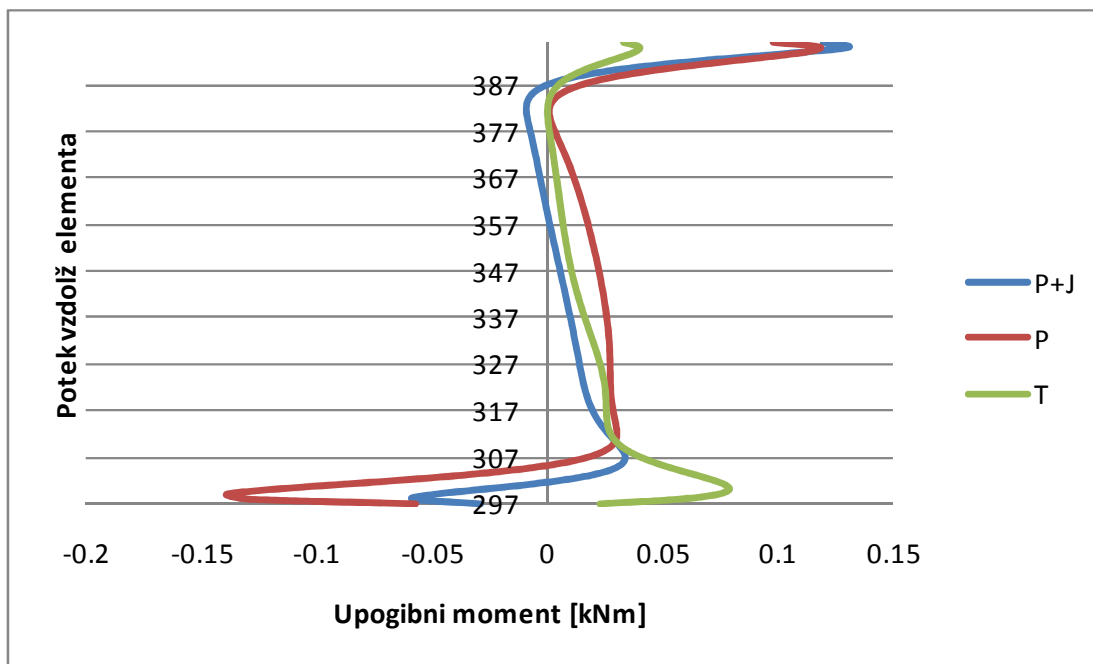
UPOGIBNI MOMENT V LESENUM OKVIRJU



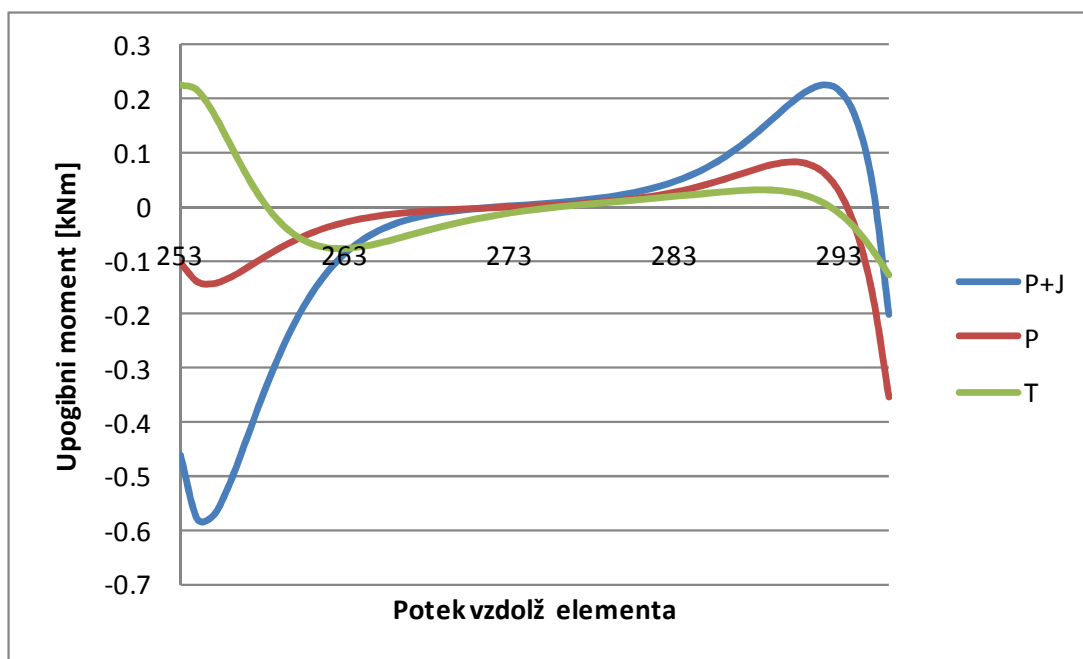
Slika C 13 - Upogibni moment v lesenem okvirju - zgornji venec



Slika C 14 - Upogibni moment v lesenem okvirju - levi pokončnik



Slika C 15 - Upogibni moment v lesenem okvirju - desni pokončnik



Slika C 16 - Upogibni moment v lesenem okvirju - spodnji venec