

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:

Sitar, A., 2016. Obnašanje stropnega vogalnika modularne enote pri upogibni obremenitvi. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Sinur, F.): 80 str.

Datum arhiviranja: 20-07-2016

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:

Sitar, A., 2016. Obnašanje stropnega vogalnika modularne enote pri upogibni obremenitvi. Master Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Sinur, F.): 80 pp.

Archiving Date: 20-07-2016

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

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM DRUGE STOPNJE
GRADBENIŠTVO
SMER GRADBENE
KONSTRUKCIJE**

Kandidat:

ALJAŽ SITAR

**OBNAŠANJE STROPNEGA VOGALNIKA MODULARNE
ENOTE PRI UPOGIBNI OBREMENITVI**

Magistrsko delo št.: 23/II.GR

**BEHAVIOUR OF MODULAR UNIT CORNER
SUBJECTED TO FLEXURAL LOAD**

Graduation – Master Thesis No.: 23/II.GR

Mentor:

doc. dr. Franc Sinur

Ljubljana, 30. 06. 2016

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Aljaž Sitar izjavljam, da sem avtor magistrskega dela z naslovom »Obnašanje stropnega vogalnika modularne enote pri upogibni obremenitvi«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 25.5.2016

Aljaž Sitar

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	519.6:624.014.2(043)
Avtor:	Aljaž Sitar
Mentor:	doc. dr. Franc Sinur
Naslov:	Obnašanje stropnega vogalnika modularne enote pri upogibni obremenitvi
Tip dokumenta:	Magistrsko delo-B.
Obseg in oprema:	80 str., 14 preg., 58 sl., 20 graf., 23 en.,
Ključne besede:	metoda končnih elementov (MKE), jeklen spoj, enoosni natezni preizkus, materialni model, bilinearni model, eksperimentalna analiza, parametrična analiza

Izveček

Magistrsko delo obravnava obnašanje stropnega vogalnika modularne enote pri upogibni obremenitvi. Za ta namen smo razvili numeričen model v programu Abaqus in ga verificirali z eksperimentalnimi testi, ki so bili izvedeni na Zavodu za gradbeništvo Slovenije (ZAG). Testni vzorci so bili obremenjeni z osno silo, in vertikalno silo na koncu profila, ki je povzročala upogibni moment v stropnem vogalniku. Za potrebe numeričnih analiz so bili narejeni tudi enoosni natezni preizkusi materiala, kjer smo določili dejanske natezne trdnosti jekel S235JR, S355JR in S355MC, ki je bil uporabljen v testnih vzorcih. Na podlagi razvitega numeričnega modela smo izvedli parametrično analizo, kjer smo preverjali vpliv nivoja tlačne sile na upogibno obnašanje vogalnika modularne enote. Z različnimi načini ojačevanja stropnega vogalnika, smo izboljšali nosilnost in togost vogalnika. V zadnjem delu naloge je predstavljena razporeditev sil v vijakih in vpliv dodatnih preklonih pločevin na nosilnost vijaknega spoja. Pokazali smo, da je dejanska razporeditev bistveno drugačna od računsko predpostavljene.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 519.6:624.014.2(043)
Author: Aljaž Sitar
Supervisor: doc. dr. Franc Sinur
Title: The behavior of the roof corner element off the modular unit bending
Document type: Master's Thesis
Scope and tools: 80 p., 14 tab., 58 fig., 20 graph., 23 eq.,
Keywords: finite element method (FEM), steel joint, uniaxial tensile test, the material model, bilinear model, experimental analysis, parametric analysis

Abstract

The present master thesis discusses the performance of modular unit ceiling corner under flexural load. For this reason a numerical model was developed in the program Abaqus as well as verified with experimental tests, performed at the Slovenian National Building and Civil Engineering Institute (ZAG). Test samples were loaded with axial force as well as vertical force at the end of the profile, causing bending moment in the ceiling corner. A single-axe tensile test was also made for the needs of numeric analysis, where actual tensile strengths of steel S235JR, S355JR and S355MC were used in the test samples. On the basis of the developed numeric model a parametric analysis was performed, testing the influence compressive load level has on the bending performance of modular unit corner. By using various means to intensify ceiling corner, its load capacity and stiffness have been improved. The final part of the thesis presents the allocation of forces in screws and the influence of additional switch tin plates on the load capacity of bolting joint. It has been proven that the actual allocation is quite different to its constructed value.

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem doc. dr. Francu Sinurju za mentorstvo, pomoč in nasvete pri premagovanju različnih ovir na poti k izdelavi magistrskega dela.

Zahvaljujem se tudi staršem, ki so mi omogočili študij in vsem bližnjim, ki so mi pri študiju stali ob strani.

Hvala tudi zaposlenim v podjetju REM d.o.o., ki so mi pomagali pri izdelavi magistrskega dela.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE.....	I
IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.....	IV
ZAHVALA	V
KAZALO VSEBINE	VI
KAZALO SLIK	VIII
KAZALO GRAFIKONOV	X

str.

1 UVOD	1
2 NOSILNI SISTEM KONTEJNERJA	3
2.1 Statična zasnova modularne enote	3
2.2 Tipska zasnova modularne enote	3
2.3 Obremenite objektov po EVROKODU SIST EN 1991-1-1	4
2.4 Nosilna konstrukcija kontejnerja.....	5
2.4.1 Pod	6
2.4.2 Steber	7
2.4.3 Strop.....	8
2.5 STATIČNI IZRAČUN 20" MODULARNE BIVALNE ENOTE	10
2.5.1 Obtežba.....	10
2.5.1.1 STALNA OBTEŽBA:	10
2.5.1.2 SPREMENLJIVA OBTEŽBA:	11
2.5.1.3 OBTEŽNE KOMBINACIJE:.....	11
2.5.1.4 MEJNO STANJE UPORABNOSTI:	12
2.6 3D model.....	13
2.7 Rezultati analize	13
2.8 Spoji jeklenih konstrukcij	15
3 EKSPERIMENTALNE RAZISKAVE OBNAŠANJA STROPNEGA PROFILA.....	18
3.1 Uvod in opis modela	18
3.2 Opis testnih vzorcev in potek testa.....	19
3.3 Opis testne opreme in lokacija merilnih inštrumentov.....	20
3.4 Rezultati testa	22
4 NUMERIČNI MODEL	27
4.1 Materialni model	27

4.2	Materialne karakteristike	28
4.3	Umerjanje materialnega modela	32
4.4	Določitev tipa in velikosti mreže končnih elementov v programu ABAQUS.....	35
4.5	Modeliranje vogalnika v programu ABAQUS	39
5	VERIFIKACIJA NUMERIČNEGA MODELA Z REZULTATI TESTA	43
5.1	Primerjalna analiza modela v ABAQUS-u z rezultati testa.....	43
5.2	Analitična kontrola rezultatov numerične analize	46
5.2.1	Kontrola in določanje razreda kompaktnosti prečnih prerezov elementov modela..	46
5.2.1.1	Kompaktnost stropnih elementov.....	46
5.2.2	Analitični preračun odpornosti	50
5.3	Vpliv osne sile na nosilnost sistema in vpliv materialnega modela v ABAQUS-u	51
6	PARAMETRIČNA ANALIZA	55
6.1	Preliminarna analiza	55
6.2	Analitičen izračun nosilnosti vijakov.....	57
6.3	Možni načini ojačitve stropnega vogalnika in rezultati analiz v ABAQUS-u	61
6.3.1	Izboljšanje nosilnosti vogalnika z materialom višje trdnosti, ojačitvenim rebrom in diagonalami	64
6.3.2	Izboljšanje nosilnosti z materialom višje trdnosti in ojačitvenimi rebri.....	64
6.3.3	Dodatno izboljšanje nosilnosti z diagonalami	68
6.3.4	Dodatno izboljšanje nosilnosti z zaprtim krakom pasnice stebra	71
6.3.5	Dodatno izboljšanje nosilnosti z varjenim polnim jeklom v dnu stropnega nosilca in odebelitvijo plašča stropnega vogalnika.....	73
6.4	Nosilnost spoja vogalnika brez ojačitvenih ploščic	75
7	ZAKLJUČEK.....	78
8	VIRI.....	80

KAZALO SLIK

	str.
Slika 1: Primer samostojne sestavljene modularne enote (REM-reference).	1
Slika 2: Primer objekta, ki je sestavljen iz modularnih enot (REM-reference).	2
Slika 3: A- Priprava paketa modularne enote; B- Sestavljena modularna enota pripravljena na transport.	2
Slika 4: Standardne dovoljene obremenitve modularnih bivalnih enot (REM-reference).	3
Slika 5: Standardne dimenzije modularnih bivalnih enot (REM-reference).	4
Slika 6: 3D model kontejnerja s stropom, podom in stebri.	5
Slika 7: Tloris standardnega 20" kontejnerje, dolžine 6,055 m, širine 2,435 m in višine 120 mm.	6
Slika 8: Prečni prerez vzdolžnega in prečnega profila (prerez B-B) ter prečk (prerez A-A).	6
Slika 9: A- 3D pogled stebra; B- Prečni prerez standardnega stebra, kjer so označene lokacije vijakov; C- Steber z dodatnimi ojačitvami.	7
Slika 10: A- Imbus vijak DIN 912 M12x40; B- Vijačni spoj stebra preko priključne pločevine na vogalnik poda.	8
Slika 11: 3D model stropa v programu Autodesk Inventor.	8
Slika 12: A- Model vogalnega stropnega elementa v programu Autodesk Inventor; B- Slika stropnega vogalnika privarjenega na stropne profile.	9
Slika 13: A-Tabela največjih dovoljenih navpičnih pomikov konstrukcije (Beg); B- Tabela največjih dovoljenih horizontalnih pomikov (Beg).	12
Slika 14: A- 3D model kontejnerja v programu Scia; B- Položaj težišča, ki ga program Scia Engineer izračuna.	13
Slika 15: A- Potek momente linije v vzdolžni smeri modularne enote glede za ovojnico MSN vplivov; B- Prikaz večosne upogibne momentne obremenitve stropnega vogalnika.	14
Slika 16: Potek normalnih napetosti po konstrukcijskih elementih kontejnerja.	14
Slika 17: A- Delitev togosti glede na rotacijsko kapaciteto (Beg); B- Trije različni načini izvedbe spojev glede zagotavljanja togosti (Členkasti spoji-I, Delno togi spoji-II in Togi spoji- III) (Beg).	16
Slika 18: Delitev spojev glede na nosilnost (Beg).	17
Slika 19: Rotacijska kapaciteta spoja (Beg).	17
Slika 20: Testni vzorci pripravljene na testiranje.	18
Slika 21: Shematična zasnova testa.	19
Slika 22: Testni vzorec, vpet v preizkuševalno napravo, s pozicijami testne opreme in lokacijo merilnega lističa SG3.	20
Slika 23: Lokacija merilnih lističev na testnih vzorcih SG1 in SG2 na zunanji strani in SG3, ki je na notranji strani vzorca.	21
Slika 24: Območje merjena s pomočjo optične merilne naprave in lokacija merilnih lističev v spodnjem vogalu stropnega profila.	21
Slika 25: Lokalno izbočenje pločevine stropnega vogalnika nad priključno pločevino.	23
Slika 26: A- Elasto-plastičen diagram napetosti (Plastic model); B- Dejanski diagram napetosti pri čemer rdeča krivulja prikazuje napetosti na nedeformiran prerez, modra pa na deformiran prečni prerez (Plastic model).	27
Slika 27: Oblika testnega vzorca, na katerem so zarisane črtice dodatno kontrolo raztezka, zaporedna številka in vrsta materiala iz katerega je vzorec narejen.	29
Slika 28:A- Testna naprava za enosni natezni preizkus ROALL AMSLER HA100, z računalnikom za zajemanje podatkov ter krmilnikom; B- Porušen vzorec, vpet v čeljusti.	29
Slika 29: Model testnega vzorca v programu ABAQUS.	33
Slika 30: A- Prikaz postopnega deformiranja vzorca v programu ABAQUS; B- Trije porušeni vzorci ter en neporušen vzorec.	35

Slika 31: Numerični model, ki je razdeljen na končne elemente.	36
Slika 32: A- Končni element v obliki tetraedra C3D4; B- Končni element v obliki tetraedra C3D10. (SIMULIA).....	36
Slika 33: Uporaba C3D4 končnih elementov na modelu vijaka (slika levo) in C3D10 (slika desno).	37
Slika 34: 3D model vogalnega stropnega elementa v programu ABAQUS, na katerega sta navarjena stropna profila in privijačen steber.	39
Slika 35: Delavniška risba na kateri je označen način varjenja priključne pločevine s plaščem stebra (zunanja stran- zgornja slika levo in notranja stran stebra-zgornja slika desno) ter 3D pogled na lokacije zvarov med pločevinami stropnega vogalnika (rumena barva).	40
Slika 36: Geometrijske karakteristike vijakov DIN912 in vzmetnih podložk DIN 127 (Maticamb)....	41
Slika 37: Definiranje kontaktne površine zvara na med ojačitvenimi ploščicami in stropnim vogalnikom.....	42
Slika 38: A- Nedeformiran vzorec testa; B- Deformiran vzorec po zaključku testa.....	44
Slika 39: A- Deformirana oblika testnega vzorca; B- Deformirana oblika in pomik (mm) v pravokotni smeri glede na ravnino plašča modela vzorca v programu ABAQUS pri dvakratni povečavi.	45
Slika 40: A-Geometrija sestavljenega stropnega profila z uvarjeno ojačitvijo; B-Izračun geometrijskih karakteristik s programom Scia Engineer.	46
Slika 41: A-Geometrijske sestavljenega stebra z ojačitvijo; B-Izračun geometrijskih karakteristik s programom Scia Engineer.....	48
Slika 42: Geometrija sestavljenega vogalnika s sestavnimi elementi.	49
Slika 43: Časovni potek plastifikacije materiala pri povečevanju obremenitve.....	56
Slika 44: Tloris vijačnega spoja in predpostavljena os vrtenja A-A.	57
Slika 45: A- Območje predvidene lokacije nevtralne osi; B- Stropni vogalnik, kjer je označena priključna pločevina.	60
Slika 46: Stopnja plastifikacije vijakov M12 12.9. in ojačitvenih ploščic v 3D pogledu (slika levi) in prečni prerez ojačitvenih ploščic, označen s črno črto.....	60
Slika 47: Možni načini povečanja nosilnosti in togosti spoja.	61
Slika 48: A- Širina raznosa koncentrirane tlačne obremenitve z dodatnim ojačitvenim rebro; B- 3D pogled na vogalnik z rebri na vsaki strani vogalnika.	62
Slika 49: Možni načini povečanja nosilnosti in togosti spoja.	63
Slika 50: Primerjava velikost plastifikacije simulacij modelov SIM6-SIM9 pri 5 kratni povečavi deformacij in 100 mm vertikalnega pomika.....	67
Slika 51: Model simulacij SIM10 in SIM11.	68
Slika 52: Primerjava velikosti plastifikacije simulacij modelov SIM10 in SIM11 pri 5kratni povečavi deformacij in 100 mm vertikalnega pomika.	70
Slika 53: Prečni prerez stebra in lokacija ojačanih pasnic stebra pri simulaciji SIM32.....	71
Slika 54: Prikaz velikosti plastifikacije simulacije modela SIM32 pri 5kratni povečavi deformacij in 100 mm vertikalnega pomika.....	72
Slika 55: Lokacija dodatnega ojačitvenega polnega jekla v stropnem profilu.....	73
Slika 56: Prikaz velikosti plastifikacije simulacije modela SIM33 pri 5kratni povečavi deformacij in 100 mm vertikalnega pomika.....	74
Slika 57: A- Plastifikacija vijakov pri SIM40 in 55mm pomiku točke na koncu nosilca; B- Plastifikacija vijakov in ojačitvenih ploščic pri SIM6 in 55mm pomiku točke na koncu nosilca (Poglavje 6.2);.....	77
Slika 58: A- Območje predvidene lokacije nevtralne osi SIM40; B- A- Območje predvidene lokacije nevtralne osi SIM6.....	77

KAZALO GRAFIKONOV

	str.
Grafikon 1: Rezultati treh testnih vzorcev na ZAG-u. Na vertikalni osi grafa je prikazana velikost vertikalne sile na koncu stropnega profila, na horizontalni osi pa pomik v dani točki.....	22
Grafikon 2: Vrednosti deformacij merilnih lističev (SG1, SG2 in SG3) pri testu 1.....	24
Grafikon 3: Vrednosti deformacij merilnih lističev (SG1, SG2 in SG3) pri testu 2.....	24
Grafikon 4: Vrednosti deformacij merilnih lističev (SG1, SG2 in SG3) pri testu 3.....	25
Grafikon 5: Vrednosti deformacij merilnih lističev SG1 pri vseh treh testi.....	25
Grafikon 6: Rezultati vzorcev enoosnega nateznega preizkusa.	31
Grafikon 7: Primerjava pomika in sile izmerjenih pri enoosnem nateznem preizkusu z rezultati analize v programu ABAQUS.....	34
Grafikon 8: Odziv analize numeričnega modela v odvisnosti od izbire tipa končnih elementov in velikosti mreže v programu ABAQUS.....	38
Grafikon 9: Primerjava rezultatov testa z numeričnimi simulacijami v programu ABAQUS.	43
Grafikon 10: Bilinearni materialni model z utrditvijo in korigirani materialni model, korigiran " Δf_y ".	52
Grafikon 11: Primerjava rezultatov numeričnih simulacij ob uporabi različnih materialnih podatkov in obremenitev.	53
Grafikon 12: Določevanje meje plastifikacije glede na spremembo naklona sile obremenjevanja.....	54
Grafikon 13: Sila v vijakih M12 12.9 glede na velikost pomika stropnega profila.....	59
Grafikon 14: Primerjava nosilnosti med različnimi načini ojačevanja vogalnika.	65
Grafikon 15: Določevanje meje plastifikacije glede na spremembo naklona sile obremenjevanja pri modelih SIM6-SIM9.	65
Grafikon 16: Primerjava nosilnosti med modela numeričnih simulacij SIM8-SIM11.....	69
Grafikon 17: Primerjava nosilnosti med modeli numeričnih simulacij SIM10, SIM11 in SIM32.....	72
Grafikon 18: Primerjava nosilnosti med modeli numeričnih simulacij SIM10, SIM11, SIM32 in SIM33.	74
Grafikon 19: Primerjava nosilnosti med modeli numeričnih simulacij SIM6, SIM33 in SIM40.....	76
Grafikon 20: Primerjava nosilnosti vijakov modela SIM6 (polne črte) in SIM40 (črtkane črte).....	76

KAZALO PREGLEDNIC

	str.
Preglednica 1: Tabela teže fasadnih sendvič panelov za kvadratni meter plošče (Trimo).....	10
Preglednica 2: Klasificiranje števila vzorcev različne kvalitete jekla, začetna geometrija in hitrost obremenjevanja vzorcev.....	30
Preglednica 3: Računski čas analize pri posamezni velikost mreže in tipu končnih elementov.....	37
Preglednica 4: Elastični odpornostni moment, največji moment in največja sila na meji tečenja.....	50
Preglednica 5: Elastični odpornostni moment, največji moment in največja sila na meji tečenja na mestu stičišča stropnega profila z vogalnikom.....	56
Preglednica 6: Preračun velikosti maksimalnega momenta, ki ga prenesejo vijaki M12 12.9 preden se prvi vijak plastificira.....	58
Preglednica 7: Preračun velikosti maksimalnega momenta, ki ga prenesejo ploščici preden se najbolj oddaljena ploščica v celoti plastificira.....	58
Preglednica 8: Velikost tlačene sile $N_{w,Ed}$	62
Preglednica 9: Analitični izračun odpornosti stojine plašča vogalnika na tlačno silo $N_{w,Ed}$ in odpornost z dodatnim ojačitvenim rebrom.....	63
Preglednica 10: Simulacije in načini ojačevanja modela.....	64
Preglednica 11: Simulacije in načini ojačevanja modela.....	68
Preglednica 12: Simulacije in načini ojačevanja modela.....	71
Preglednica 13: Simulacije in načini ojačevanja modela.....	73
Preglednica 14: Simulacije in načini ojačevanja modela.....	75

1 UVOD

V obdobju, ko čas teče vse hitreje, se okoli nas dogajajo hitre spremembe v tehnološkem in sociološkem smislu, zato se je temu posledično prilagodil tudi način gradnje objektov. Ob dobri tehnični podpori sodobne računalniške in programske opreme, je postala gradnja veliko bolj načrtovana in organizirana. Sodobna BIM orodja omogočajo izdelavo modelov objekta, v katerem lahko projektant predvidi faze gradnje in vidi elemente, ki sestavljajo objekt. Tako lahko vsak element objekta v fazi gradnje primerno izpopolnimo in definiramo njegove mehanske in geometrijske lastnosti. S tem naredimo vrsto tipskih modularnih enot (Slika 1), ki jih sestavljajo pod, strop, stebri in zunanja fasada, narejena iz sendvič plošč. Modularne enote lahko po želji sestavljamo med sabo s tipiziranimi spojnimi elementi. Tako lahko z manjšimi enotami zgradimo večji objekt poljubnih dimenzij in oblike. Primer modularne zloženke posameznih manjših modularnih enot je prikazan na sliki 2. Enote lahko nato poljubno zlagamo v objekte po širini, v višino pa lahko zložimo enote le do treh etaž. Pri tem moramo seveda paziti, da so elementi znotraj posamezne enote ustrezni. S tem mislimo predvsem na stike modularnih enot v vogalih in pravilno pozicioniranje vertikalnih nosilnih elementov, kot so stebri in distančne cevi, ki se uporabljajo takrat, ko so razdalje med stebri večje. Med modularnimi enotami so lahko prosti prehodi brez zunanjih fasad, tako da dobimo večje prostore znotraj objekta, ali pa predelne stene, ki razmejujejo prostore med sabo. Poleg tega so lahko na zunanjih straneh objektov večje zastekljene površine, ki v prostor prepuščajo več svetlobe in dajejo večji estetski in arhitekturni videz objektu.



Slika 1: Primer samostojne sestavljene modularne enote (REM-reference).



Slika 2: Primer objekta, ki je sestavljen iz modularnih enot (REM-reference).

Modularne bivalne enote lahko dobavimo tudi v obliki paketa, kar omogoča znižanje stroškov transporta, saj zapakirani elementi zavzamejo manjši volumen. Vsak paket vsebuje vse potrebne elemente za hitro in enostavno sestavo enote na terenu. Za prekomorski transport se modularne enote dobavijo tudi v ladijskem kontejnerju. Modularna bivalna enota se takoj po postavitvi na ustrezno utrjeno podlago, priključitvi na električno in komunalno omrežje, uporablja brez kakršnih koli dodatnih del. Vendar smo s tovrstnim načinom gradnje omejeni s transportom, zato je potrebno v fazi načrtovanja objekta planirati tudi ta segment projekta. Modularne enote so tipskih dimenzij, širina znaša od 2,435 m do 2,989 m. V vzdolžni smeri so dolžine prav tako tipizirane, od 2,989 m pa do 9,125 m. To so dimenzije, ki omogočajo transport modularne enote s kamionom. Enote so lahko v tem primeru že sestavljene, ali pa pakirane v paketu, kot je bilo že omenjeno (Slika 3).



Slika 3: A- Priprava paketa modularne enote; B- Sestavljena modularna enota pripravljena na transport.

2 NOSILNI SISTEM KONTEJNERJA

2.1 Statična zasnova modularne enote

Osnovni nosilni sistem modularne enote je jeklen okvir, ki ga sestavljajo pod, strop in stebri. Elementi so narejeni iz hladno oblikovanih pločevin. Pod in strop sta v celoti varjena iz manjših sestavnih elementov. V modularno nosilno konstrukcijo jih povežemo preko stebrov, ki jih vijačimo v prej pripravljene luknje. Jeklena konstrukcija omogoča sestavljanje in postavitve modularnih enot v tri nadstropja za nazivne obremenitve, upoštevane v statičnem izračunu modularne enote. Pri dosedanjem statičnem preračunu so predpisane obtežbe, ki jih lahko standardna trinadstropna konstrukcija prenese (Slika 4). Če se obremenitev konstrukcijskega sistema povečuje, je potrebno modularno enoto ustrezno prilagoditi in povečati nosilnost nosilnih elementov.

Obremenitev stropa (koristna) Ceiling load (working) Deckenbelastbarkeit (nutzbar)	100 kg/m ² (1,0 kN/m ²)
Obremenitev poda (koristna) Floor load (working) Bodenbelastbarkeit (nutzbar)	200 kg/m ² (2,0 kN/m ²)
Obremenitev sten (veter) Wall load (wind) Wandbelastbarkeit (Wind)	50 kg/m ² (0,5 kN/m ²)

Slika 4: Standardne dovoljene obremenitve modularnih bivalnih enot (REM-reference).

2.2 Tipska zasnova modularne enote

Modulna širina fasadnih panelov je prilagojena dimenzijam nosilne jeklene konstrukcije, kar omogoča veliko prilagodljivost pri gradnji posamezne enote in premikanje fasadnih panelov na različne pozicije znotraj tlorisa posamezne modularne enote. Okna in vrata že v proizvodnem procesu vgradijo v fasadne panele, kar omogoča enostavno montažo in spreminjanje tlorisa posamezne enote v zelo kratkem času.

Bivalne modularne enote nudijo ugodno bivalno okolje, saj se za gradnjo uporabljajo le naravni in okolju prijazni materiali, ki jih je po končani življenjski dobi mogoče reciklirati. Pri snovanju modularnih enot sledimo visokim tehničnim standardom. Toplotno izolacijo prilagajamo potrebam okolja, v katerem se bivalna enota uporablja, zato temu ustrezno izberemo potrebno debelino toplotnih izolacij posameznih elementov bivalne enote (streha, fasada, pod, okna ...).

Vse tovarniško sestavljene bivalne enote imajo že vgrajeno električno instalacijo z notranjo razdelilno omarico, z zaščitnimi stikali in dvema zunanjsima priključkoma za povezovanje večjega števila enot v zloženke.

Tip kontejnerja Modular unit type Modulareinheitstyp	Dolžina enote Unit length Länge der Einheit	Širina enote Unit width Breite der Einheit	Višina enote Unit height Höhe der Einheit
10'	2.989 m	2.435 m 2.989 m	2.591 m (NV=2.326 m) 2.765 m (NV=2.500 m)
15'	4.550 m		
16'	4.880 m		
20'	6.055 m		
24'	7.325 m		
30'	9.125 m		

Slika 5: Standardne dimenzije modularnih bivalnih enot (REM-reference).

2.3 Obremenite objektov po EVROKODU SIST EN 1991-1-1

Evrokodi vsebujejo skupna pravila za vsakdanjo rabo pri projektiranju običajnih in inovativnih konstrukcij kot celote ali posameznih konstrukcijskih delov. Evrokodi ne vsebujejo posameznih določb za nenavadne oblike konstrukcij ali nenavadne projektne pogoje. V teh primerih je potrebno sodelovanje z izvedenci (SIST EN 1991 - 1 - 1). Za uporabo nosilnih elementov nenavadnih oblik, ki jih standard Evrokod ne pokriva, je potrebno na Evropskem tržišču pridobiti Evropsko tehnično soglasje "ETA". Tudi modularne enote so gradbeni proizvod, ki niso v nobeni harmonizirani tehnični specifikaciji v celoti pokrite, kot so evropski standard (Evrokodi). Za tovrstne gradbene proizvode je potrebno pridobiti izjavo o lastnostih pri certificiranem državnem organu (npr. ZAG), ki opravi potrebne teste, s katerimi se določi lastnosti posameznega gradbenega proizvoda. S tem proizvajalec pridobi CE oznako za gradbeni proizvod, s katerim garantira, da je proizvod proizveden skladno s predpisi (ETA).

Čeprav se je modularna mobilna enota v začetku uporabljala predvsem kot začasni premični objekt, delovni kontejner (Slika 1), se je zaradi svoje fleksibilne zasnove kasneje porodila tudi opcija zlaganja enot v več etažne objekte. Modularne enote se lahko tako zлага v več etažne objekte, poljubnih dimenzij in poljubnega namena uporabe, od pisarniškega, pa vse do bivalnega in komercialnega (trgovine, šole,...) namena uporabe. S tem se spremenijo tudi projektne pogoje in zahteve, katerim mora objekt kljubovati skozi predvideno življenjsko obdobje.

Vplive obtežb, ki delujejo na konstrukcijo, podaja standard Evrokod SIST EN 1991-1-1. V vsakem trenutku je potrebno zagotoviti, da je odpornost objekta (R_{ED}) večja ali enaka od kombinacije projektne vrednosti vplivov (E_{ED}), ki delujejo na objekt. Odpornost objekta se zagotovi s primerno zasnovo objekta in primerno izbiro materiala. Iz tega lahko, glede na projektne obremenitve, izračunamo nosilnost objekta.

$$E_{ED} \leq R_{ED} \quad (1)$$

Projektant mora v fazi projektiranja zagotoviti, da bo konstrukcija prenesla vse vplive med fazo gradnje in uporabe, ter da bo v svojem življenjskem obdobju služila svojemu namenu. Konstrukcija mora biti uporabna vse življenjsko obdobje, v primeru nezgodne obtežbe pa mora zagotoviti varno evakuacijo iz prostora. Zanesljivost konstrukcije projektant zagotovi s primerno izbiro zasnove, oblike konstrukcije in pravilnim izborom materiala. Ob tem mora upoštevati vsa pravila za projektiranje konstrukcije.

Evrokod SIST EN 1991-1-1 vsebuje navodila za projektiranje in vplive za projektiranje konstrukcij stavb. Vplivi izhajajo iz prostorske teže gradbenih materialov, lastne teže gradbenih materialov, koristne obtežbe in zunanjih vplivov (sneg, veter, temperatura).

2.4 Nosilna konstrukcija kontejnerja

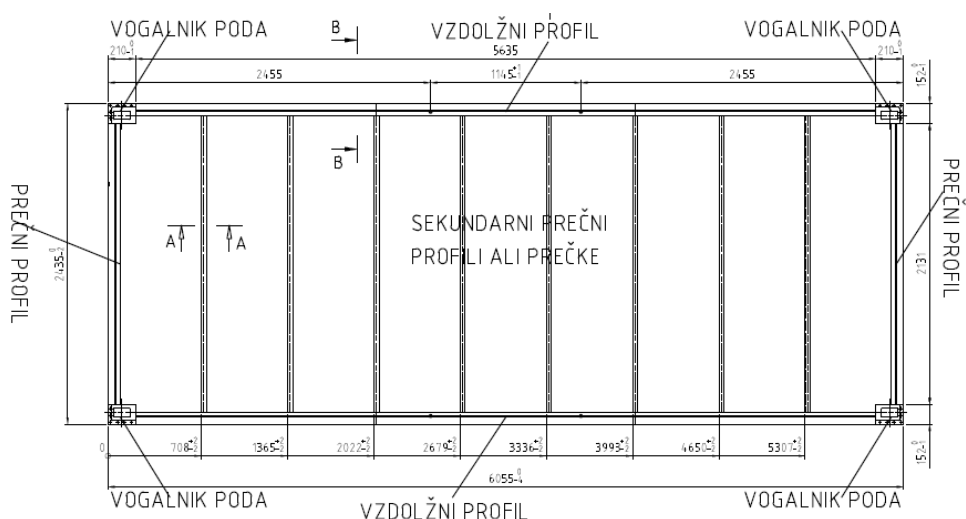
Pri zasnovi nosilne konstrukcije kontejnerja, se konstruktor poslužuje tipskih nosilnih elementov. Uporabljajo se tipski hladno valjani elementi, podni profili, stropni profili, stebri, vogalni elementi, ki se sestavijo v okvirno nosilno konstrukcijo, kot je prikazano na sliki 6. Ti elementi imajo nesimetrične prečne prereze, saj se nanje pritrujuje ostale elemente, zlasti fasadni paneli, ki pa ne opravljajo nosilno funkcijo konstrukcije. Narejeni so iz tankih pločevin, njihova dolžina pa je pogosto sorazmerno velika. Velikokrat je nosilnost standardnega elementa glede na statične zahteve premajhna, takrat je potrebno profile ojačiti z varjenjem dodatnih ojačitev v standardne elemente nosilne konstrukcije. Večina elementov je linijskih, kot so stebri, stropni in podni profili. Izračun notranjih statičnih količin je zato za statika enostaven, saj lahko uporabi standardne tipske enačbe za preračune. Težko se določi nosilnost spojev, saj je njegova zasnova kompleksna. S tem mislimo predvsem na vogalne elemente poda in stropa, kjer se stikajo profili, poleg tega se nanj vijači še steber. Vogalni element služi tudi povezovanju kontejnerjev med sabo s tipskimi spojnimi elementi. Notranje statične količine se lahko določijo tudi s pomočjo naprednih računalniških programov, ki temeljijo na metodi končnih elementov.



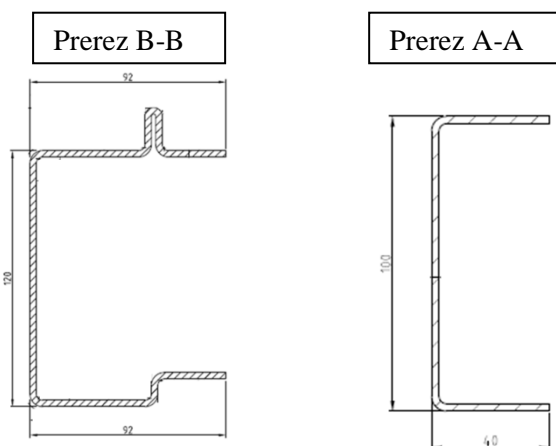
Slika 6: 3D model kontejnerja s stropom, podom in stebri.

2.4.1 Pod

Pod (Slika 7) je sestavljen iz hladno valjanih profilov in vogalnika, ki so med seboj varjeni. Elemente lahko v grobem razdelimo na primarne (vogalnik poda, vzdolžni in prečni profil) in sekundarne nosilne elemente poda (prečke) (Slika 8). Vogalnik je narejen iz jekla S235JR, enake kakovosti je tudi prečni profil poda. Ker je vzdolžni profil bistveno daljši kot prečni profil, je zaradi potrebe po večji nosilnosti narejen iz pločevine S355MC. Nanj so prečno privarjene prečke, ki so poploščene z nosilno oblogo. Ta hkrati deluje kot diafragma in preprečuje prečkam, da bi se bočno zvrnile. Za oblogo se uporablja iverna, vezana ali lesocementna plošča. Najpogosteje se uporablja iverna plošča, vezana plošča je primerna za pode, kjer se pričakuje večja obremenitev, lesocementna plošča pa je odporna na vlago in je primerna zlasti za sanitarne modularne enote. Med prečkami je položena izolacija, ki je standardno debela 100 mm in se spreminja glede na energetske zahteve objekta, s tem pa se spremeni tudi višina poda. Z višanjem profilov se povečuje njihova nosilnost, s tem pa se povečuje tudi nosilnost poda, vendar se pri nespremenjeni debelini profilov povečuje vitkost. Ta neugodno vpliva, zato je potrebno profile dodatno ojačati, zlasti pri večjih statičnih obremenitvah.



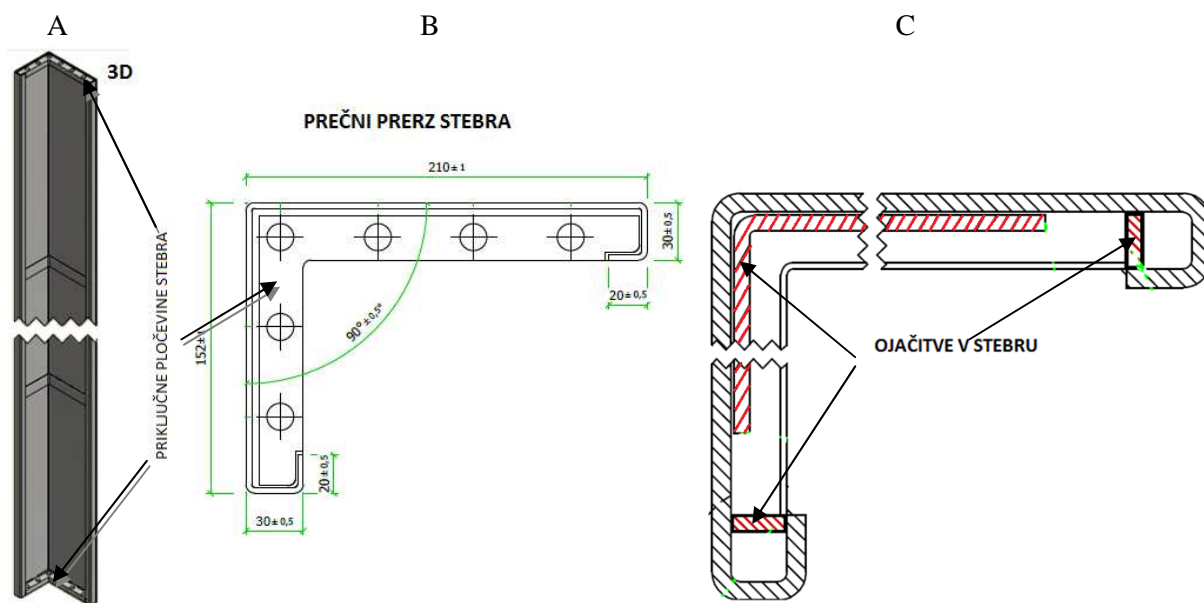
Slika 7: Tloris standardnega 20' kontejnerja, dolžine 6,055 m, širine 2,435 m in višine 120 mm.



Slika 8: Prečni prerez vzdolžnega in prečnega profila (prerez B-B) ter prečk (prerez A-A).

2.4.2 Steber

Stebri predstavljajo vezni element med stropom in podom. Ti so krivljeni iz pločevine, katerih najmanjša debelina znaša 3 mm, največja pa 6 mm. Večje debeline niso zaželeno, saj je potem potrebno na mestu prepogiba narediti večji radij, s tem pa se porušijo zunanje meje stebra, ki jih narekujejo drugi elementi modularne enote. Zaradi velike dolžine stebra, jih je pri večjih obremenitvah potrebno dodatno ojačati. Vanj se navarijo pločevine, ki stabilizirajo steber. Natezna trdnost pločevine se giblje od S235 do S355. Priključna pločevina, skozi katero se vijači steber, je vedno kvalitete S235, njena debelina pa znaša 18 mm. Zaradi debeline je izjemno toga v primerjavi s pločevinami stebra. Priključno pločevino je potrebno privariti na plašč stebra s polno nosilnim varom, saj moramo preprečiti porušitev stika med njima. Var je na zunanji strani stebra izveden s pobrušenim "v" zvarom, na notranji strani pa s prekinjenim kotnim "v" zvarom.



Slika 9: A- 3D pogled stebra; B- Prečni prerez standardnega stebra, kjer so označene lokacije vijakov; C- Steber z dodatnimi ojačitvami.

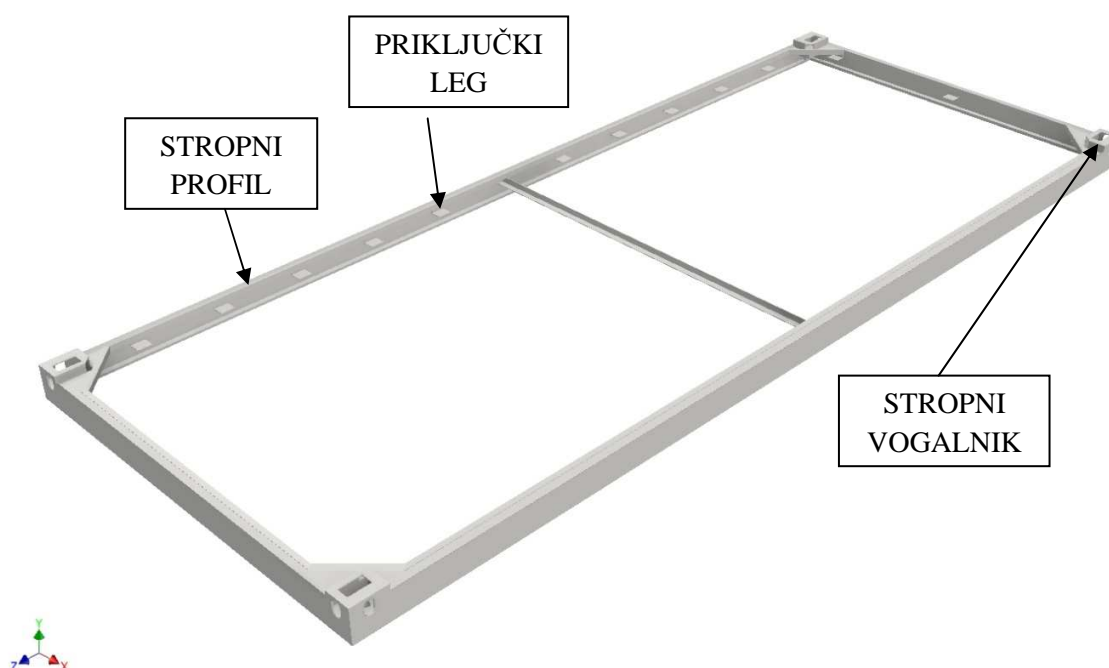
Stikovanje stebra je enostavno preko vijačne zveze (Slika 10), zato imajo stebri v ta namen navarjene priključne pločevine, skozi katere se nato vstavi vijak, ki se vijači v vogalnike stropov in podov. Uporabljajo se predvsem imbus vijaki DIN912 M12x40 kvalitete 8.8 in 10.9. Uporaba vijakov višjih trdnostnih razredov, kvalitete 12.10 se ne priporoča. Njihova uporaba je odsvetovana zaradi velike krhkosti, medtem ko so vijaki kvalitete 8.8 in 10.9 duktilni. Vijaki so vijačeni v vrezane navoje priključnih pločevin vogalnika, zato se ne potrebuje dodatne matice, ki bi tvorila spoj. Uporabljajo se razcepne podložke, ki preprečujejo vijakom, da bi se odvili pri transportu sestavljene modularne enote. Med transportom modularnih enot s kamionom se na konstrukcijo prenašajo določene vibracije iz vozila, ki lahko povzročijo odvitje vijakov.



Slika 10: A- Imbus vijak DIN 912 M12x40; B- Vijačni spoj stebra preko priključne pločevine na vogalnik poda.

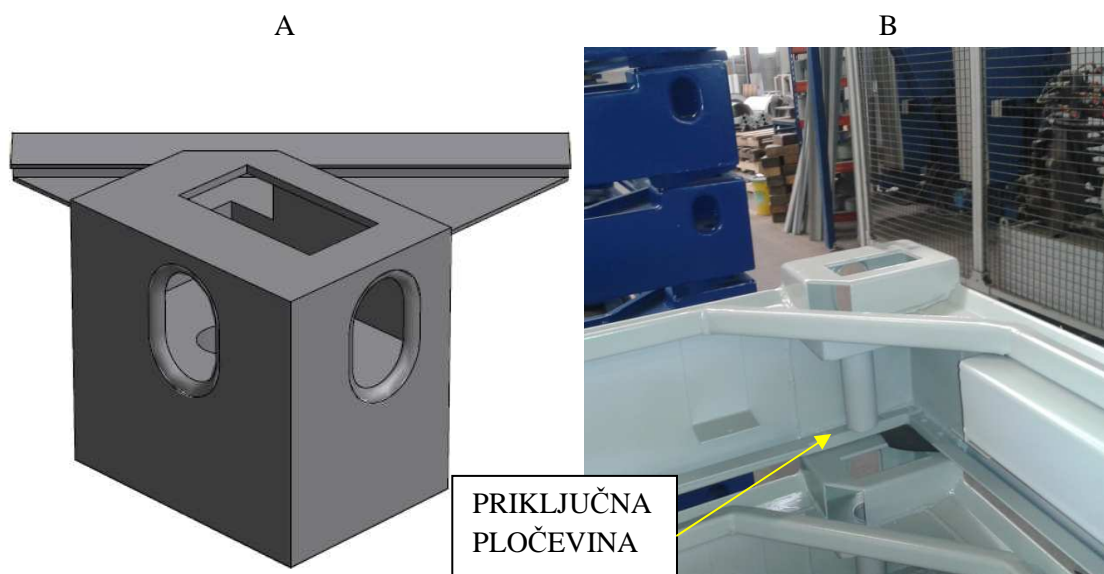
2.4.3 Strop

Strop kontejnerja je sestavljen iz jekla in lesa. Podobno kot pod, je tudi strop sestavljen iz primarne nosilne konstrukcije (stropnih profilov), ki so privarjeni na stropni vogalnik. Na stropni profil so navarjeni priključki leg za sekundarne nosilne elemente, na katere se nato privijačijo lesene stropne lege, ki so narejene iz lesa smreke ali bora, med katerimi je nato položena izolacija, ki narekuje višino stropa in višino leg. Medsebojni razmik med legami prilagajamo, glede na obremenitve stropa. Z večjo obremenitvijo stropa pa se poveča tudi višina stropa. Ta se zviša iz standardne višine 200 mm na 300 mm. Strop je na zunanji strani oblečen s pločevino, na notranji (bivalni) strani pa se lahko po njem namestijo različni tipi obloge iz pločevine, iverne plošče, sendvič plošče ali celo iz mavčnih plošč.



Slika 11: 3D model stropa v programu Autodesk Inventor.

Stropni profili, ki potekajo v vzdolžni strani so trdnostnega razreda S355, v prečni smeri pa so profili trdnostnega razreda S235. Manjši trdnostni razred prečk je zaradi manjše potrebe po nosilnosti v krajši smeri stropa. Debelina pločevine stropnega profila je 3 mm. Vogalni element je narejen iz varjenih pločevin, ki so trdnostnega razreda S235, debelina pločevin pa se spreminja glede na pozicijo pločevine v vogalniku. Robne pločevine so debeline 4 mm, medtem ko je priključna pločevina bistveno debelejša in znaša 18 mm. Vogalnik ima na stropu narejene ovalne luknje, ki so namenjene povezovanju modularnih enot s spojnimi elementi. Poleg tega so luknje namenjene transportu stropa v fazi izdelave in kasneje za manipuliranje sestavljenega kontejnerja na gradbišču med fazo montaže.



Slika 12: A- Model vogalnega stropnega elementa v programu Autodesk Inventor; B- Slika stropnega vogalnika privarjenega na stropne profile.

2.5 STATIČNI IZRAČUN 20'' MODULARNE BIVALNE ENOTE

Konstrukcija je zasnovana kot zaprti okvir, dimenzij \check{s} x d x v= 2,435 m x 6,055 m x 2,791 m, sestavljena iz poda, stebrov in stropa. Ponavadi, je modularna bivalna enota namenjena začasni uporabi, kljub temu pa mora biti v času uporabe podprta na šestih točkah, torej na treh točkah na obeh straneh poda. Pogosto so temelji narejeni iz armirano betonskih kock, ki se položijo na primerno utrjeno površino. Če je potreba po višji nosilnosti ali pa so tla preveč slaba, se naredijo pasovni temelji ali pa celo temeljna plošča.

2.5.1 Obtežba

Na konstrukcijo vplivajo različne obtežbe, ki jih moramo v fazi načrtovanja upoštevati, stalna, koristna ali spremenljiva obtežba, kot sta vpliv obtežbe vetra in snega. Pri standardnih bivalnih enotah s standardnimi profili so določene velikosti koristnih obtežb in obtežbe vetra (Slika 4), saj je bivalna enota namenjena začasni uporabi. Lastna in stalna teža je odvisna od teže materialov, ki so v kontejner vgrajeni. K stalni obtežbi prispevajo obloga poda in stropa, izolacija na podu in stropu in paneli, ki so vgrajeni na robu kontejnerja. Uporabljajo se predvsem sendvič paneli in leseni paneli lastne proizvodnje. Lastna teža se pri sodobnejših programih za statično analizo izračuna sama iz uporabljenih materialov in prečnih prereзов in se zato samodejno upošteva v računskih modelih.

2.5.1.1 STALNA OBTEŽBA:

Stalna obtežba poda: -PVC talna obloga (1,5 mm)	$g=0,03 \text{ kN/m}^2$
-iverna plošča (20 mm)	$g=0,09 \text{ kN/m}^2$
-izolacija (100 mm)	$g=0,02 \text{ kN/m}^2$
<u>-pločevina (0,5 mm)</u>	<u>$g=0,04 \text{ kN/m}^2$</u>
SKUPAJ:	$g=0,18 \text{ kN/m}^2$

Stalna obtežba stropa: -iverna plošča (10 mm)	$g=0,06 \text{ kN/m}^2$
-izolacija (100 mm)	$g=0,10 \text{ kN/m}^2$
<u>-pločevina (0,5 mm)</u>	<u>$g=0,04 \text{ kN/m}^2$</u>
SKUPAJ:	$g=0,20 \text{ kN/m}^2$

Obtežba fasadnega panela: <u>-fasadni panel FTV100 (h=2,5 m)</u>	<u>$g=0,55 \text{ kN/m}^2$</u>
SKUPAJ:	$g=0,55 \text{ kN/m}^2$

Preglednica 1: Tabela teže fasadnih sendvič panelov za kvadratni meter plošče (Trimo).

Tehnični podatki FTV STANDARD		FTV 50	FTV 60	FTV 80	FTV 100	FTV 120	FTV 133	FTV 150	FTV 172	FTV 200	FTV 240
Debelina panela [mm]		50	60	80	100	120	133	150	172	200	240
Masa FTV 1000 [kg/m ²]	Fe 0,6/Fe 0,6	16,3	17,5	19,9	22,3	24,7	26,3	28,3	31,1	34,3	39,1

2.5.1.2 SPREMENLJIVA OBTEŽBA:

Spremenljiva obtežba je, kot smo že omenili, določena s standardnimi obremenitvami (Slika 4), ki so še dopustne za normalno uporabo.

Koristna obtežba poda: $q=2,00 \text{ kN/m}^2$

Koristna obtežba stropa: $q=1,00 \text{ kN/m}^2$

Obtežba vetra: $q=0,50 \text{ kN/m}^2$

Vplive obtežb, ki delujejo na konstrukcijo, podaja standard Evrokod SIST EN 1991 - 1 - 1. V vsakem trenutku je potrebno zagotoviti, da je odpornost objekta (R_{ED}) večja ali enaka od kombinacije projektnih vrednosti vplivov (E_{ED}), ki delujejo na objekt. Odpornost objekta se zagotovi s primerno zasnovo objekta in primerno izbiro materiala. Iz tega lahko, glede na projektne obremenitve, izračunamo nosilnost objekta.

2.5.1.3 OBTEŽNE KOMBINACIJE:

Obtežne kombinacije so narejene v skladu s standardom Evrokod SIST EN 1990, ki predpisuje mejna stanja, ki jim mora konstrukcija zadostiti. Vedno mora veljati pogoj enačbe (1), ki pravi, da mora biti nosilnost konstrukcije večja kot je projektni vpliv za vsa projektna stanja.

MEJNO STANJE NOSILNOSTI:

Za kontrolo mejnih stanj nosilnosti se uporablja osnovna enačba (2) s kombinacijo vplivov:

$$\sum_{j \geq 1} y_{G,j} \cdot G_{k,j} + y_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} y_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (2)$$

Tako se za kontrolo mejnih stanj nosilnosti upošteva naslednje kombinacije obtežb:

- MSN1: $1,35 G + 1,5 Q + 1,5 \times 0,7 \times W_Y$
- MSN2: $1,35 G + 1,5 Q + 1,5 \times 0,7 \times W_X$
- MSN3: $1,35 G + 1,5 W_Y + 1,5 \times 0,7 \times Q$
- MSN4: $1,35 G + 1,5 W_X + 1,5 \times 0,7 \times Q$

G... stalna obtežba

Q... spremenljiva obtežba

W_X ...vpliv vetra v vzdolžni smeri konstrukcije

W_Y ...vpliv vetra v prečni smeri konstrukcije

y_G ...varnostni faktor za stalno obtežbo

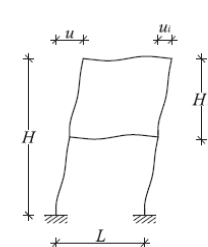

y_Q ...varnostni faktor za spremenljivo obtežbo

Merodajna je tista obtežna kombinacija, ki nam da največjo obremenitev, oziroma povzroči najbolj neugodno stanje. Pri tem ne sme priti nikjer v nosilni konstrukciji do izgube nosilnosti zaradi prekoračitve napetosti ali problema stabilnosti elementov. Stabilnost elementov je potrebno kontrolirati na lokalnem in globalnem nivoju konstrukcije.

2.5.1.4 MEJNO STANJE UPORABNOSTI:

Poleg varnosti konstrukcije mora biti konstrukcija tudi uporabna, zato je potrebno kontrolirati pomike. Največji dovoljen pomik je predpisan glede na namen uporabe konstrukcije. Dovoljeni vertikalni pomiki so določeni v spodnji tabeli (Slika 13). Poleg kontrole največjih vertikalnih pomikov je potrebno kontrolirati tudi horizontalne pomike, ki morajo biti v meji dovoljenih glede na tip stavbe. Za kontrolo mejnih stanj uporabnosti, se v skladu s SIST EN 1990 in nacionalnem dodatku k SIST EN 1090, uporabi karakteristična obtežna kombinacija, ki je določena po spodnji enačbi (3).

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \Psi_1 \cdot Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (3)$$

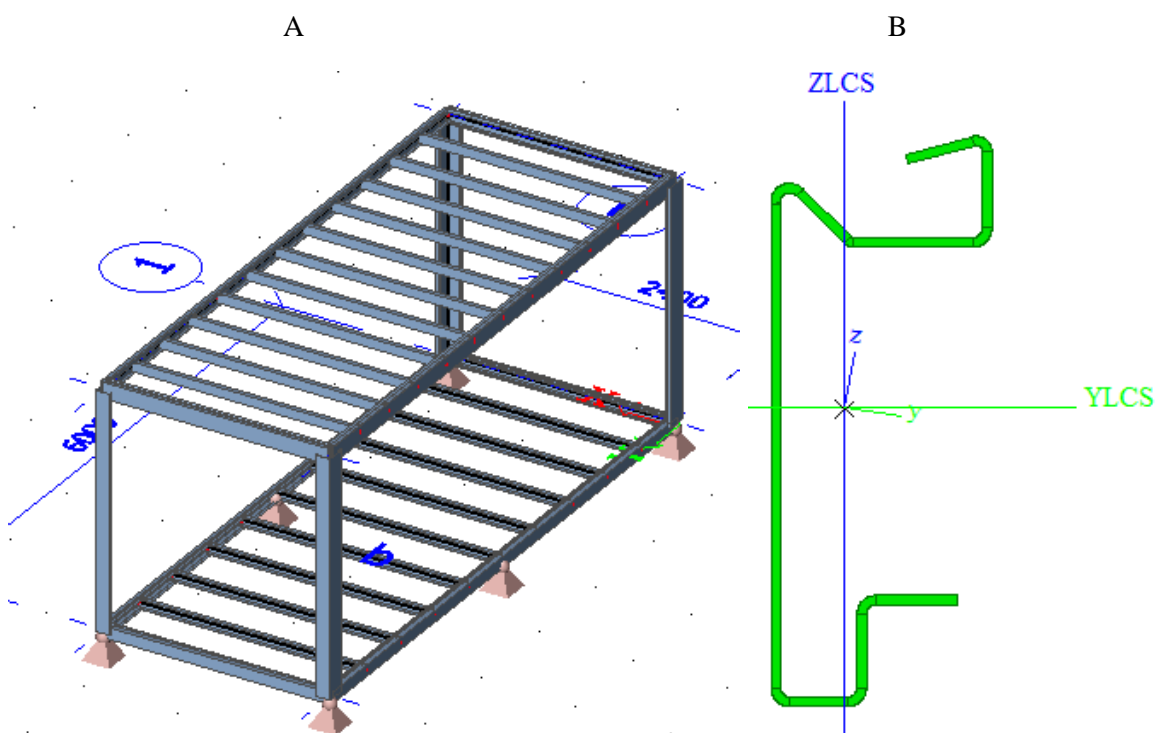
A			B		
Del konstrukcije	Mejne vrednosti pri karakteristični kombinaciji vplivov		Vrsta stavbe	Mejne vrednosti pri karakteristični kombinaciji vplivov	
	w_{max}	$w_2 + w_3$		u_i	u
strehe nasploh	$L/200^*$	$L/250$	priljučne industrijske stavbe brez žerjavnih prog	$H_i/150$	-
pohodne strehe (ne le pri vzdrževanju)	$L/250$	$L/300$	priljučne stavbe	$H_i/300$	-
stropovi nasploh	$L/250$	$L/300$	večnadstropne stavbe	$H_i/300$	$H/500$
strehe in stropovi, ki nosijo krhke obloge (npr. mavec), in zelo toge predelne stene	$L/300$	$L/350$	Pomen simbolov:		
stropovi, ki podpirajo stebre, razen v primerih, če so ti upogibki izračunani pri celoviti analizi konstrukcije	$L/400$	$L/500$			
*v primeru, da je w_{max} pomemben za videz konstrukcije	$L/250$	-			
L razpon med podporami ali dvojna dolžina konzole					
Pomen simbolov:					
					
w_2	nadvišanje neobremenjenega konstrukcijskega elementa		u	celotni vodoravni pomik konstrukcije višine H	
w_2	začetni del upogibka zaradi stalnih vplivov v ustrezni kombinaciji skladno z enačbami (6.14a) do (6.16b)		u_i	vodoravni pomik etaže višine H_i	
w_2	del upogibka zaradi dolgotrajnega delovanja stalne obtežbe				
w_3	dodatni del upogibka zaradi spremenljivih vplivov v ustrezni kombinaciji skladno z enačbami (6.14a) do (6.16b)				
w_{tot}	celoten upogibek kot vsota w_2, w_2 in w_3				
w_{max}	končni upogibek z upoštevanjem nadvišanja				

Slika 13: A-Tabela največjih dovoljenih navpičnih pomikov konstrukcije (Beg); B- Tabela največjih dovoljenih horizontalnih pomikov (Beg).

Z vertikalnimi pomiki pa so povezane tudi vibracije, ki nastajajo pri povesu konstrukcije pri pogosti obtežni kombinaciji. Pomik, ki nastane pri dani kombinaciji, ne sme biti večji od dovoljenega. S tem se kontrolirajo lastne frekvence konstrukcijskih elementov, da v konstrukciji ne nastanejo dinamični učinki, ki so za uporabnike objekta nezaželeni.

2.6 3D model

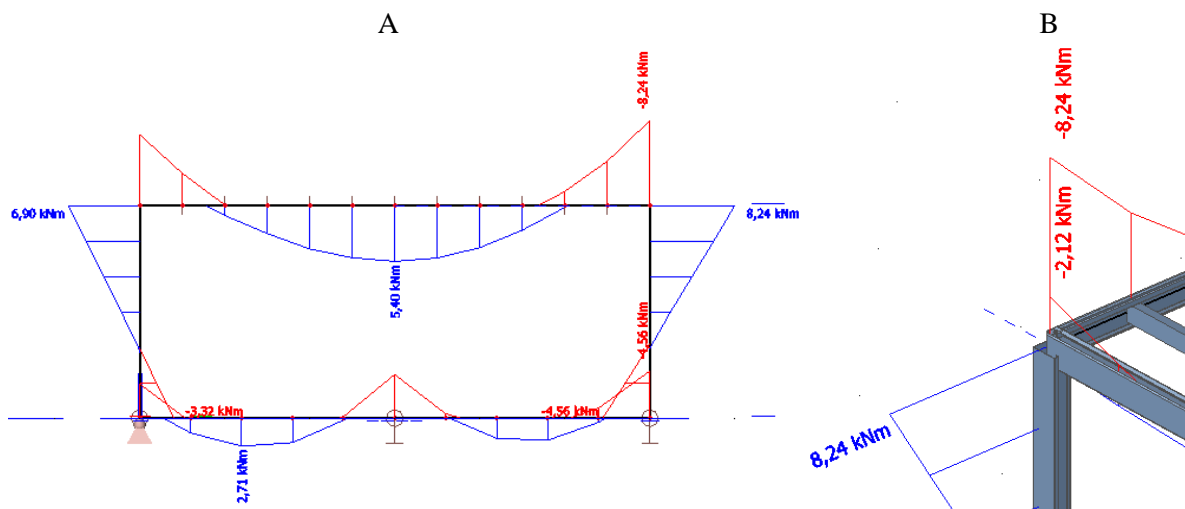
Vsako modularno enoto je potrebno vsaj trikrat podpreti na vzdolžni strani. Če je obtežba poda večja, jo je potrebno večkrat podpreti. V modelu je to prikazano s točkovnimi, členkastimi podporami. Kot vidimo na sliki 14, je nosilni sistem modularne bivalne enote sestavljen iz momentnih okvirjev, ki se stikajo v vogalnikih podov in stropov. V grobem lahko notranje statične količine elementov izračunamo s pomočjo programov, ki omogočajo statični izračun linijskih elementov. Eden takšnih je tudi program Scia Engineer 15, ki omogoča izračun notranjih statičnih količin elementov poljubnih oblik. Ob predpostavki, da so vogalni nosilni elementi togi in da prenesejo pripadajoče momentne obremenitve, lahko pri določeni obtežni kombinaciji, določimo notranje statične količine konstrukcije. Zaradi kompleksne geometrije, je za analizo vogalnika najbolj primerna "FEM" (Finite element method) analiza, ki nam omogoča simulacijo zahtevnejših gradbenih elementov, spojev in podobnih elementov. Te z linijskim modelom in že izpeljanimi statičnimi enačbami ne moremo analizirati. Nosilnost vogalnega elementa zato analiziramo ločeno.



Slika 14: A- 3D model kontejnerja v programu Scia; B- Položaj težišča, ki ga program Scia Engineer izračuna.

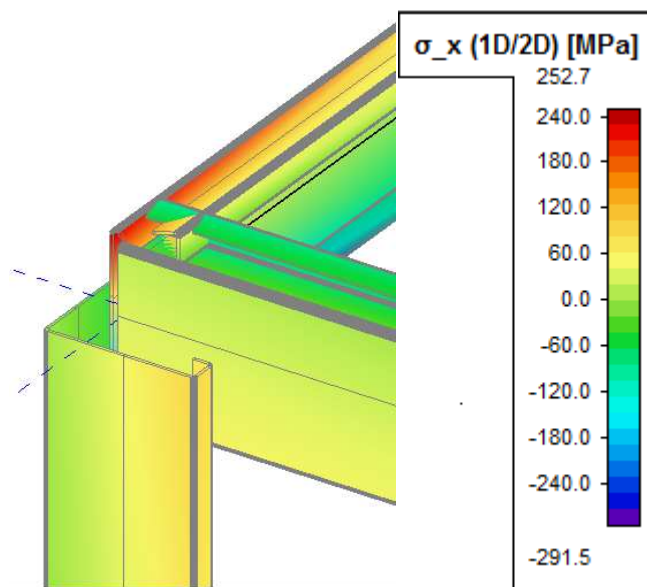
2.7 Rezultati analize

Okvirno obnašanje konstrukcije je razvidno tudi iz poteka momentne linije (Slika 15) po elementih konstrukcije kontejnerja v vzdolžni smeri. Tudi v krajši smeri se konstrukcija obnaša kot momentni okvir, zaradi česar je vogalni element v podu in stropu obremenjen z dvoosnim upogibom, na spodnji strani pa se nanj priključuje še steber. Sklepamo lahko torej, da so vogalni elementi najbolj obremenjeni deli konstrukcije.



Slika 15: A- Potek momente linije v vzdolžni smeri modularne enote glede za ovojnico MSN vplivov; B- Prikaz večosne upogibne momentne obremenitve stropnega vogalnika

Da so v vogalu največje obremenitve, lahko sklepamo že iz poteka normalnih napetosti po prerezu. Na sliki 16 se lepo vidi, da se največje napetosti pojavijo v stičišču elementov, če smo bolj natančni v vzdolžni prečki stropnega profila. To je tudi pričakovano, saj profil premešča veliko razdaljo. Večja kot je razdalja, večji je moment na koncu elementa, ki povzroči v prečnem prerezu velike normalne napetosti. Večji kot je moment, večja pa je tudi prečna sila, ki povečuje napetosti v prečnem prerezu.



Slika 16: Potek normalnih napetosti po konstrukcijskih elementih kontejnerja.

2.8 Spoji jeklenih konstrukcij

Projektiranje nosilnosti spojev v jeklenih konstrukcijah je izjemno zahtevno. Zaradi kompleksnosti spojev se pri klasičnih spojih v jeklenih konstrukcijah poslužujemo poenostavitve, zato navadno dimenzioniramo vsako komponento spoja posebej. Sestavljajo ga zvari, vijaki in pločevine, ki so združeni v celoto ter s svojimi mehanskimi in geometrijskimi lastnostmi prispevajo k togosti in nosilnosti spoja.

Pri dimenzioniranju spojev se moramo tako držati osnovnih pravil dimenzioniranja, da bo projektna nosilnost spojev realna:

- predpostavljeni razpored notranjih sil v spoju mora biti v ravnotežju z delujočimi zunanji obremenitvami (sile, momenti),
- vsak element v spoju mora biti sposoben prevzeti obremenitev, ki odpade nanj,
- deformacije v spoju ne smejo presežati deformacijske kapacitete (duktilnosti) posameznih elementov spoja (zvar, vijak, pločevin),
- razpored sil v spoju se na posamezen element spoja deli v razmerju togosti (Beg).

Spoji v jeklenih konstrukcijah se glede na mehanske lastnosti delijo po:

- togosti,
- nosilnosti,
- duktilnosti (rotacijska kapaciteta).

Togost je definirana glede na medsebojni zasuk osi stebra in elementa, ki ga priključujemo nanj, prečke ali nosilca. Togi spoji so ponavadi sposobni prenesti velike momentne obremenitve, medsebojni zasuk elementov pa je zelo majhen, skoraj pravokoten. Začetni kot med osjo nosilca in stebra se pri obremenitvi praktično ne spremeni.

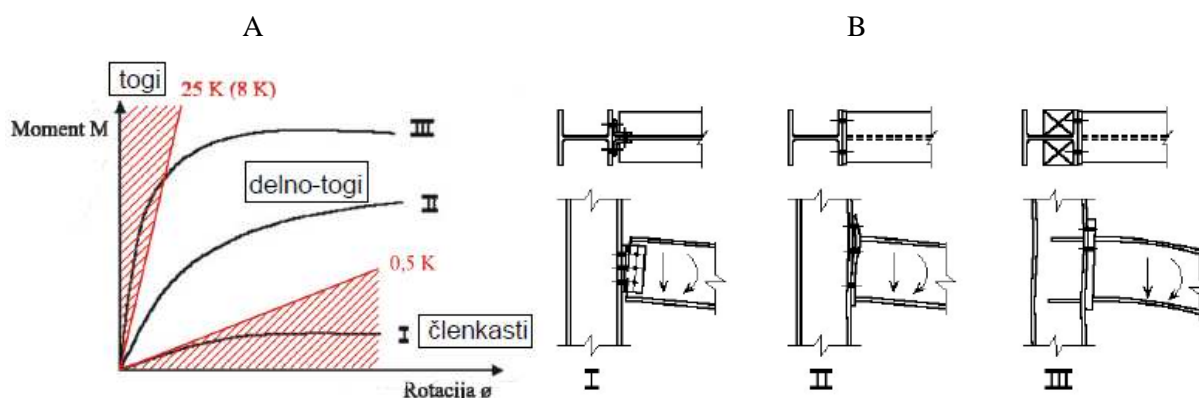
Na togost spojev vpliva več komponent. Veliko togost dosežemo z debelimi čelnimi pločevinami prečk in ojačevanjem v območju spoja s prečnimi ojačitvami in strižno pločevino. Pri prekoračitvi nosilnosti konstrukcije, se deformirajo ostali elementi nosilne konstrukcije, navadno nosilci ali prečke, elementi spoja morajo biti v elastičnem območju in se ne smejo plastificirati. Takim spojem rečemo tudi momentni ali polnonosilni spoji.

Pri delno togih spojih se kot med prečko in stebrom po obremenitvi spremeni. Če je obremenitev manjša, kot je njegova nosilnost, se po razbremenitvi konstrukcija vrne v prvotno stanje pred obremenitvijo, če pa je večja, se elementi spoja plastificirajo. Konstrukcija se po razbremenitvi ne povrne v prvotno lego. Spoji so delno odporni na momentno obremenitev, vendar je ta bistveno manjša kot pri togih spojih. Razlog je v manjšem številu ojačitvenih reber in prečnih ojačitev v stojini stebra in tanjši priključni pločevini.

Členkasti spoji so zasnovani na tak način, da se v njih ne more razviti upogibni moment. Zasnovan mora biti tako, da omogoči predvideno rotacijo v spoju. Narejen je tako, da na steber priključujemo le stojno. Dovoliti moramo dovolj velik zasuk prečke, ki ga zagotovimo z ovalizacijo lukenj okoli vijakov. Spoj mora prenesti le dovolj veliko prečno obremenitev spoja, ki pri tem nastane, in morebitne osne sile. Preko členkastih spojev se na primarne nosilne elemente prenaša obtežba iz sekundarnih nosilnih elementov.

Slika 17A prikazuje graf, na katerem je predstavljena delitev spojev glede na togost. Pri tem je "K", togost priključevane prečke na steber. "K" je odvisen od elastičnega modula "E", vztrajnostnega momenta "I" in dolžine prečke "L". "K" izračunamo z enačbo (4).

$$E = \frac{E \cdot L}{I} \quad (4)$$

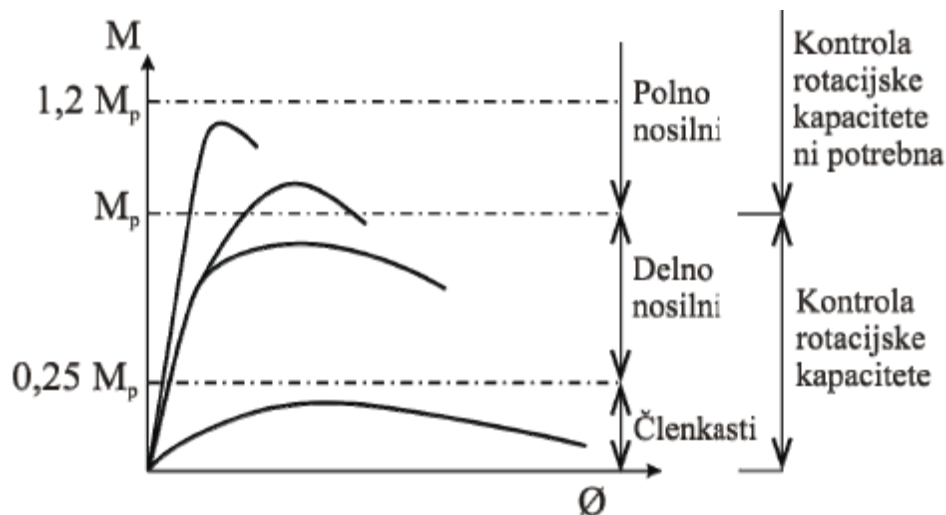


Slika 17: A- Delitev togosti glede na rotacijsko kapaciteto (Beg); B- Trije različni načini izvedbe spojev glede zagotavljanja togosti (Členkasti spoji-I, Delno togi spoji-II in Togi spoji- III) (Beg).

Nosilnost je definirana glede na obremenitev, ki jo je spoj sposoben prenesti, ne da bi se pri tem porušili ali odpovedali nosilni element spoja. Polno nosilni spoji morajo biti zasnovani tako, da je njihova odpornost večja od nosilnosti priključenega elementa (prečke, stebra). Nosilnost delno nosilnih spojev je manjša, kot je nosilnost elementov, ki jih s spojem spajamo. Uporablja se takrat, ko so obremenitve konstrukcije manjše, kot je nosilnost priključenih elementov.

Členkasti spoji so v praksi redko narejeni tako, da se v spoju ne bo razvil moment. Spoji so narejeni tako, da se na primarno konstrukcijo priključujejo preko priključne pločevine v stojini, v kateri se razvije členek. Taki spoji imajo zelo majhno momentno nosilnost, zato v statičnem preračunu zaradi lažjega izračuna notranjih sil, predpostavimo členek. Čisti členki so izvedeni s pomočjo čepov. Ostali spoji, ki jih ne moremo razvrstiti v polno nosilne ali členkaste, uvrstimo med delno nosilne. Pri teh spojih je nosilnost prečke večja, kot je nosilnost spoja in zato pride pri obremenitvi do plastifikacije v spoju in ne v prečki. Taki spoji morajo imeti zagotovljeno dovolj veliko duktilnost, oziroma rotacijsko kapaciteto, če je ta potrebna, zlasti pri cikličnem obremenjevanju konstrukcije, kot je pri potresni

obtežbi. Nosilnost mora biti ustrezna, hkrati pa je potrebno kontrolirati rotacijo v spoju, ki se določa eksperimentalno. Delno nosilne spoje se uporablja v konstrukcijah, kjer ne potrebujemo velike momentne nosilnosti spoja.



Slika 18: Delitev spojev glede na nosilnost (Beg).

Duktilnost oz. rotacijska kapaciteta je sposobnost spoja prenašanja velikih deformacij, oziroma zasukov elementov, preden bi se spoj porušil. Pri polno nosilnih spojih duktilnost v spoju ni potrebna, saj se pričakuje, da se bo plastificiral element, ki ga priključujemo nanj. Pri delno nosilnih in členkastih spojih pa moramo zagotavljati njihovo duktilnost z deformiranjem priključnih pločevin. Zvari in vijaki morajo biti v obeh primerih polno nosilni in se nikoli ne smejo porušiti oziroma pretrgati.



Slika 19: Rotacijska kapaciteta spoja (Beg).

3 EKSPERIMENTALNE RAZISKAVE OBNAŠANJA STROPNEGA PROFILA

3.1 Uvod in opis modela

Testiranje vzorca stropnega vogalnika modularne enote v začetku novembra 2015 na Zavodu za gradbeništvo Slovenije je bilo narejeno z namenom določiti realno obnašanje vzorca in pridobiti informacije o mejni nosilnosti elementa. Želelo se je preveriti dejansko nosilnost vijačnega spoja in upogibno obnašanje stropnega vogalnika pri upogibni obremenitvi. Testni vzorci so imeli spoj stropnega vogalnika in stebra narejen s pomočjo vijakov in ploščic, navarjenih na zunanji strani vogalnika. Vzorec smo obremenjevali na dveh mestih. Na njih se je nanašala vertikalna osna sila na vrhu vogalnika in na koncu prečke. S silo na koncu stropnega profila smo simulirali upogibni moment v stropnem vogalniku in hkrati prečno silo, ki pri tem nastane. Pri vseh treh eksperimentih se je sila na vzorce nanašala na enak način. Med eksperimenti so se merile deformacije elementov na določenih mestih s pomočjo uporovnih lističev, merila se je tudi vertikalna sila V_z na koncu stropnega profila in pomik, ki pri tem nastane. Sila na vrhu vogalnika pa je bila skozi celotni eksperiment konstantna. S pomočjo 3D kamere so se merili pomiki točk vogalnega elementa. Zaradi tega so bili vogalniki premazani z belo barvo, na kateri je bila nato nabrizgana črna barva.

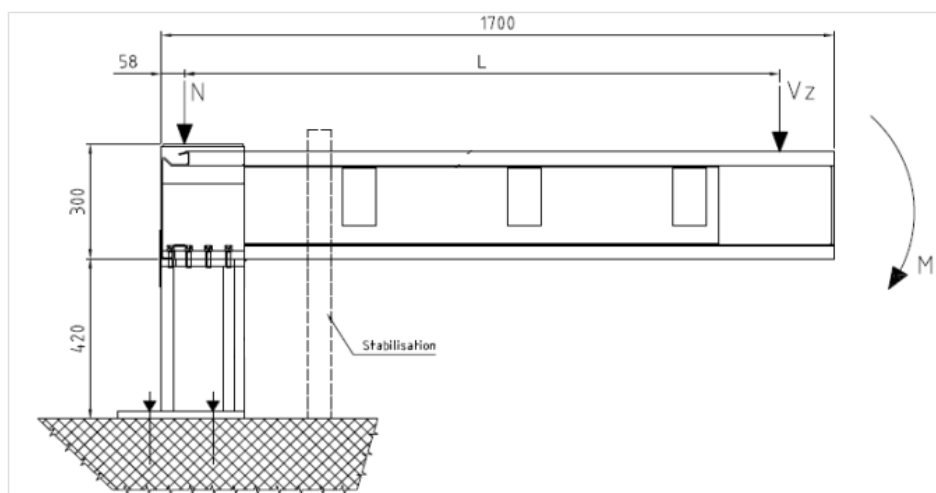


Slika 20: Testni vzorci pripravljeni na testiranje.

3.2 Opis testnih vzorcev in potek testa

Testni vzorci so imeli spoje narejene z vijaki M12x40 12.9 DIN-912 in vzmetnimi podložkami A12 DIN-127. Vijaki so vijačeni v luknje, priključne pločevine debeline 20 mm (S235JR), v katerih so vrezani navoji. Spoj povezuje steber s stropnim vogalnikom, na zunanji strani pa so bili zaradi večje nosilnosti navarjene ojačitvene ploščice s kotnim varom $a=3$ mm po zunanjem obodu. Ploščice (S355JR) so bile velike 100 x 150 mm in debeline 4 mm.

Stropni profil je narejen iz hladno oblikovane 3 mm debele pločevine, materiala kvalitete S355MC. Profil je ojačan z dodatno ojačitvijo debeline 4 mm (S355JR), ki je s prekinjenim kotnim varom privarjena na stropni profil. Ojačitev ima obliko "U" profila in je v stropni profil vstavljena z notranje strani. Stropni profil in ojačitev sta nato privarjena na stropni vogalnik s čelne strani. Ta je narejen iz zvarjenih pločevin, ki so varjene med sabo, debeline 3 do 6 mm. Pločevine debeline 6 mm so na zunanji strani, zaradi prenosa obremenitev, medtem ko so pločevine debeline 3 mm na notranji strani in so bolj konstrukcijske narave. Steber je narejen iz pločevine S355MC, v profil stebra pa je dodatno uvarjena ojačitvena pločevina debeline 5 mm (S355JR). Na koncu stebra je navarjena priključna pločevina (S235JR), debeline 20 mm, skozi katero se nato vijak privijači v priključno pločevino stopnega vogalnika. S spodnje strani je privarjena pločevina debeline 20 mm, ki ima izvrtane luknje za togo vpetje testnega elementa na preizkuševalno napravo (Slika 21).



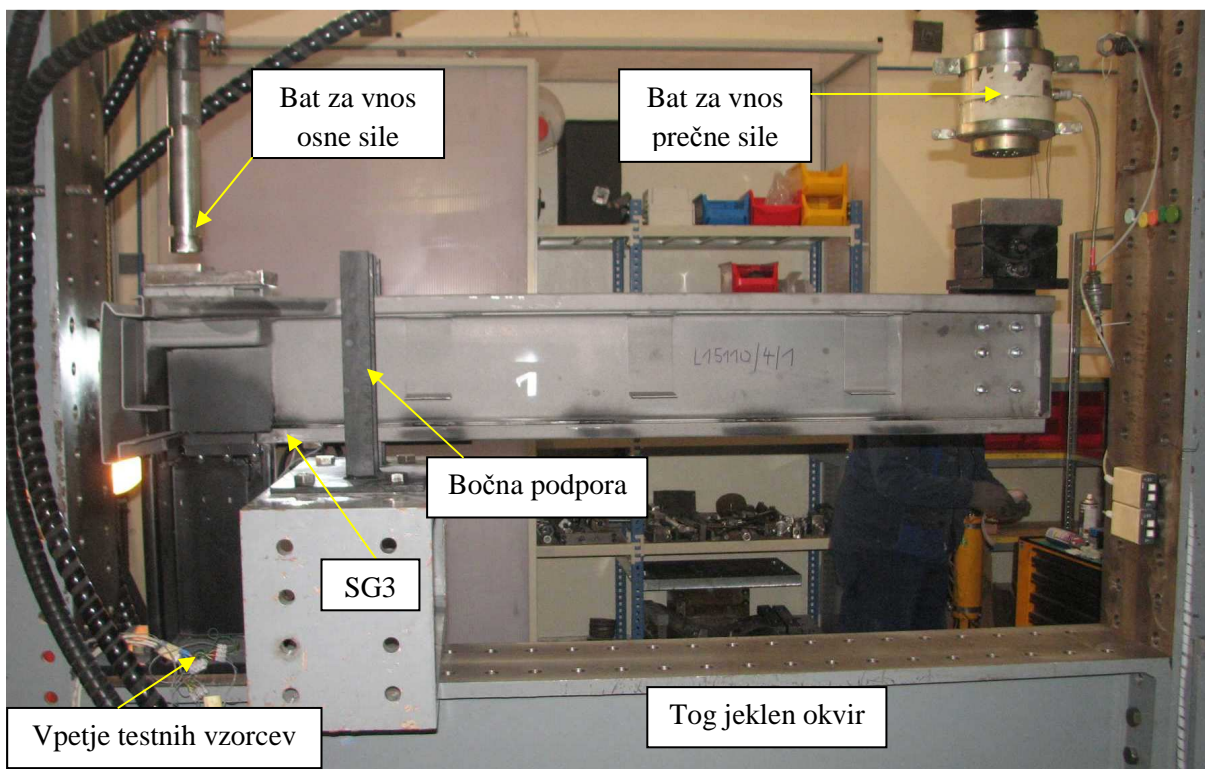
Slika 21: Shematična zasnova testa.

Slika 21 prikazuje zasnovo poteka testa, njegove dimenzije (enote so v mm) in način obremenjevanja testnega elementa. Vertikalna osna sila "N" se med potekom testa ni spremenila in je znašala 28 kN. Na koncu stropnega profila se je preko bata vsiljevala prečna sila "V_z" na razdalji 1,55 m od lokacije vnosa osne sile "N" v stropni vogalnik. Hitrost nanašanja sile je znašal 5 kN/min. Dva izmed testov sta potekala tako, da se je prečna obtežba nanašala ciklično. V prvem ciklu se je testni element obremenil s silo do intenzitete 12 kN, v naslednjih štirih do 14 kN, 16 kN, 18 kN in 20 kN, v zadnji fazi pa smo konstrukcijo obremenjevali vse do porušitve. To se je zgodilo takrat, ko konstrukcija kljub

povečevanju sile ni nudila nikakršnega odpora več. V tej fazi se je spremenil tudi način obremenjevanja konstrukcije. Na vzorec nismo več nanašali silo, ampak smo začeli vsiljevati pomik, zaradi same kontrole poteka testa. Med vsako fazo obremenjevanja smo konstrukcijo razbremenili do 1 kN. Vzorec je bil nekaj centimetrov stran od stebra bočno podprt na zunanji in notranji strani stropnega profila. Podpora je preprečevala morebitno zavrnitev testne konstrukcije, zaradi česar ne bi dobili zelenega rezultata.

3.3 Opis testne opreme in lokacija merilnih inštrumentov

Testni vzorci so bili preko privarjene, 20 mm debele pločevine, vpeti v tog jeklen ovir s pomočjo štirih vijakov. Tako smo zagotovili togo vpetje vzorca na testni okvir (Slika 22). Obtežba se je nanašala na testne vzorce preko dveh vodenih batov INOVA 63 kN in Schenck 160 kN, ki sta bila kontrolirana s pomočjo programske opreme INOVA CU2000. Pri nanašanju obtežbe s pomočjo hidravličnih batov se je merila obtežba z merilnikom sil SENSY 75 kN na stebru, velikost prečne sile in pomik na strani stropnega profila, pa se je meril z merilnikom, ki je vgrajen v hidravlični bat Schenck 160kN. Na mestu nanosa sile je bila narejena členkasta podpora, na katero je nalegal hidravlični bat in s tem preprečevala možnost razvoja dodatnih momentov. Podpora je predstavljala členek na koncu nosilca. Bočno podporo nosilcu je zagotavljala viličasta podpora, ki je cca 15 cm oddaljena od stebra.



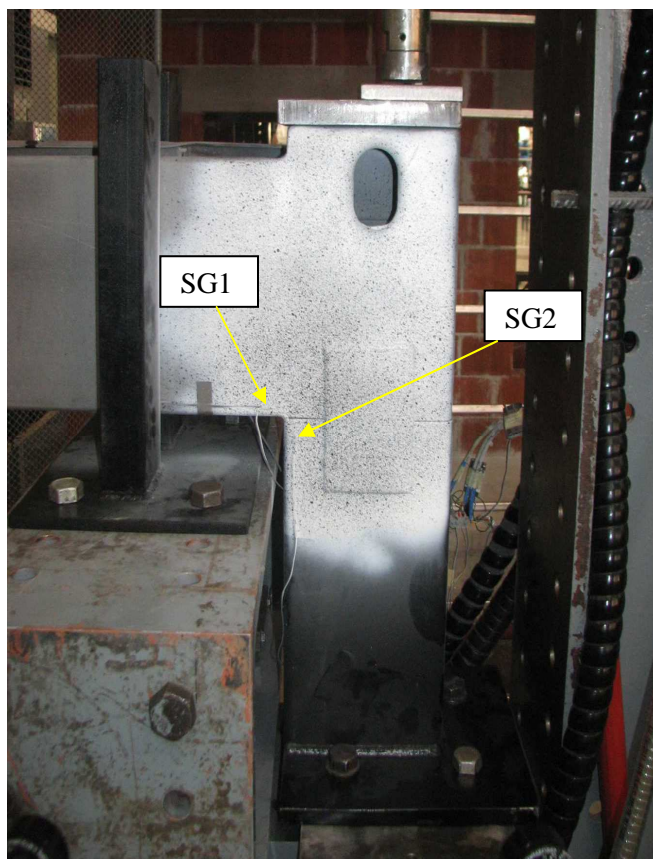
Slika 22: Testni vzorec, vpet v preizkuševalno napravo, s pozicijami testne opreme in lokacijo merilnega lističa SG3.

Lokalne deformacije so se merile na izbranih mestih s pomočjo merilnih lističev TML Tokyo Sokki Kenkyujo tipa FLA-2-11-1L (120 Ω , SG factor 2.14). Merilni lističi so bili povezani preko mostička

zaradi kompenzacije temperaturnega vpliva. Izmerjene vrednosti so bile merjene z univerzalnim ojačevalcem Hottinger Baldwin Messtechnik tipa MGCPlus, modela ML801B in AP 810i, ki sta bila priklopljena na računalnik z GPIB povezavo. Za obdelavo in zajemanje podatkov se je uporabljala programska oprema HBM Catman Easy AP ver. 3.3.5. Merilni lističi so bili nameščeni na notranji in zunanji strani stropnega profila ob stičišču s stebrom in na zunanji strani stebra ob stičišču s stebrom (Slika 23). Merile so se tudi 3D deformacije na vzdolžni strani stropnega vogalnika s pomočjo optične merilne naprave ARAMIS 5M GOM GmbH.



Slika 23: Lokacija merilnih lističev na testnih vzorcih SG1 in SG2 na zunanji strani in SG3, ki je na notranji strani vzorca.



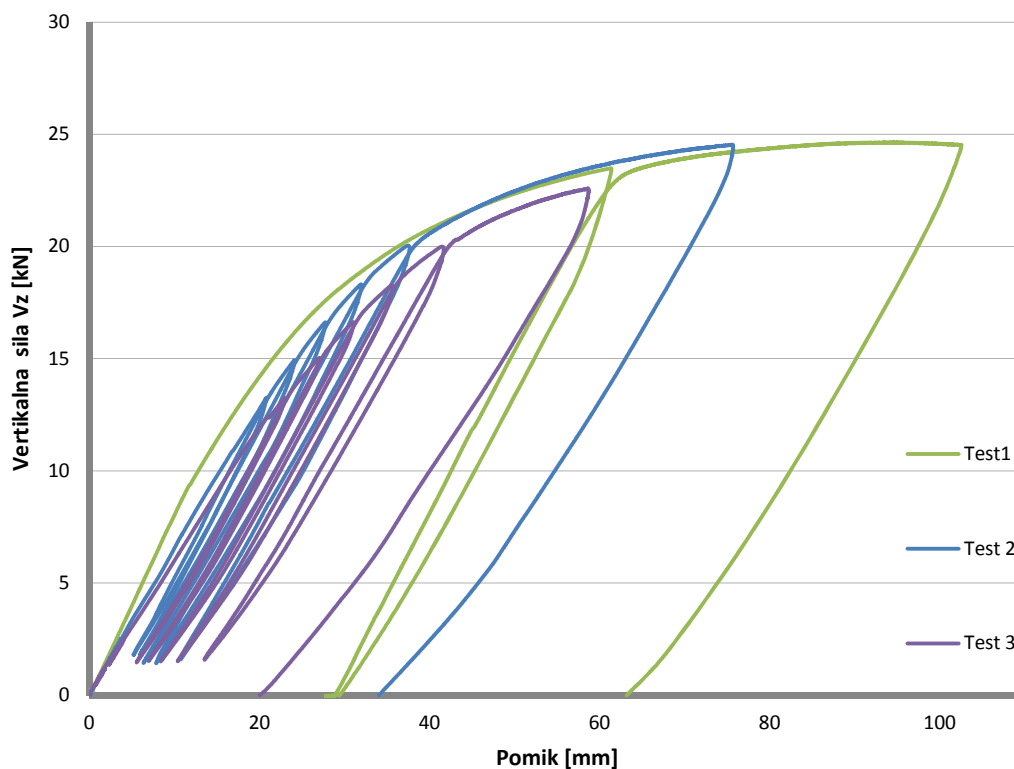
Slika 24: Območje merjena s pomočjo optične merilne naprave in lokacija merilnih lističev v spodnjem vogalu stropnega profila.

3.4 Rezultati testa

Vsi testi so bili izvedeni s konstantno vertikalno obremenitvijo stebra $N=28.5 \text{ kN} \pm 0.5 \text{ kN}$, velikost obremenitve se med testom ni spreminjala. Prvi vzorec se je obremenjeval v dveh korakih do porušitve vzorca, naslednja dva pa sta bila obremenjevana po predpisanem protokolu obremenjevanja. V prvem koraku se je testni element s prečno silo obremenil do intenzitete 12 kN, v naslednjih štirih do 14 kN, 16 kN, 18 kN in 20 kN, v zadnji fazi pa smo konstrukcijo obremenjevali vse do porušitve. Med potekom testa smo merili podatke o velikosti prečne sile in vertikalni pomik v tej točki. Rezultati so prikazani na grafikonu 1, ki prikazuje odziv testnega elementa na vertikalno obremenitev vzorca s silo "V_z" in velikost vertikalnega pomika, ki pri tem nastane. Vidi se tudi, kdaj pri testu pride do plastifikacije elementov, saj pri razbremenitvi ostane določen del pomika. Konstrukcija se pri razbremenitvi ne vrne v začetno stanje. Lepo se tudi vidi, da je prirastek plastičnega dela deformacije pri večji obtežbi, večji. Iz spremembe naklona premic, oziroma krivulj vidimo, da se togost vzorca zmanjšuje zaradi plastifikacije. Iz naklona krivulje se tudi lepo vidi, kdaj je dosežena mejna nosilnost testnega vzorca. Ta je dosežena takrat, ko se krivulja nagne v vodoravni položaj.

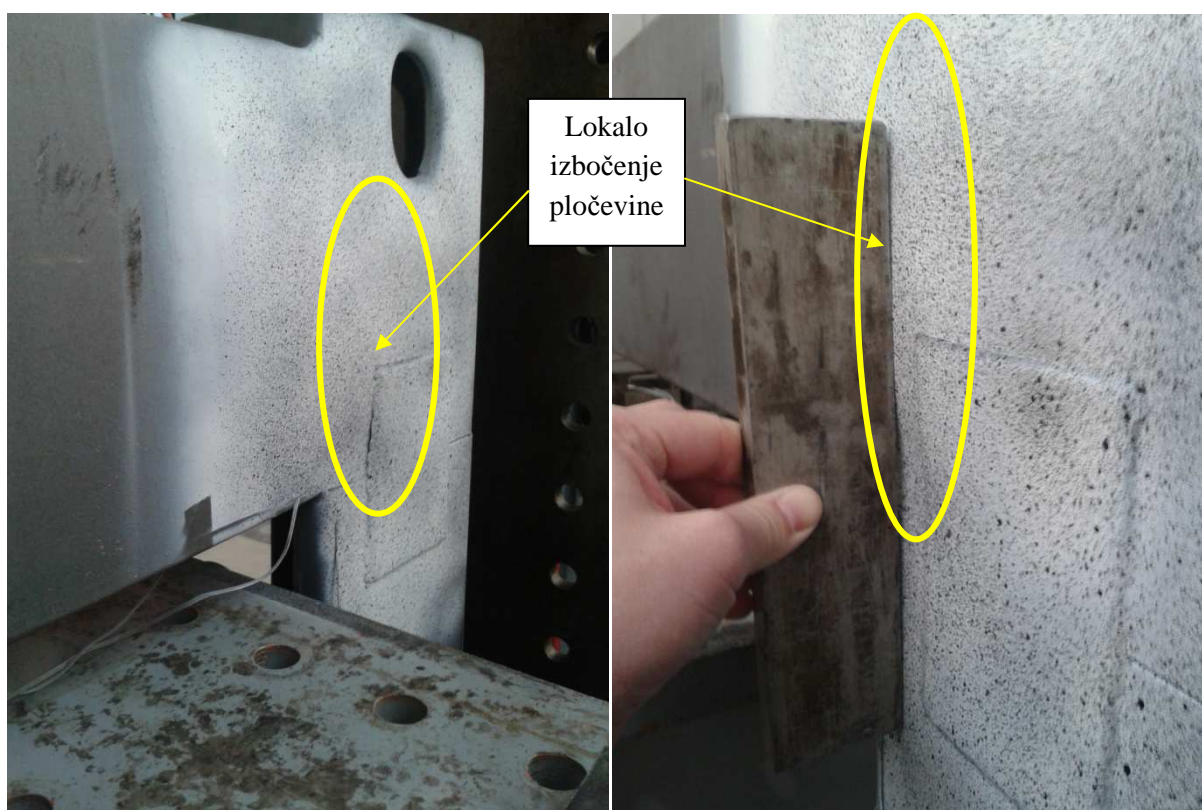
Grafikon 1: Rezultati treh testnih vzorcev na ZAG-u. Na vertikalni osi grafa je prikazana velikost vertikalne sile na koncu stropnega profila, na horizontalni osi pa pomik v dani točki.

Rezultati testov vogalnega elementa na ZAG-u



Največja sila, ki so jo vzorci dosegli, je bila pri testnem vzorcu 1 in je znašala cca 24 kN. Dosežen pomik pri tej obremenitvi je na mestu obremenjevanja znašal približno 90 mm. Pri ostalih dveh testih se vzorci niso obremenjevali povsem do porušitve, saj se je želelo ugotoviti, pri kateri sili se začne

vzorec plastificirati. Pri prvem vzorcu je bilo ugotovljeno, da se je plastifikacija začela pri 10kN, saj se je pri tej vrednosti sile začela krivulja nagibati. Pri ostalih dveh testih pa se je ugotovilo, da se je vzorec začel plastificirati nekje pri 12,5 kN. Kot prikazuje grafikon 1, se je pri testih 2 in 3 obtežba nanašala ciklično s povečevanjem velikosti sile V_z . Vsakokrat se je vzorec razbremenil do obremenitve 1 kN. Iz grafa 1 se lepo vidi, da je na vzorcu pri ponovnem obremenjevanju ostalo nekaj plastične deformacije, saj se linija obremenjevanja in razbremenjevanja ne prekrivata. Vidimo, da z višanjem obremenitve ostane na konstrukcije večji del plastične deformacije. Krivulje razbremenjevanja in obremenjevanja so pri vseh testih vzporedne, razen pri testu 1, kjer se opazi večji naklon premice v začetnem delu obremenjevanja konstrukcije. To kaže na večjo togost sistema. V nadaljevanju obremenjevanja lahko tudi določimo čas odpovedi vzorca, saj se je krivulja obremenjevanja uravnala in počasi začela padati. To nakazuje na odpoved nosilnosti vzorca na določenem delu. Na sliki 25 se lepo vidi, da na stropnem vogalniku pride do lokalne nestabilnosti pločevine, saj se je pločevina izbočila iz začetne nedeformirane ravnine.

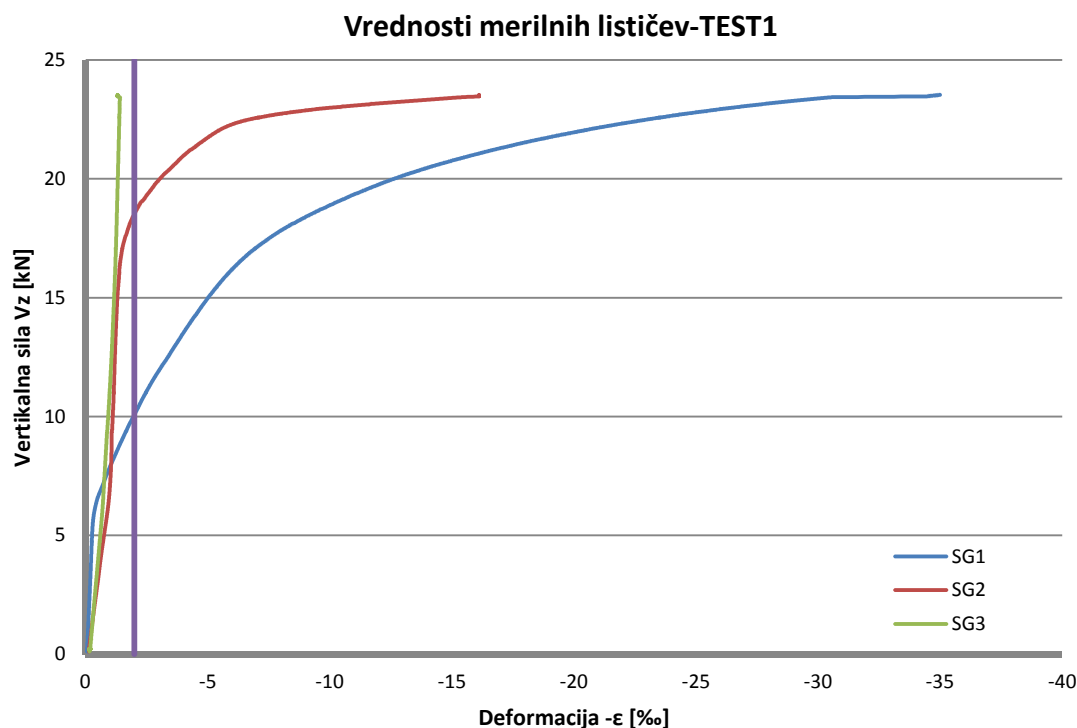


Slika 25: Lokalno izbočenje pločevine stropnega vogalnika nad priključno pločevino.

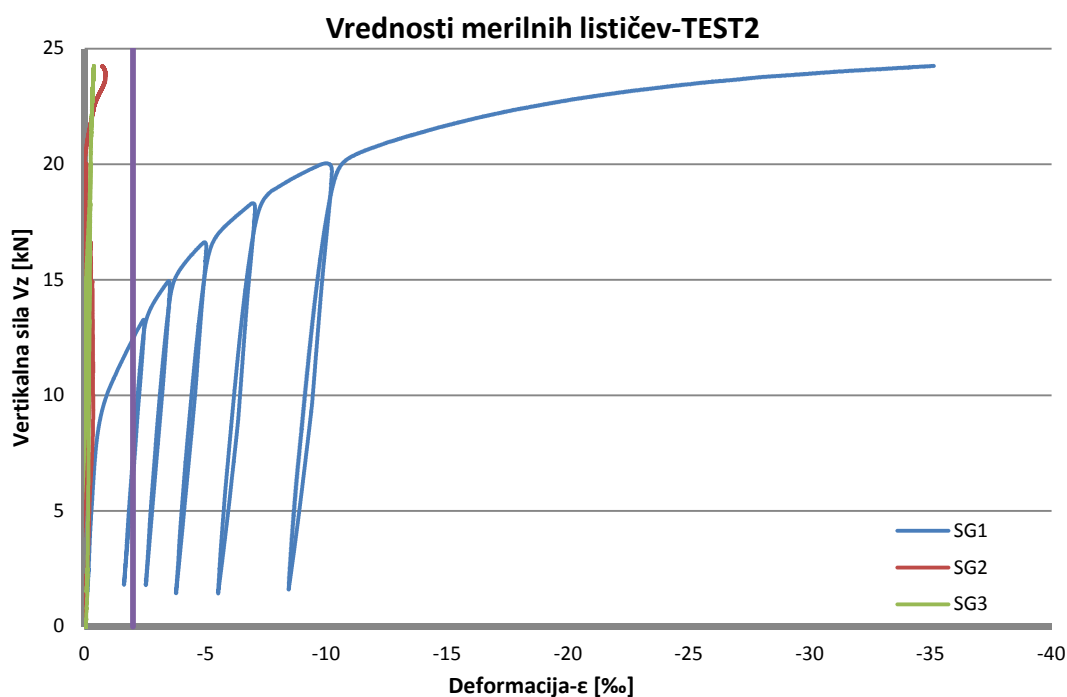
Tudi rezultati merilnih lističev kažejo, da pri vsakem cikličnem obremenjevanju ostane na merilnem lističu SG1 nekaj plastične deformacije. Velikost deformacije merilnih lističev smo merili v microstrainih [μst]. To je pogosta merska enota, ki meri razliko velikosti telesa pred deformiranjem in po deformiranju telesa. Vrednost ene enote microstraina znaša eno milijoninko vrednosti deformacije. Pri merilnem lističu je vrednost presegela 2000 microstrainov, ki določa mejo plastične deformacije.

Deformacija je bila negativnega predznaka, iz česar je razvidna tlačna obremenitev stropnega nosilca v spodnjem delu profila. Usmerjenost lističev se vidi na sliki 3. Vrednost merilnih lističev SG2 in SG3 ni presegala vrednosti 2000 microstrainov, torej se material na merilnem mestu ni plastificiral. Vrednosti deformacij merilnih lističev SG1, SG2 in SG3 so prikazane na grafikonih 2, 3 in 4. Vijolična barva prikazuje mejo plastifikacije materiala v promilih in znaša 2 ‰ deformacije.

Grafikon 2: Vrednosti deformacij merilnih lističev (SG1, SG2 in SG3) pri testu 1.

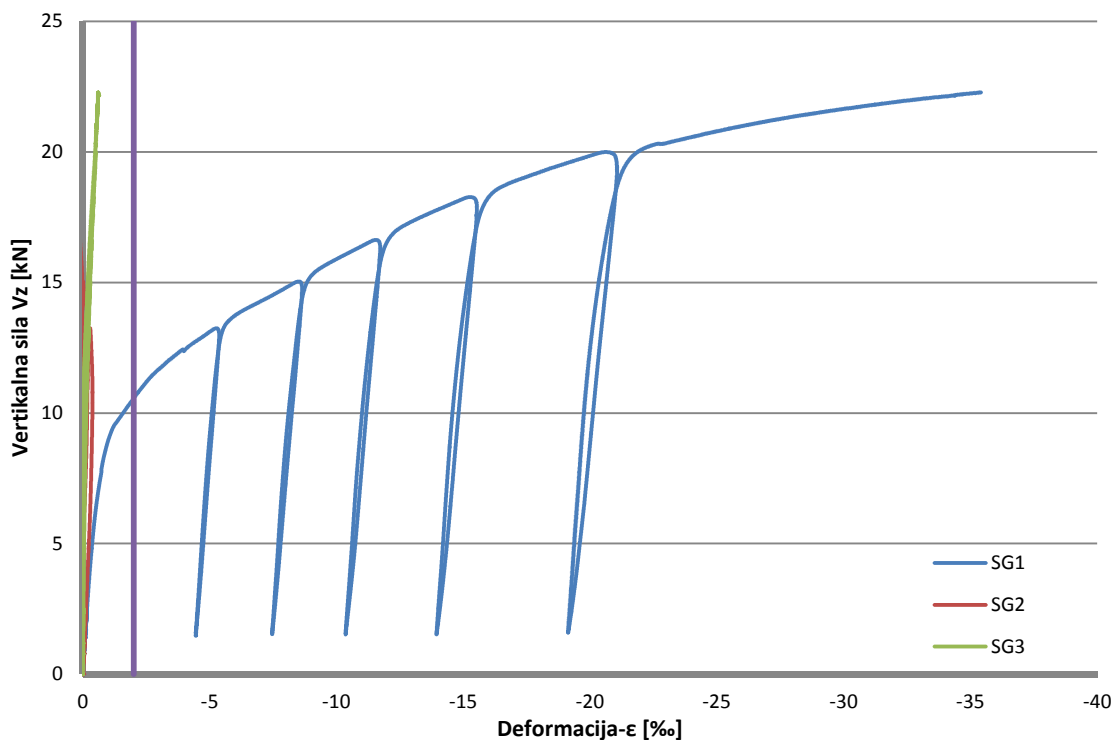


Grafikon 3: Vrednosti deformacij merilnih lističev (SG1, SG2 in SG3) pri testu 2.



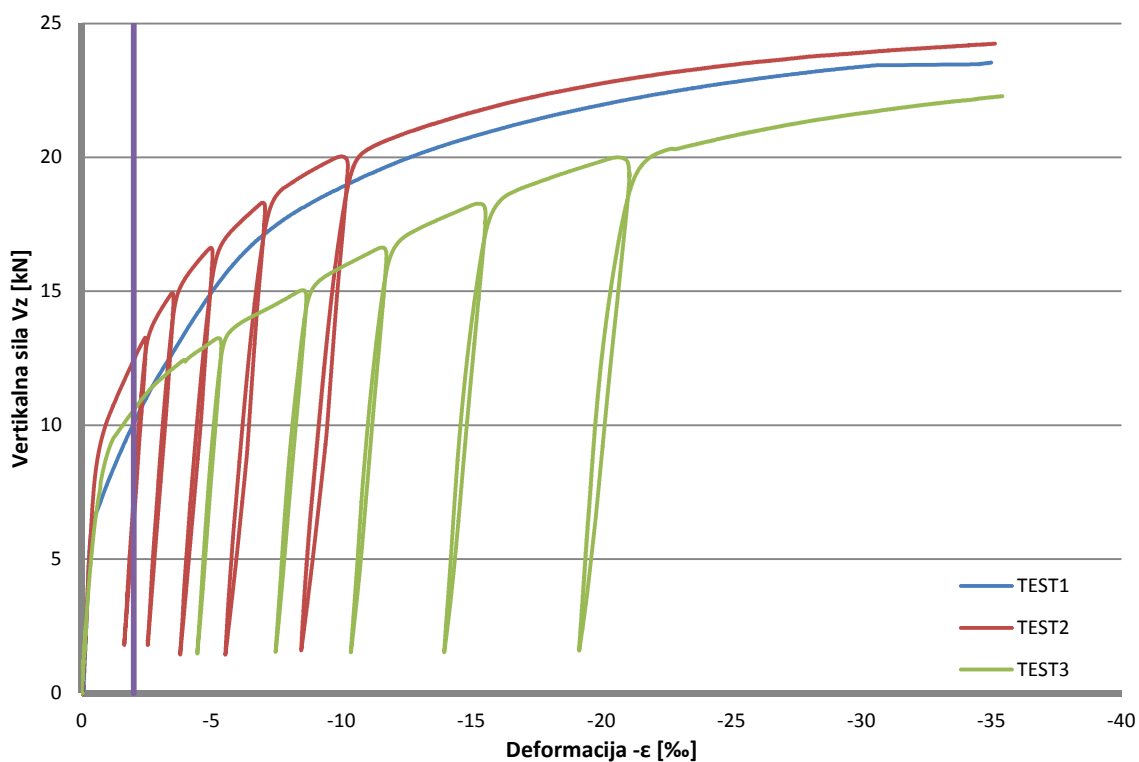
Grafikon 4: Vrednosti deformacij merilnih lističev (SG1, SG2 in SG3) pri testu 3.

Vrednosti merilnih lističev-TEST3



Grafikon 5: Vrednosti deformacij merilnih lističev SG1 pri vseh treh testi.

Primerjava merilnih lističev SG1



Iz grafikonov 3 do 5 je lepo razvidno, da pri vseh treh testih pride do plastifikacije na mestu merilnega lističa SG1, ki je lociran na zunanji strani stropnega profila. Merilni listič pride pri testu 1 v območje plastifikacije pri velikosti vertikalne obtežbe 10 kN. Pri drugem in tretjem testu se je meja plastifikacije sicer nekoliko zvišala, vendar ne bistveno. Pri drugem testu je meja plastifikacije znašala 12 kN, pri tretjem pa 10,5 kN. Oba vzorca sta se torej plastificirala že v prvi fazi cikličnega obremenjevanja, saj je pri razbremenitvi vzorca na merilnem lističu ostalo nekaj plastične deformacije. V vsakem dodatnem ciklu obremenjevanja vzorca je po razbremenitvi ostal večji prirastek plastične deformacije. Z manjšanjem odpornosti vzorca pa je bil prirastek pri vsakem ciklu večji. Pri prvem testu, kjer smo vzorec obremenjevali neposredno do porušitve, lahko le spremljamo plastifikacijo na mestu merilnega lističa SG1.

Na mestu merilnega lističa SG3 (Slika 21), ki je bil pozicioniran na nasprotni strani merilnega lističa SG1, se material ni plastificiral pri nobenem preizkusu. Merilni listič SG1 je bil namreč nalepljen na stojini stropnega profila, ki predstavlja upogibno ravnino. Zaradi tega so v spodnjem delu velike tlačne napetosti, ki povzročajo krčenje materiala, vendar jih merilni listič SG3 ne zazna, saj sta lističa med sabo oddaljena 30 mm. To nam nakazuje na to, da napetosti po prečnem prerezu niso enako velike, kljub enaki oddaljenosti od težišča profila. Razlog tiči v nesimetrični zasnovi profila, kot je bilo že omenjeno. Torej lahko sklepamo, da ojačitev v stropnem profilu nima želenega učinka, saj je na stropni profil varjena na notranji strani, kjer pa so napetosti bistveno manjše kot na zunanji strani profila.

Pri prvem testu so bile zaznane določene deformacije na mestu merilnega lističa SG2, ki je nameščen na stebri, neposredno pod stropnim vogalnikom. Pri ostalih dveh testih se material na mestu merilnega lističa ni plastificiral. Ta praktično sploh ne zazna obremenitve, saj se vrednosti merilnega lističa skoraj ne spreminjajo kljub povečevanju sile. Sklepamo lahko torej, da gre pri merilnem lističu SG2, pri prvem testu za napako pri meritvi ali pa merilni listič pri prvem testu ni bil povsem na enakem mestu kot pri ostalih dveh testih.

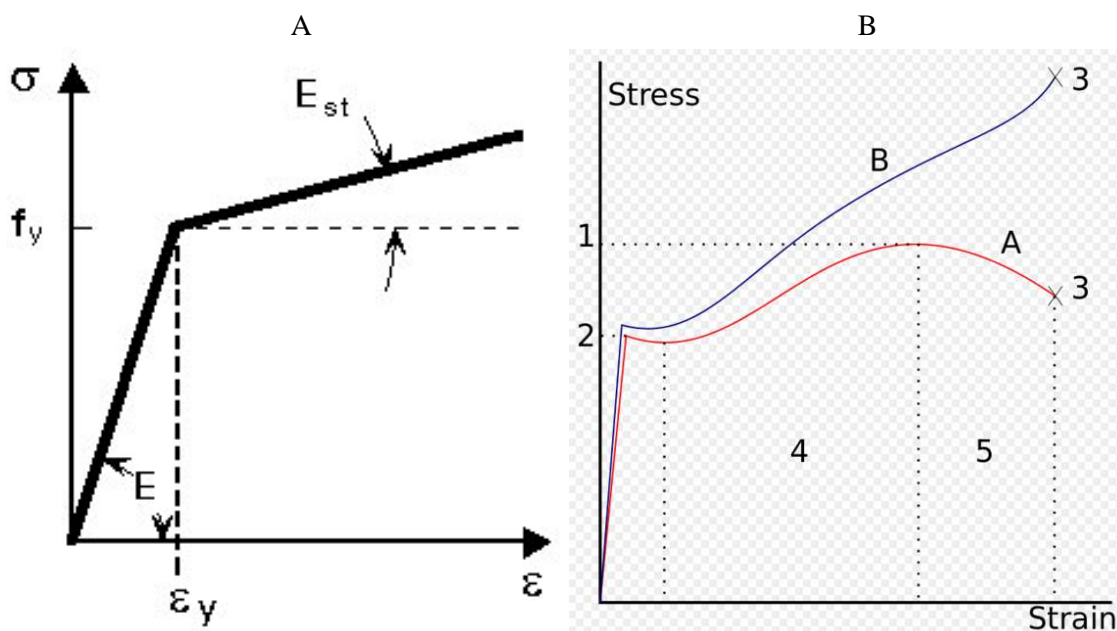
Dobljene rezultate vseh treh testov, lahko primerjamo s sliko 25, kjer je prikazana deformirana oblika stropnega vogalnika vzorca po zaključku testa. Na sliki 25 se lepo vidi izbočenje pločevine stropnega vogalnika. Izbočenje pločevine se zgodi nekaj centimetrov višje kot je merilni listič SG1, ki je pri vseh treh opravljenih testih zaznal plastifikacijo materiala na merjenem območju. Deformacija je bila negativnega predznaka, kar pomeni, da je bil na merjenem območju vzorec tlačno obremenjen. Izbočenje, ki nastane nad merilnim mestom, je torej posledica tlačne obremenitve materiala.

4 NUMERIČNI MODEL

4.1 Materialni model

Pri dimenzioniranju spoja smo uporabili jekla S235JR, S355JR in S355MC. Za realne rezultate numeričnega modela je potrebno uporabiti pravilne podatke. Obnašanje materiala, ki je bil uporabljen v modelu, smo opisali z diagramom napetosti " σ " in deformacij " ϵ ". V praksi poznamo tri različne materialne modele:

- bilinearen diagram brez utrditve,
- bilinearen diagram z utrditvijo in
- dejanski diagram, ki ga dobimo iz enoosnega preizkusa.



Slika 26: A- Elasto-plastičen diagram napetosti (Plastic model); B- Dejanski diagram napetosti pri čemer rdeča krivulja prikazuje napetosti na nedeformiran prerez, modra pa na deformiran prečni prerez (Plastic model).

V modelu bi lahko uporabili bilinearni model brez utrditve, oziroma elasto-plastičen model. Model bi bil primeren za določitev lokacij začetka plastifikacije materiala. Kljub temu je potrebno premici plastičnega dela diagrama določiti minimalni naklon, saj drugače pride v modelu do numerične nestabilnosti.

Najbolj realne rezultate numeričnih simulacij dobimo, če uporabimo podatke, dobljene pri enoosnem nateznem preizkusu. Pri preizkusu dobimo silo " P " in raztezek " l_u-l_0 ", kot razliko začetne in končne dolžine vzorca. Iz teh dveh podatkov lahko nato izračunamo napetost " σ_{nom} " (enačba (5)), deformacijo materiala " ϵ_{nom} " (enačba(7)). Če silo delimo z začetnim, nedeformiranim prečnim prerezom " A_0 ", izmerjenim pred začetkom testa, dobimo nominalni, oziroma inženirski diagram napetosti in deformacij. Dejansko pa se prečni prerez pri obremenjevanju vzorca zoži, zaradi prečne kontrakcije.

Govorimo o tako imenovanem dejanskem prečnem prerezu " A_{dejanski} ". Velikost prečnega prereza se zato spremeni, zmanjša, posledično se povečajo tudi napetosti " σ_{TRUE} ", saj sila deluje na manjši prečni prerez (enačba(6)).

$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{P}{A_0} \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{TRUE}} = \frac{P}{A_{\text{dejanski}}} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{\text{nom}} = \frac{l_u - l_0}{l_0} \quad (7)$$

Ker je izjemno težko meriti spremembe prečnega prereza med deformacijo, posledično tudi težko izračunamo dejanske napetosti " σ_{TRUE} ", si pomagamo s poenostavljeno enačbo (8). Korigirati je potrebno tudi izmerjene deformacije materiala " ε_{nom} ", saj želimo upoštevati dejanske deformacije " ε_{tru} ", ki jih izračunamo z enačbo (9). Dejanskim plastičnim deformacijam pa moramo odšteti elastični del deformacije, saj bomo le tako dobili pravilno obnašanje modela. Plastične deformacije, brez elastičnega dela deformacij, dobimo z enačbo (10).

$$\sigma_{\text{TRUE}} = \sigma_{\text{nom}} (1 + \varepsilon_{\text{nom}}) \quad (8)$$

$$\varepsilon_{\text{tru}} = \ln(1 + \varepsilon_{\text{nom}}) \quad (9)$$

$$\varepsilon_{\text{TRU,pl}} = \varepsilon_{\text{tru}} - \frac{\sigma_{\text{tru}}}{E} \quad (10)$$

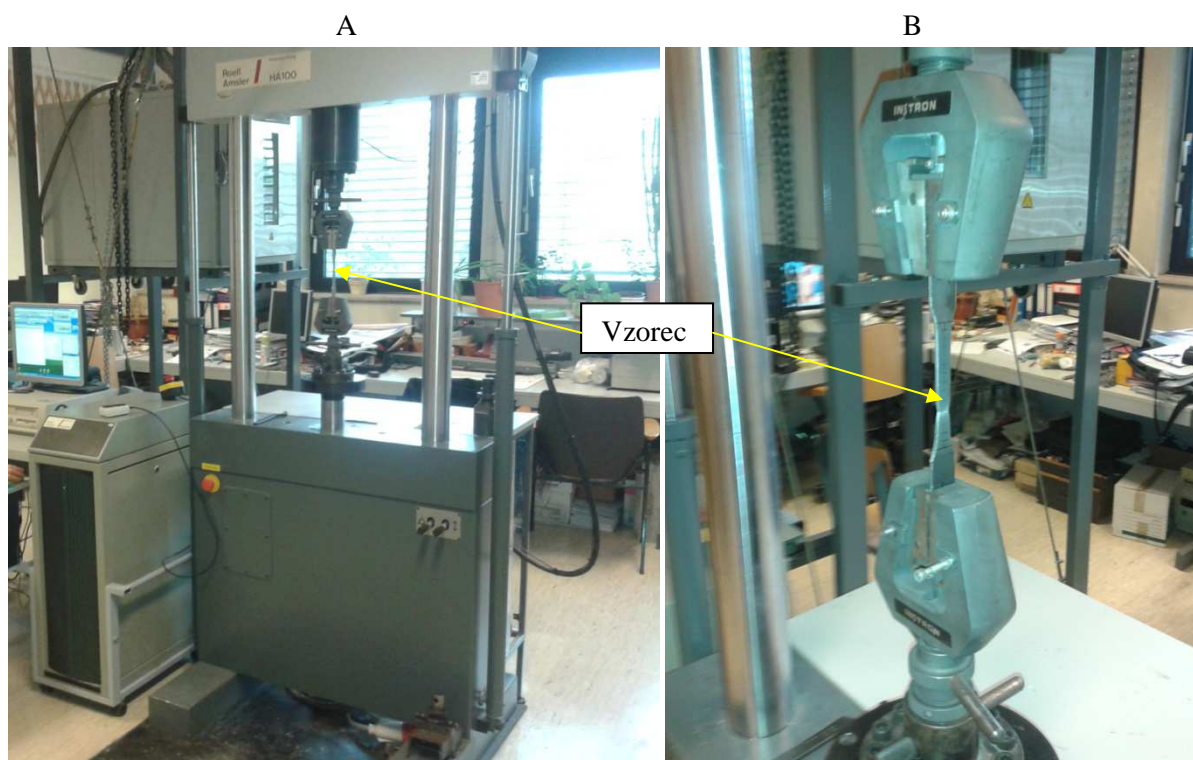
4.2 Materialne karakteristike

Karakteristična natezna trdnost je statistično določena kot vrednost s spodnjo mejo 5 % fraktile. To pomeni, da je 5 % vzorcev slabše kvalitete, kot je predpisana nominalna vrednost. Določa se meja pri kateri se začne jeklo plastificirati. Jeklo S235 se torej začne plastificirati pri napetosti 235 MPa. Iz prakse pa vemo, da je material boljše kvalitete. Da določimo dejansko mejo plastičnosti " f_y " in mejno nosilnost " f_u ", smo naredili za vsa jekla, ki smo jih uporabili v modelu, enoosni natezni preizkus na trgalnem stroju ROALL AMSLER HA100, v laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani. Teste smo izvajali skladno s standardom SIST EN 10002-1:2002, ki predpisuje pogoje za izvajanje enoosnega nateznega preizkusa pri normalnih pogojih. Standard podaja, kakšna mora biti oblika preizkušancev, debelina, dolžina preizkušanca in radij zaokrožitve na mestu, kjer pričakujemo lokalizacijo materiala. Oblika testnih vzorcev je prikazana na sliki 27, napisana pa je tudi zaporedna številka vzorca in vrsta materiala.



Slika 27: Oblika testnega vzorca, na katerem so zarisane črtice dodatno kontrolo raztezka, zaporedna številka in vrsta materiala iz katerega je vzorec narejen.

Naprava, na kateri smo izvajali enoosne natezne preizkuse, je imela hidravlični bat, ki ima maksimalno izvlečeno silo 100 kN. Na batih so nameščene vpenjalne glave, ki omogočajo vpenjanje testnih vzorcev do debeline 6 mm in širine 25 mm. Glave imajo nazobčane čeljusti, ki pri nategovanju vzorca, močno zagrabijo vzorec. Kljub temu pa je potrebno na začetku testa v vzorec vnesti 1,5 kN obtežbe, ki nam zagotavlja, da nam vzorec ne zdrсне iz napenjalne glave. Poimenovanje vzorcev je bilo enostavno, saj smo vzorce označili po vrstnem redu od ena do petnajst. V tabeli 2 so napisani podatki o vrsti materiala posameznega vzorca, geometrijskih karakteristikah in hitrosti obremenjevanja vzorca.



Slika 28:A- Testna naprava za enoosni natezni preizkus ROALL AMSLER HA100, z računalnikom za zajemanje podatkov ter krmilnikom; B- Porušen vzorec, vpet v čeljusti.

Standard SIST EN 10002-1:2002 predpisuje hitrost obremenjevanja vzorcev. Podaja zgornjo in spodnjo mejo prirastka napetosti za materiale, ki imajo elastični modul višji kot 150000 MPa. Minimalni prirastek napetosti mora biti višji od 6 MPas^{-1} , medtem ko je zgornja meja prirastka napetosti omejena na 60 MPas^{-1} . V našem primeru smo enoosne natezne preizkuse izvajali tako, da

smo vsiljevali pomik. Merili smo silo, iz katere pa smo izračunali spremembo napetosti na linearnem delu grafa. Hitrosti obremenjevanja so se tako gibale od 9 MPas^{-1} , pri $0,03 \text{ mm}$ pomika na sekundo, do 21 MPas^{-1} , pri čemer je pomik znašal $0,06 \text{ mm/s}$. Želeli smo ugotoviti, ali hitrost obremenjevanja vpliva na hitrost dobljenih rezultatov. Kot smo ugotovili kasneje, so bili rezultati skoraj enaki, kar pomeni, da hitrost obremenjevanja ni imela velikega vpliva na dobljene rezultate.

Preglednica 2: Klasificiranje števila vzorcev različne kvalitete jekla, začetna geometrija in hitrost obremenjevanja vzorcev.

		L_t [mm]	L_0 [mm]	L_u [mm]	b_0 [mm]	t_0 [mm]	A_0 [mm]	Hitrost obr. [mm/s]
S235 JR	VZOREC 1	240	70	89	13,2	3	0,396	0,03
	VZOREC 2	240	70	89	13,2	3	0,396	0,04
	VZOREC 3	240	70	88	13,3	3	0,399	0,05
	VZOREC 4	240	70	88	13,2	3	0,396	0,06
	VZOREC 5	240	70	88	13,2	3	0,396	0,06
S355JR	VZOREC 6	250	70	84	12,9	3	0,387	0,06
	VZOREC 7	250	70	83	12,8	3	0,384	0,05
	VZOREC 8	250	70	84	12,9	3	0,387	0,05
	VZOREC 9	250	70	84	12,9	3	0,387	0,05
	VZOREC 10	250	70	84	12,9	3	0,387	0,05
S355MC	VZOREC 11	250	70	86	13,5	3	0,405	0,05
	VZOREC 12	250	70	87	13,4	3	0,402	0,05
	VZOREC 13	250	70	87	13,4	3	0,402	0,05
	VZOREC 14	250	70	86	13,4	3	0,402	0,05
	VZOREC 15	250	70	87	13,4	3	0,402	0,05

LEGENDA: - L_t ... začetna dolžina vzorca,

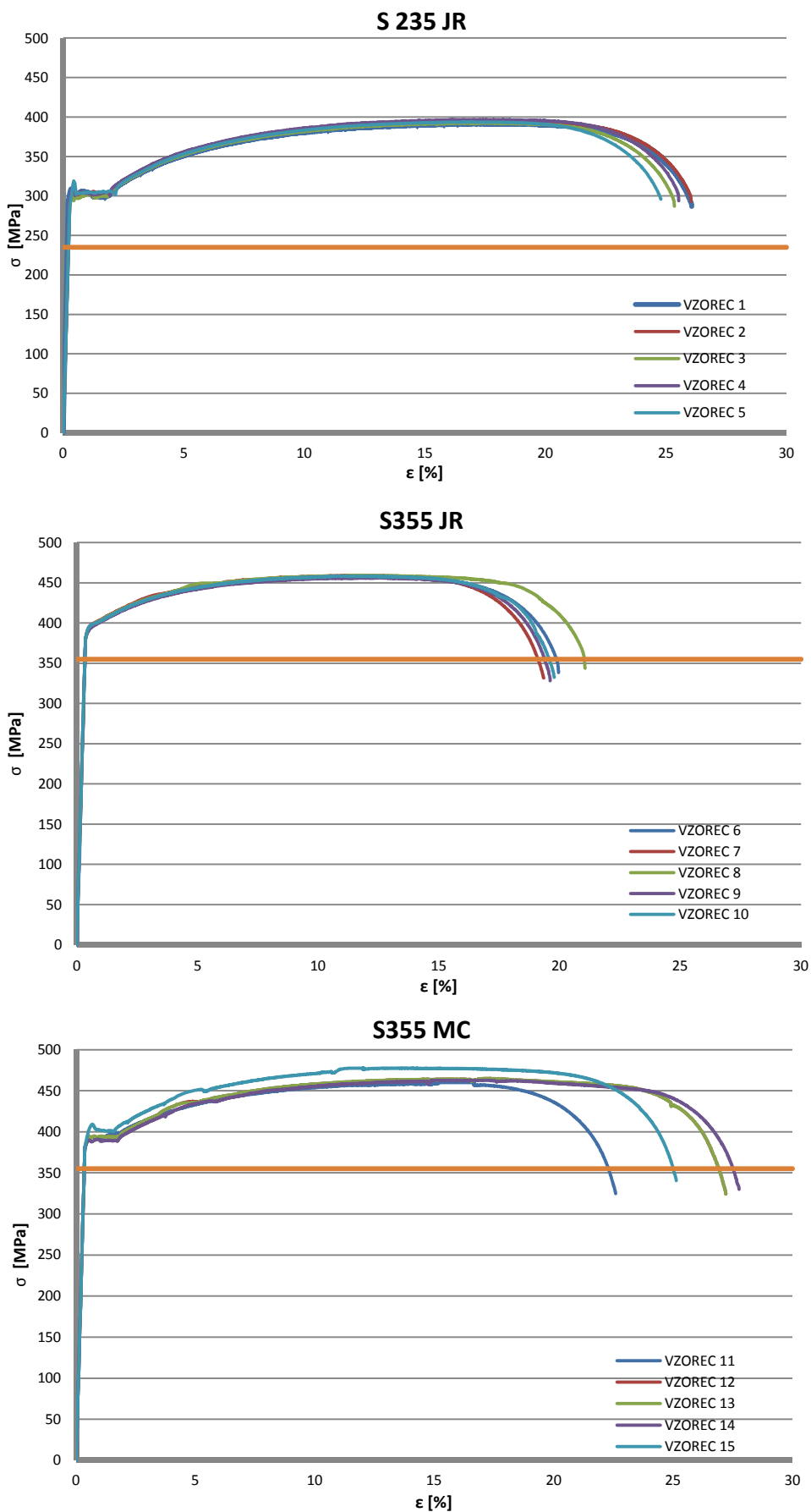
- L_0 ...dolžina označenega dela pred testom,

- L_u ...dolžina označenega dela pred testom,

- b_0 ...začetna širina vzorca,

- t_0 ...začetna debelina vzorca.

Grafikon 6: Rezultati vzorcev enosnega nateznega preizkusa.



Na grafikonih, pod zaporedno številko 6, so zbrani podatki materialnih karakteristik testnih vzorcev. Rezultat testov so inženirski diagrami napetosti in deformacij. Napetost je izračunana z enačbo (5), ki natezno silo razdeli na nedeformiran prečni prerez vzorcev. Rezultat je tako imenovana normalna napetost. Deformacija vzorcev je izračunana po enačbi (7). Črta oranžne barve prikazuje karakteristično natezno trdnost materiala, ki jo predpisuje Eurokod SIST EN 1993-1-1, glede na posamezni tip materiala.

Iz grafikonov je razvidno, da ima vseh petnajst vzorcev višjo mejo plastičnega tečenja, kot je spodnja, nazivna ("karakteristična") meja vzorcev. To potrjuje dejstvo, da so v povprečju materiali boljše kvalitete. Pri vseh vzorcih se na grafikonih lepo vidi meja plastičnega tečenja, ki je značilna za mehka konstrukcijska jekla. Pri vzorcih jekel S355JR pa izrazite meje plastičnosti ne zaznamo, saj imajo ta jekla višjo trdnost, kot je jeklo S235JR. Za jekla višjih trdnostnih razredov je značilno, da se jim z višanjem trdnosti, zmanjšuje delež deformacije. Iz rezultatov med jekli S235 in S355JR, lahko potrdimo omenjeno teorijo, saj je deformacija, pri porušitvi vzorcev S355JR, za 5 % manjša od vzorcev S235JR. Vzorci jekla S235JR se namreč porušijo pri 25 %, medtem ko se vzorci jekla S355JR porušijo pri 20 % deformacije.

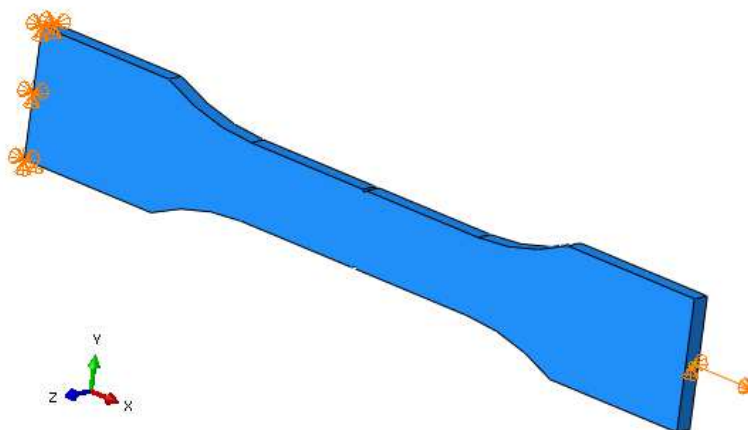
Kot sem že omenil, so bili vzorci istega trdnostnega razreda izjemno podobni. Raztros vrednosti rezultatov je bil izjemno majhen, le pri vzorcih, ki so bili narejeni iz jekla S355MC, so se rezultati meritev rahlo razlikovali, od trenutka, ko je prišlo do lokalizacije napetosti, oziroma natezne trdnosti materiala. Na grafu se to vidi po padanju napetosti pri povečevanju deformacij.

4.3 Umerjanje materialnega modela

Izmerjene napetosti in deformacije materiala je potrebno umeriti s programom ABAQUS. Za material uporabimo realne napetosti in deformacije s pomočjo enačb (8) in (10). Enačbi opišejo obnašanje materiala po začetku plastifikacije, ko pride do utrjevanja materiala in prvih plastičnih deformacij. Govorili smo že namreč, da se prečni prerez vzorcev, po začetku plastifikacije spremeni. Vzorec se začne raztezati po dolžini, v prečni smeri pa se zoži, v odvisnosti od Poissonovega (ν) količnika, ki pri jeklu znaša 0.3. Enačbi (8) in (10) pa na žalost veljata le do lokalizacije materiala, potem pa so lokalne deformacije tako velike, da jih z enačbo ne moremo več opisati. Natezna sila začne padati, vse do pretrga materiala.

Za vrednost elastičnega modula smo privzeli minimalno vrednost, ki jo imajo jekla, $E=200000$ MPa. Iz dobljenih rezultatov enosnega preizkusa smo ugotovili, da so se vsi testni vzorci jekla S235JR začeli plastično deformirati pri deformaciji 0,14 %. Pri jeklih višjih trdnosti S355JR in S355MC, pa je prišlo do plastifikacije pri večjih deformacijah, malo pod 0,2 %.

Model v programu ABAQUS mora biti za umerjanje materiala geometrijsko enak vzorcu enosnega preizkusa, zmanjšamo ga le za dolžino vpetja vpenjalnih čeljusti. Predpostavimo namreč, da se na delu vzorca, ki je bil med testom vpet, vzorec ne deformira. Modelni vzorec na enem koncu vpenemo, na drugem pa nanašamo obremenitev. Vnašamo pomik zaradi stabilnosti analize v smeri osi vzorca, kot je prikazano s puščico na sliki 29.

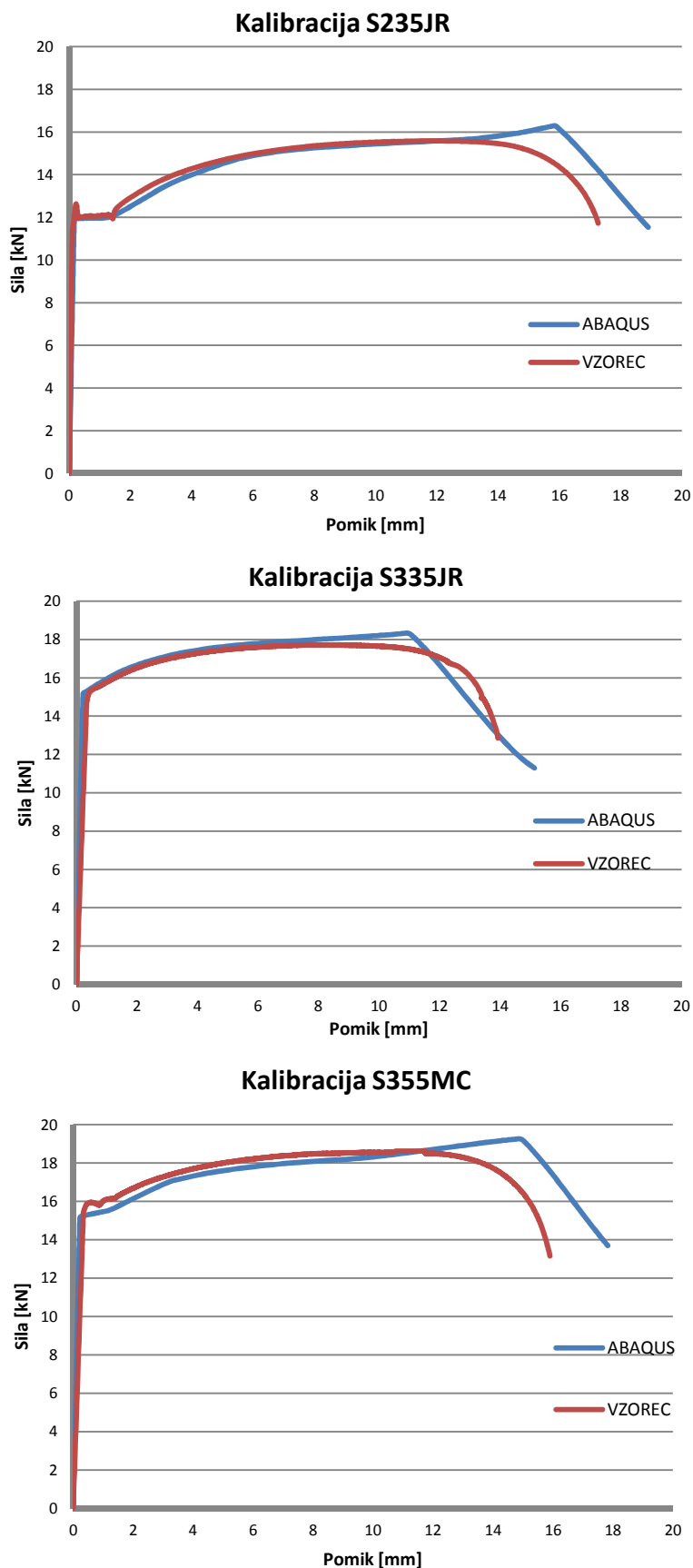


Slika 29: Model testnega vzorca v programu ABAQUS.

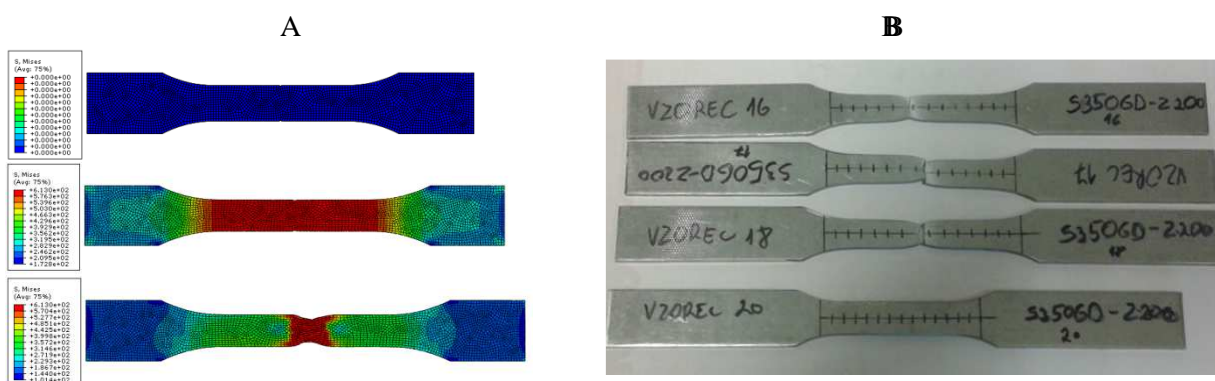
Med umerjanjem modela smo merili pomik in velikost sile. Ti dve komponenti smo nato primerjali s podatki, dobljenimi z nateznim preizkusom v ABAQUS-u. Sovpadanje podatkov pomeni pravilno definiranje obnašanja realnih napetosti in realnih deformacij materiala. Primerjavo rezultatov vidimo na grafikonu 7 za različna jekla. Modra krivulja prikazuje rezultate dobljenih s programom, rdeča pa rezultate testa. Opazi se razhajanje krivulj, ko pride do lokalizacije in s tem znatnim zožanjem prečnega prereza vzorca. To potrди predhodne trditve, da enačbi (8) in (10), veljata do nastanka lokalizacije. Pri realnem vzorcu v tem trenutku začne sila padati, zaradi zmanjševanja prečnega prereza, pri vzorcu v ABAQUS-u pa sila začne naraščati. Razlog je lahko v podatkih, ki smo jih podali programu. Podali smo izračunano dejansko napetost σ_{TRUE} , ki po enačbi (8), s povečevanjem deformacij neprestano narašča. Potek modrih krivulj tako sovpada s sliko 26B, kjer modra krivulja "B" predstavlja potek realnih napetosti. Vidimo, da napetosti naraščajo s povečevanjem deformacij, zaradi lokalizacije in kasnejšega pretrga materiala na tem delu.

Pri umerjanju modela v ABAQUS-u se v nekem trenutku smer naklona izjemno hitro spremeni, kar po vsej verjetnosti nakazuje na popolno odpoved vzorca. Pri dejanskem materialu bi prišlo do pretrga, pri numeričnem modelu pa lahko povečujemo deformacije v neskončnost, saj se končni elementi deformirajo poljubno glede na obremenitev. Ta del grafikona bi lahko zanemarili.

Grafikon 7: Primerjava pomika in sile izmerjenih pri enoosnem nateznem preizkusu z rezultati analize v programu ABAQUS.



Na sliki 30A je prikazan model deformiranja vzorca v programu ABAQUS. Lepo se vidi naraščanje deformacij s povečevanjem obremenitve. Vzorec se začne zaradi zunanje obremenitve raztezati, v prečni smeri pa zaradi prečne kontrakcije krčiti. Na oslabiljenem delu se začnejo povečevati napetosti, vse do trenutka, ko so te prevelike in pride do tako imenovane lokalizacije napetosti, kot se vidi na spodnji levi sliki 30. Pri realnem modelu pride na tem mestu do pretrga vzorcev, kot vidimo na treh porušenih vzorcih na sliki 30B. Če pogledamo zarisane črtice, ki so bile pred testom na medsebojni razdalji 5 mm, vidimo kako velike so deformacije vzorca na delu, kjer ni nastal plastični členek. Črtice so se v povprečju med sabo razmaknile za 1 mm. Bistveno večje deformacije so bile okoli mesta, kjer je nastal plastični členek. Tu so se črtice razmaknile tudi do 3 mm. Zraven je slikan nedeformiran vzorec pred testom, za vizualno primerjavo velikosti deformacij.



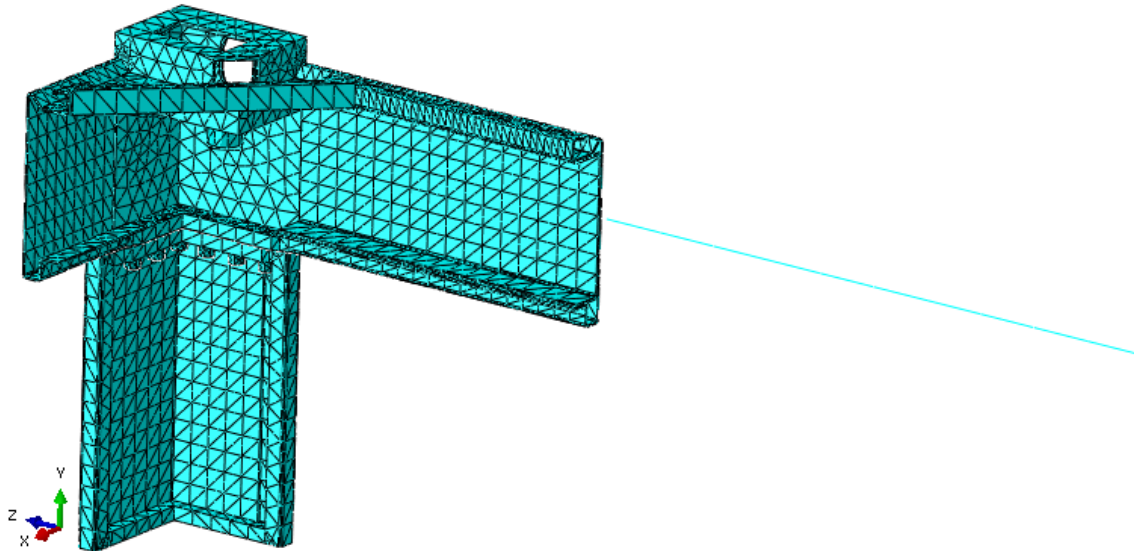
Slika 30: A- Prikaz postopnega deformiranja vzorca v programu ABAQUS; B- Trije porušeni vzorci ter en neporušen vzorec.

4.4 Določitev tipa in velikosti mreže končnih elementov v programu ABAQUS

Bolj zahteven korak pri modeliranju numeričnega modela v ABAQUSU je bila razdelitev elementov modela na mrežo končnih elementov. Zaradi specifične geometrije elementov za generiranje končnih elementov niso bili primerni osemkotni končni elementi "HEX", ampak končni elementi, ki imajo štiri vozlišča in so oblike tetraedra "TET". Mrežo končnih elementov program generira sam, glede na velikost končnih elementov, ki se določi pred mreženjem elementa. Gostoto mreže končnih elementov določimo z občutljivostno analizo. Velikost elementov postopno zmanjšujemo in opazujemo odziv sistema. Ko gostota mreže končnih elementov ne vpliva več na odzivnost modela, prenehamo z zgoščevanjem mreže, saj nam velikost gostote mreže povečuje računski čas in s tem potrebo po večji zmogljivosti strojne opreme.

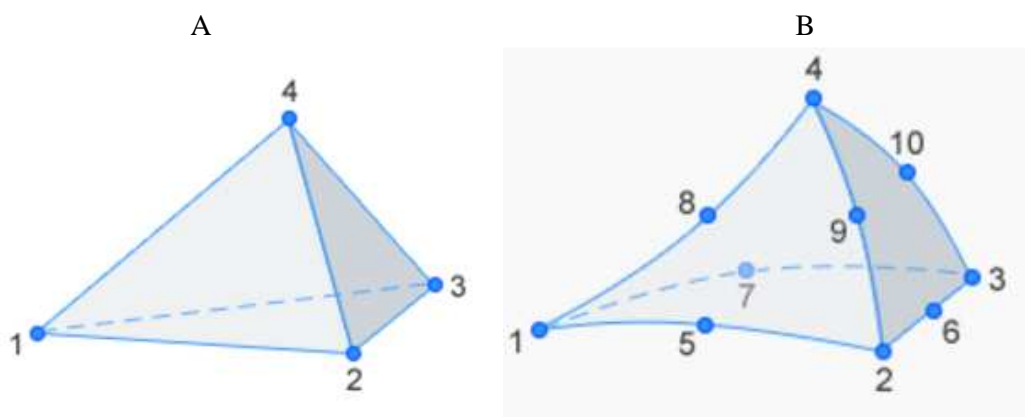
Pri snovanju modela se lahko poslužujemo linijskih elementov "beam", ki jih uporabimo v modelu tam, kjer ne pričakujemo posebnosti. Na sliki 31 je prikazan numerični model, kjer so elementi razdeljeni na mrežo 3D končnih elementov in linijski element, ki predstavlja nadaljevanje prečke, ki je po dolžini razdeljena na 2D končne elemente, oziroma segmente. 2D elementi imajo le dve integracijski točki na vsaki strani elementa. Tako lahko učinkovito zmanjšamo število podatkov, ki jih

mora program pri vsaki iteraciji preračunati. Kot vidimo, smo z "beam" elementom zmanjšali število 3D končnih elementov.



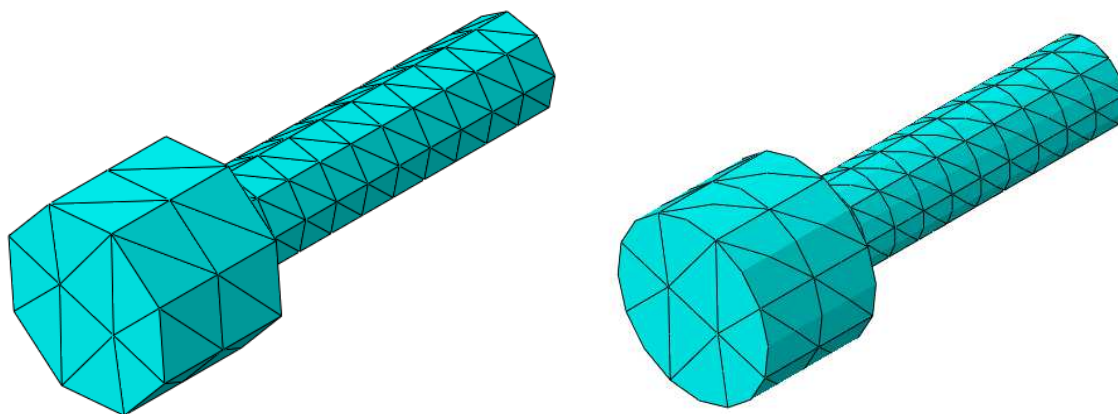
Slika 31: Numerični model, ki je razdeljen na končne elemente.

Kot smo že omenili, se z zmanjševanjem gostote mreže končnih elementov povečuje računski čas posamezne analize. Prav tako se povečuje računski čas z večanjem integracijskih točk posameznega elementa. Geometrija našega računskega modela je specifična, zaradi tega je generiranje mreže končnih elementov na nekaterih delih izjemno problematično. Pri generiranju se zato ne moremo ravno odločati ali bi bili elementi osemkotni, ali štirikotni končni elementi v obliki tetraedra. Slednji so dveh različnih tipov, C3D4 in C3D10. C3D4 so linearni elementi, ki ne dajejo dovolj dobrih rezultatov v nelinearnem območju. Elementi imajo namreč le 4 integracijske točke (Slika 32). Da bi se približali dovolj dobrih rezultatov, je potrebno narediti dovolj gosto mrežo končnih elementov, ali pa se poslužujemo C3D10 končne elemente, ki nam dajo bolj natančne rezultate. Ti imajo namreč 10 integracijskih točk, ki veliko bolje opišejo obnašanje elementov med deformacijo (Slika 32).



Slika 32: A- Končni element v obliki tetraedra C3D4; B- Končni element v obliki tetraedra C3D10. (SIMULIA)

Uporabo števila integracijskih točk končnega elementa vidimo na sliki 33. Na geometriji elementa vijaka, ki je sestavni del našega obravnavanega modela, vidimo rezultat različne uporabe tipa končnih elementov. Končni element C3D4 veliko slabše opiše krožno obliko vijaka, kot krožni element C3D10, ki skoraj popolnoma zajame obliko dejanskega vijaka.



Slika 33: Uporaba C3D4 končnih elementov na modelu vijaka (slika levo) in C3D10 (slika desno).

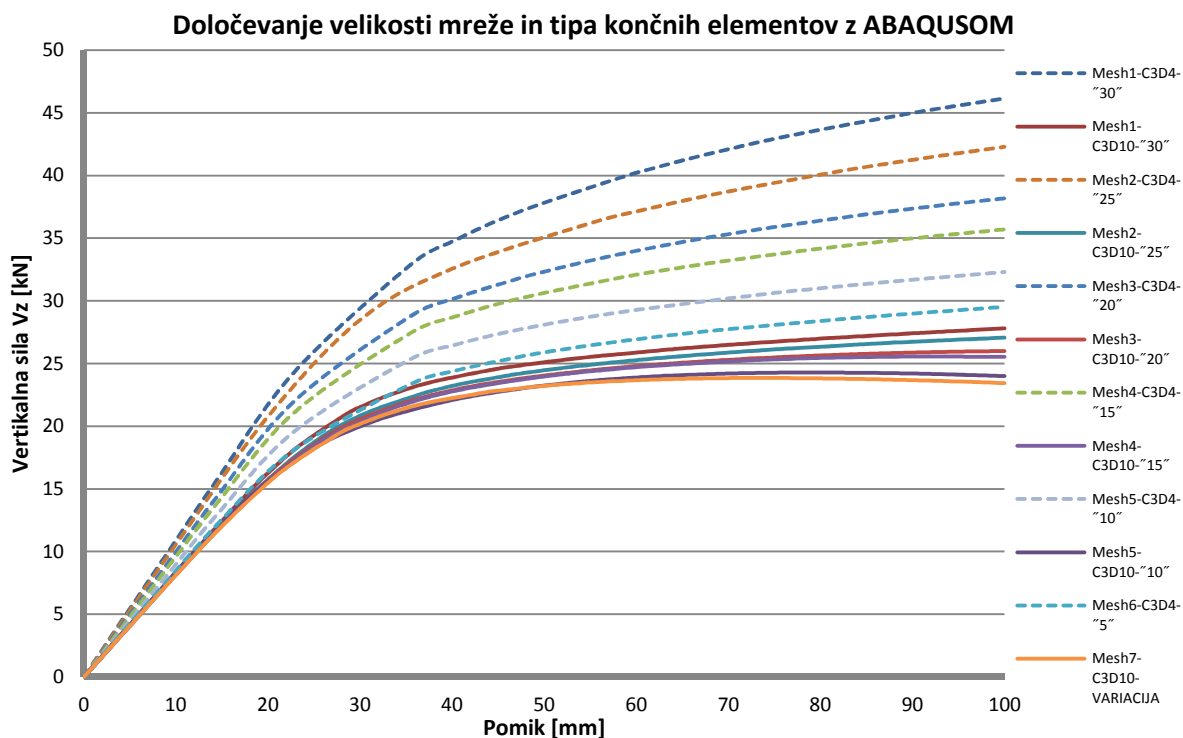
Za pravilno odločitev o izbiri tipa in velikosti mreže končnih elementov, smo numeričnemu modelu na sliki 31, postopno zgoščevali mrežo končnih elementov in merili odziv analize. Začeli smo z redkejšo mrežo, kjer so bili končni elementi v povprečju veliki 30 mm. Na nekaterih, geometrijsko bolj zapletenih delih, program že samodejno zmanjša velikost končnega elementa, saj drugače ne more zajeti geometrije elementa, če so razdalje med integracijskimi točkami prevelike. Pri vsaki velikosti mreže smo naredili analizo z obema razpoložljivima tipoma, ki jih dopušča tetraedrična oblika končnih elementov. Primerjava odziva obeh tipov elementov nas je zanimala predvsem z vidika hitrosti izračuna posamezne simulacije.

Preglednica 3: Računski čas analize pri posamezni velikosti mreže in tipu končnih elementov.

Tip mreže	Vrsta KE	Velikost KE	Računski čas [s]	Razmerje računskega časa	Največja sila[kN]	Razmerje napake glede na tip KE
Mesh1	C3D4	30	3	1	46	/
Mesh1	C3D10	30	48	16	28	66
Mesh2	C3D4	25	4	1	42	/
Mesh2	C3D10	25	63	21	27	56
Mesh3	C3D4	20	7	2	38	/
Mesh3	C3D10	20	114	38	26	47
Mesh4	C3D4	15	7,5	3	36	/
Mesh4	C3D10	15	139	46	26	40
Mesh5	C3D4	10	15	5	32	/
Mesh5	C3D10	10	229	76	24	33
Mesh6	C3D4	5	98	33	30	/
Mesh7	C3D10	od 20 do 10	150	50	24	/

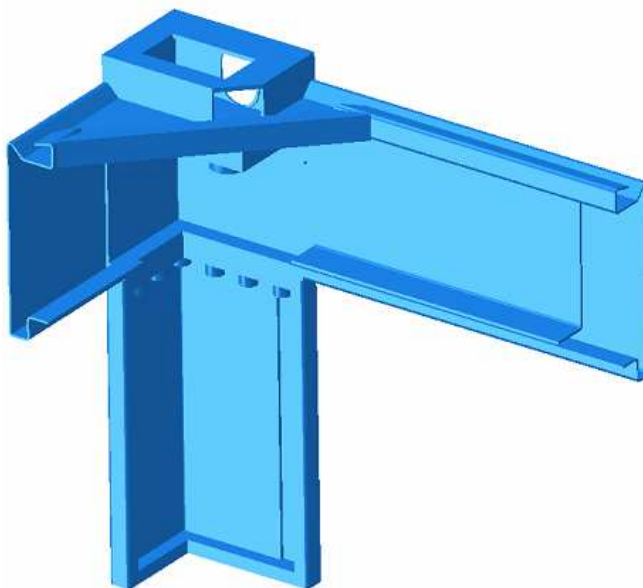
Preglednica 3 prikazuje potrebni računski čas analize pri različnih tipih in različni velikosti končnih elementov, oziroma gostoti mreže končnih elementov. Računski čas posamezne analize smo normirali na najhitrejši izračun posamezne analize. Najkrajši čas analize je bil pri uporabi mreže "Mesh1" in končnih elementih tipa C3D4. V povprečju so bili končni elementi veliki 30 mm, kot je razvidno iz slike 31. Pri enaki gostoti mreže končnih elementov in tipu C3D10, je analiza potekala kar 16 krat dalj časa, kot analiza z elementi C3D4. Tudi model se je povsem drugače obnašal pri uporabi končnih elementov tipa C3D4 kot pri elementih tipa C3D10. Različne odzive lahko vidimo na grafu 8, saj se končne vrednosti maksimalnih sil razlikujejo kar za 66 %. Že pri prvi primerjavi analiz lahko sklepamo, da moramo za realne podatke uporabiti končne elemente tipa C3D10. Mrežo končnih elementov tipa C3D4, smo morali zmanjševati do velikosti 5 mm, da smo se vsaj približali vrednostim dobljenimi s končnimi elementi tipa C3D10 in velikosti mreže 30 mm. V tem primeru se nam poveča tudi računski čas, zato je bolje, da se v analizah uporabljajo končni elementi tipa C3D10, gostota mreže pa je lahko manjša, med 10-20 mm za končni element. Ugotovili smo namreč, da je najbolj ugodno zmanjševanje mreže okoli mest, kjer pričakujemo velike spremembe med potekom analize. To je na mestih, kjer pričakujemo koncentracijo napetosti, oziroma izrazito nelinearno obnašanje. S tem zmanjšamo število končnih elementov, potrebo po boljši strojni opremljenosti in podaljšanju računskega časa posamezne analize. Ugoden odziv analize s sprejemljivo gostoto končnih elementov in tipom C3D10 vidimo na grafikonu 8, krivulja "Mesh7-C3D10-VARIACIJA". V nadaljevanju bomo zato uporabili ta način kreiranja velikosti mreže in tipa končnih elementov.

Grafikon 8: Odziv analize numeričnega modela v odvisnosti od izbire tipa končnih elementov in velikosti mreže v programu ABAQUS.



4.5 Modeliranje vogalnika v programu ABAQUS

Zaradi kompleksnosti spoja vogalnih elementov modularne enote je analitično težko izračunati potek napetosti v vogalniku, zato je potrebno za dokazovanje nosilnosti spoja uporabiti bolj napredne računalniške programe, ki omogočajo detajlne izračune na osnovi metode končnih elementov. Na vogalni element delujejo sile iz vseh treh strani, glede na zunanje ploskve vogalnika. Za simulacijo spojev vogalnih elementov vogalnika smo zato uporabili program ABAQUS.

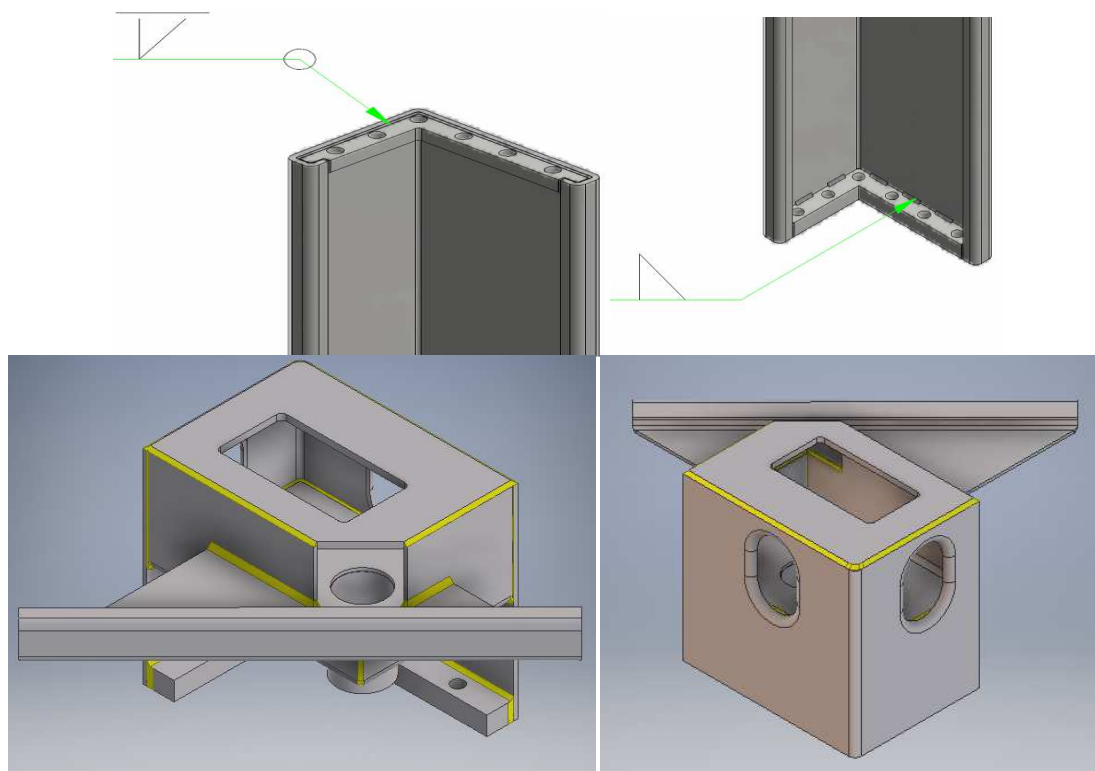


Slika 34: 3D model vogalnega stropnega elementa v programu ABAQUS, na katerega sta navarjena stropna profila in privijačen steber.

Elementi, ki se uporabljajo v modelu so lahko geometrijsko zasnovani tudi v drugih programih, ki omogočajo risanje ali modeliranje elementov. Program ima sicer kar velik nabor risarskega orodja, ki uporabniku omogoča, da naredi želeni element, ki ga nato analizira v programu. Pri modeliranju elementov smo uporabili Autodeskove programe AutoCAD2015 Mechanical in Inventor. Inventor omogoča zapleteno 3D modeliranje elementov, zmodelirane elemente pa smo nato izvozili v primeren format, ki ga prepozna tudi ABAQUS. Za izvoz elementa smo uporabili ".igs" zapis datoteke, ki smo jo nato uvozili v program ABAQUS. Tam smo elemente po potrebi dodatno obdelali. Določiti je bilo potrebno materialne karakteristike elementov, tip in gostoto mreže končnih elementov, in narediti potrebne relacije ali vplive med elementi v sestavu 3D modela. V program ABAQUS se lahko uvozi že narejene prečne prereze, ki so narejene v programu AutoCAD.

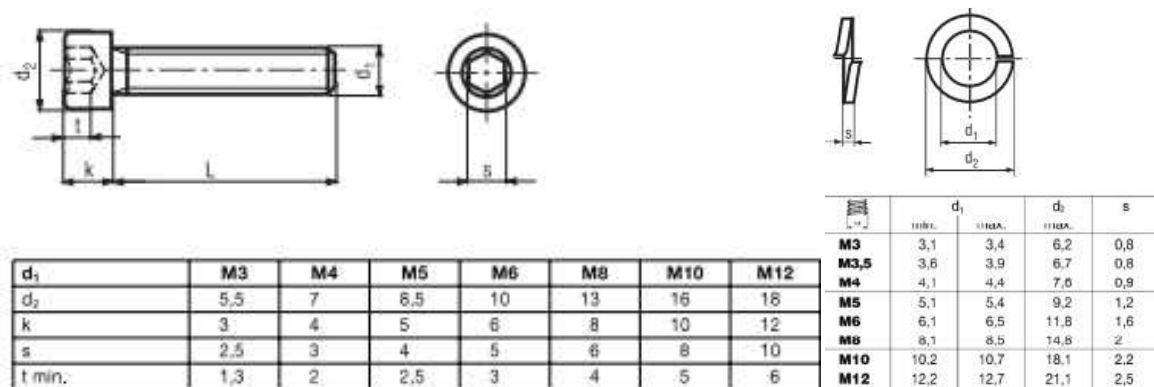
Pri modeliranju elementov vogalnega spoja se moramo čim bolj približati realnem stanju, vendar se s povečevanjem detajlov spoja povečuje kompleksnost modela in s tem potrebni računski čas, ki se porabi za numerično analizo. Tako se nismo ukvarjali z modeliranjem zvarov med priključnimi pločevinami stebrov in plaščem stebra ter zvarom med priključnimi pločevinami vogalnika in plaščem vogalnika. Med priključnimi pločevinami in plaščem je v obeh primerih narejen pobrušeni polovični

“v” zvar na zunanji strani, ki poteka po celotni kontaktni površini, in kotni zvar na notranji strani prirobnice (Slika 35). Slednji je pri stebru prekinjen zaradi naleganja vijakov, ki se vijačijo na vogalnik skozi luknje v priključne pločevine, pri vogalniku pa ne. Vogalnik je sestavljen iz rezanih pločevin, ki so med sabo zvarjeni z vodotesnimi “v” zvari na zunanji strani, in kotnimi zvari na notranji strani vogalnika. Ravno tako je stropni profil z vogalnikom spojen s pobrušenim “v” zvarom na zunanji strani, na notranji strani pa je narejen kotni var.



Slika 35: Delavniška risba na kateri je označen način varjenja priključne pločevine s plaščem stebra (zunanja stran- zgornja slika levo in notranja stran stebra-zgornja slika desno) ter 3D pogled na lokacije zvarov med pločevinami stropnega vogalnika (rumena barva).

Vijake M12x40 DIN912 smo v modelu poenostavili tako, da smo vijak modeliral kot dva valja, ki predstavljata navojni del vijaka in glavo. Navojni del je modeliran kot polni prerez brez navoja. Upoštevali smo premer vijaka skozi del kjer ni navoja, saj je predpostavljeno, da je celotna dolžina vijaka vijačena v navoj v priključni pločevini vogalnika. Naležno površino glave vijaka smo razširili za premer vzmetne podloške A12, DIN127, saj je premer glave vijaka manjši, kot je velik zunanji premer vzmetne podloške. Površina ploščine podloške je znana, zato lahko v modelu izmerimo, kako velike so kontaktne napetosti med podložko in priključno pločevino. Iz kontaktnih napetosti med podložko in priključno pločevino lahko nato izračunamo silo v posameznem vijaku, saj poznamo ploščino prereza vijaka.



Slika 36: Geometrijske karakteristike vijakov DIN912 in vzmetnih podložk DIN 127 (Maticamb).

Za realne rezultate numeričnega modela je bilo potrebno v modelu določiti pravilne vplive in relacije med elementi modela. Glede na to, kateri elementi so bili uporabljeni v modelu, je bilo potrebno pravilno definirati vplive med modeli. Določiti je bilo potrebno:

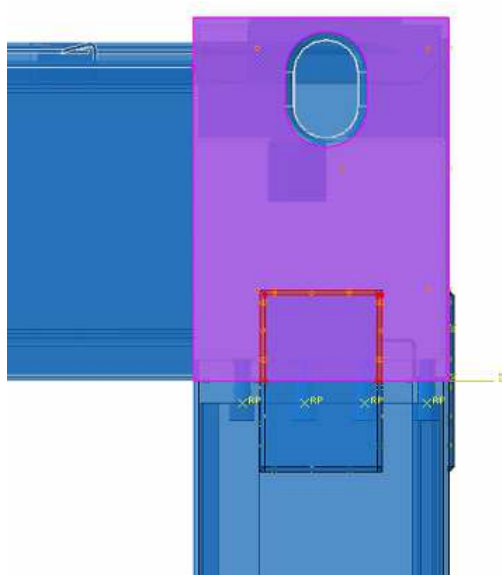
- kontaktne površine stebra z vijaki,
- stik vijakov z vogalnikom,
- sodelovanje ojačitev v stropnih profilih,
- ojačitvene ploščice na zunanji strani vogalnika in stebra,
- kontaktno površino med stebrom in vogalnikom.

Glava vijaka se na priključno pločevino stebra nalega preko vzmetne podložke. Med vzmetno podložko in priključno pločevino se tvori trenje, ki preprečuje zdrs glave vijaka. Koeficient trenja smo predpostavili glede na podatke, ki jih lahko dobimo v tehnični literaturi. Koeficient trenja med jeklom in jeklom se giblje od 0.15-0.5. Višji koeficienti trenja so pri površinah jekel, ki so neobdelana. V našem primeru so vsi elementi protikorozijsko zaščiteni z barvo, zato je predpostavljeno trenje med vzmetno podložko in priključno pločevino stebra 0.3, medtem ko je med priključno pločevino stebra in vogalnikom predpostavljeno trenje 0.15, saj sta obe površini barvani.

Navojni del vijaka, ki se vijači v priključno pločevino vogalnika, je togo vijačen v izrezan navoj v njej, zato se lahko v modelu površini stebra navoja in površini navoja v priključno pločevino združi in jim pripiše popolno sodelovanje obeh površin. Povezavo se v programu ABAQUS naredi s funkcijo "TIE", ki poveže prostostne stopnje definiranih površin vijaka in prirobnic. Na enak način se poveže ojačitev stropnega profila s stropnim profilom, ki sta v realnosti med seboj zvarjena s kotnimi zvari, na spodnji in zgornji strani ojačitve. Prekinjeni zvari so na predpisani medsebojni razdalji, tako da zagotavljajo popolno sodelovanje med njima. V modelu lahko predpostavimo, da so kontaktne ploskve ojačitve in stropnega profila med seboj popolnoma povezane in da med njima ne prihaja do zdrsa.

Bolj zapleteno je modeliranje stika ojačitvenih ploščic na zunanji strani vogalnika in stebra. Ploščice so namreč navarjene s kotnim varom po celotnem zunanem obodu. Če želimo spremljati dogajanje v

ploščicah je zato potrebno pravilno definirati interakcije med površinami, zato je potrebno definirati površine na ploščici, ki predstavljajo zware. Samo te površine nato združimo s površinami stebra in vogalnika, kot je prikazano na sliki 37 z rdečo barvo. Predpostavljeno je tudi, da ima zvar enake materialne karakteristike kot material, na katerega je element privarjen.



Slika 37: Definiranje kontaktne površine zvara na med ojačitvenimi ploščicami in stropnim vogalnikom.

Program ABAQUS omogoča različne načine podajanja obtežbe. Odločili smo se, da se obtežbo v numeričnem modelu nanaša v točki, ki je spojena s ploskvijo na koncu stropnega nosilca. Določimo lahko velikost obtežbe, hitrost nanašanja obtežbe na element in kako velik je njen prirast. Poleg tega lahko merimo pomike in zasuke v točki. Ta način je za numerično modeliranje primeren le do te mere, da vidimo, v katerih točkah je prišlo do plastifikacije materiala v spoju. Ko se material začne plastificirati, spoj ne nudi več enakega odpora, togost sistema se zmanjša, zaradi česar postane računski model nestabilen.

Lahko pa v model vsiljujemo pomik v izbrani točki, zraven pa merimo reakcijsko silo, ekvivalentno obtežbi, ki bi v nasprotnem primeru povzročila dani pomik.

V obeh primerih pa moramo zagotoviti take robne pogoje, da se pomik in rotacija elementov izvaja v želeni smeri. Elemente moramo bočno podpreti zato, da ne pride do odklona točke, saj tako ne bi dobili želenega obnašanja sistema.

Celoten sistem je ob vznožju stebra togo vpet, tako da lahko spremljamo razvoj momenta, ki se nam formira v spoju. Vertikalna reakcija mora biti enaka reakcijski sili, ki jo merimo v točki.

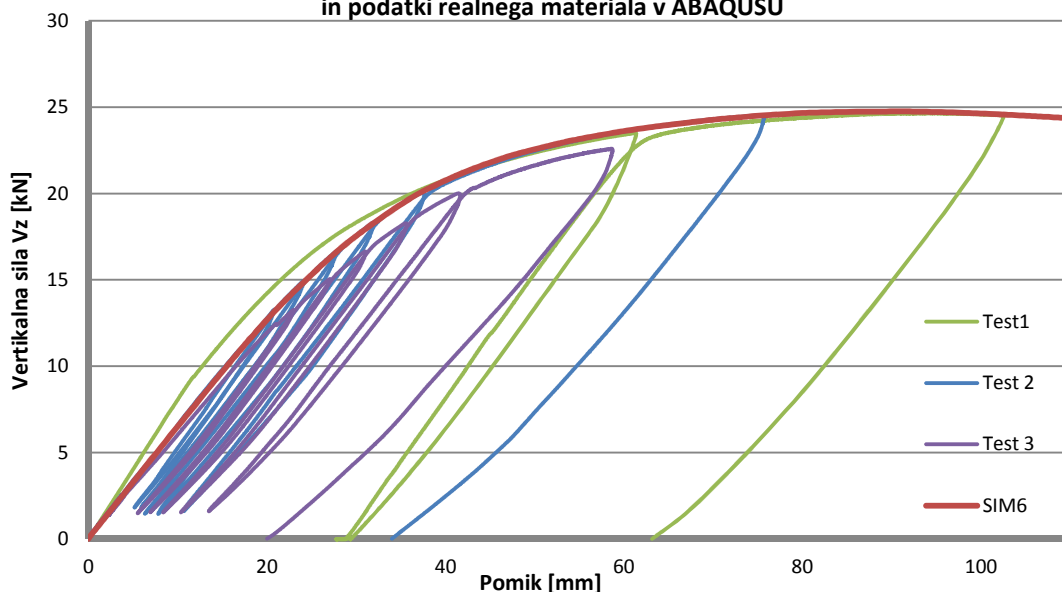
5 VERIFIKACIJA NUMERIČNEGA MODELA Z REZULTATI TESTA

5.1 Primerjalna analiza modela v ABAQUS-u z rezultati testa

Ko smo uspešno zasnovali model v programu ABAQUS, z vsemi robnimi pogoji, obtežbo, izbiro mreže končnih elementov in materialom, smo lahko primerjali rezultate numeričnih simulacij z rezultati testov na ZAG-u. Primerjava služi umeritvi numeričnega modela z rezultati testov. Na grafikonu 9 vidimo rezultate numerične simulacije v programu ABAQUS (rdeča krivulja-SIM6) z rezultati treh testov. Kot smo že omenili, so se obremenitve na testu izvajale ciklično. Želeli smo dobiti podatek o velikosti plastične deformacije vzorcev, ko preidemo v področje plastifikacije materiala. V programu ABAQUS smo simulirali le obremenjevanje vzorca do porušitve. Mejo plastifikacije lahko določimo iz spremembe naklona krivulje na grafikonu 9. Vidimo, da se rezultati izjemno dobro ujemajo z rezultati testov.

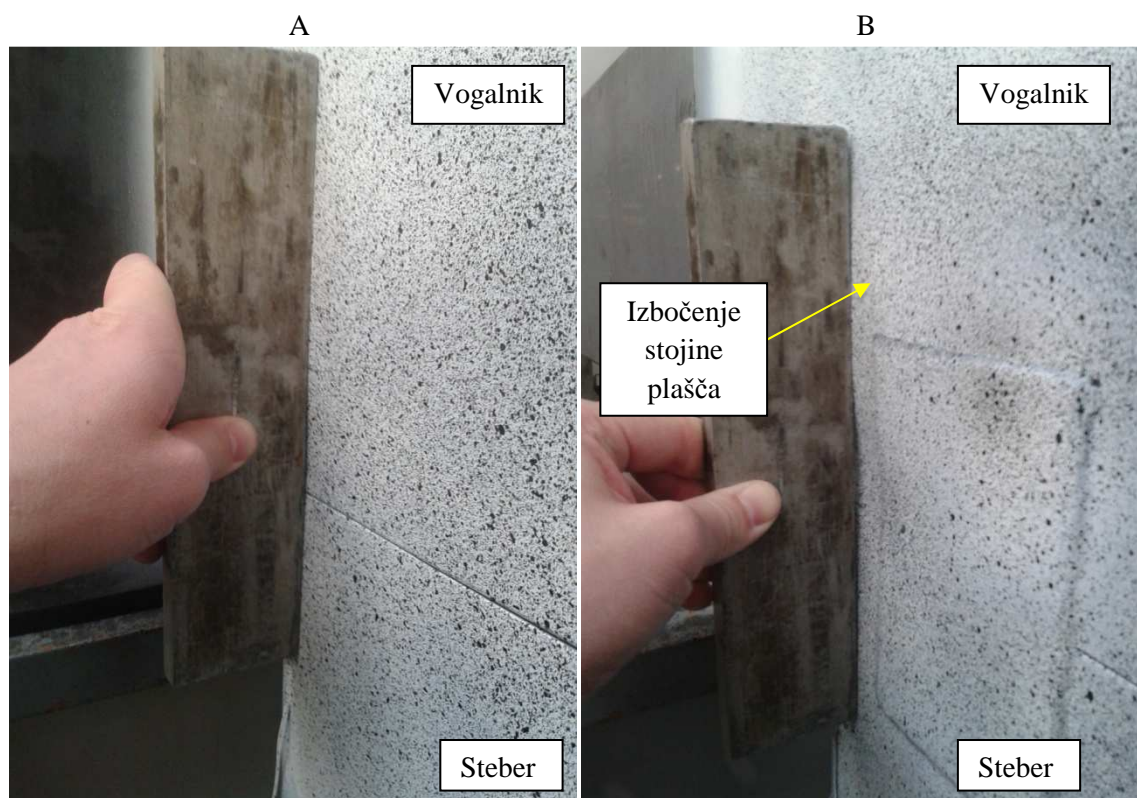
Začetna togost vzorcev testov 2 in 3 se popolno ujemata z numerično analizo SIM6 do 10 kN obremenitve, kasneje pa se rezultati testa 3 odklonijo od linije numeričnih rezultatov, medtem ko rezultati testa 2 sovpadajo do obremenitve 24 kN. Se pa zelo razlikujeta liniji rezultatov testa 1 in numerični izračun SIM6. Linija testa 1 ima večji naklon kot linija numeričnega izračuna. Razliko vrednosti lahko pripišemo boljši kvaliteti izdelave vzorca 1 kot vzorca 2 in 3, zaradi česar ima boljše obnašanje v začetni fazi obremenjevanja. Smo pa vzorec testa 1 obremenjevali z drugačno ciklično obremenitvijo, kot ostala dva testna vzorca, vendar to verjetno ni razlog za večji naklon linije podatkov v začetnem delu. Tudi nosilnost testnih vzorcev sovpada z rezultati numerične analize vzorcev. Ker se vzorca testov 2 in 3 nista obremenjevala vse do porušitve, lahko predpostavimo, da bi bila vrednost končne "porušne" sile podobno velika kot pri testu 1.

Grafikon 9: Primerjava rezultatov testa z numeričnimi simulacijami v programu ABAQUS.
**Primerjava rezultatov testa vogalnega elementa na ZAG-u z bilinearno analizo
in podatki realnega materiala v ABAQUSU**



Izredno podobnost rezultatov lahko vidimo tudi na sliki 38, ki prikazuje deformacijo vogalnika po končanem testu in deformacijo numeričnega modela na desni sliki 39. Na obeh slikah se lepo vidi, da pride do izbočenja pločevine vogalnika. Na tem mestu se pojavijo velike tlačne obremenitve, zaradi momenta, ki je posledica vertikalne sile V_z na koncu prečke. Poleg tega se na tem mestu spremeni geometrija. Iz slik 31 in 34 je razvidno, da ima stropni profil, debeline 3 mm, uvarjeno ojačitev, debeline 4 mm. Oba elementa sta nato privarjena na stojino vogalnika, ki pa meri 6 mm ter je dodatno tlačno obremenjena na delu stebra. Steber ima plašč debel 6 mm, na katerega je nato privarjen kotnik, debeline 5 mm, na notranji strani stebra. Omeniti je potrebno tudi, da so vsi elementi vogalnika narejeni iz pločevin S235JR, medtem ko je stropni profil narejen iz jekla S355MC, ojačitev stropnega profila iz jekla S355JR, kot tudi steber in ojačitev v stebri.

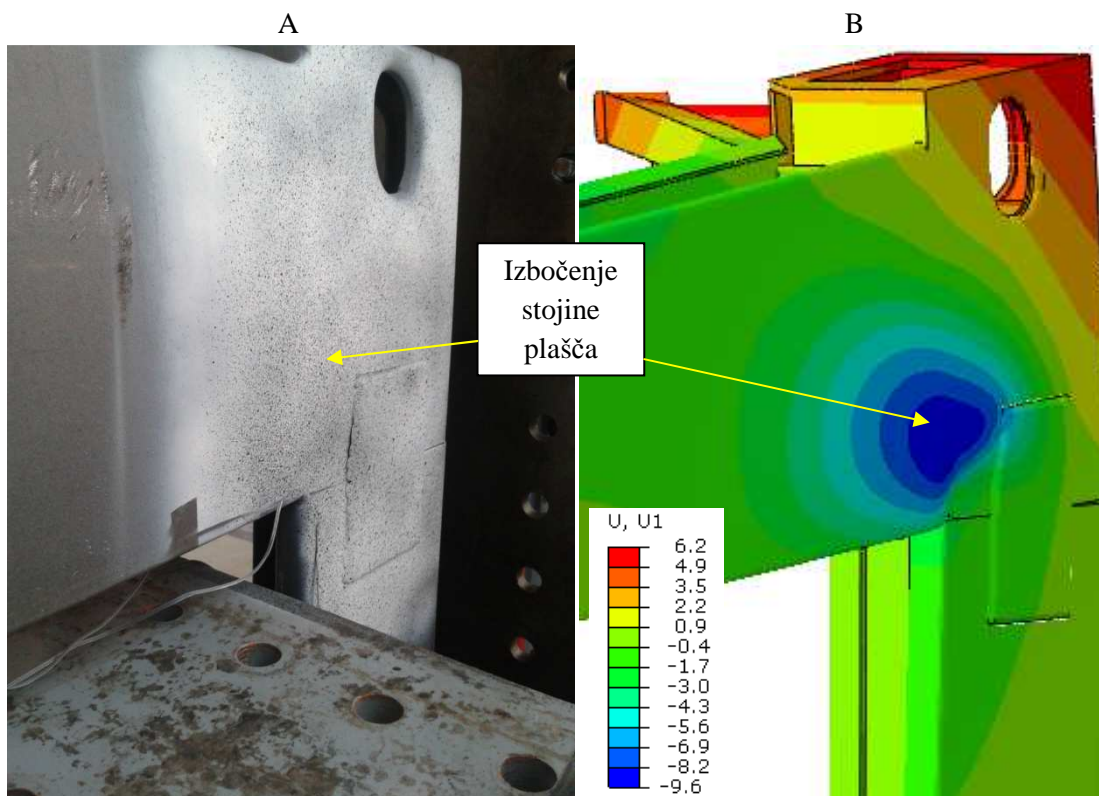
Iz zgornjih podatkov lahko torej ugotovimo, da je deformacija stojine vogalnika posledica uklona in manjšega prečnega prereza nosilnih elementov. Na mestu uklona se spremeni tako debelina stojine, kar zmanjša togost elementa, kot tudi nosilnost zaradi uporabe materiala nižje trdnosti. Sklepamo lahko, da bi se vogalni element bolje obnašal, če bi bil narejen iz debelejšega materiala, dodatno ojačan, ali pa narejen iz materiala višjega trdnostnega razreda. Poleg tega je vogalnik najbolj obremenjen del konstrukcije, z veliko momentno obremenitvijo, prečno silo in osno silo. Stropni nosilec obremenjujeta moment in prečna sila, medtem ko je steber obremenjen z osno silo in momentom.



Slika 38: A- Nedeformiran vzorec testa; B- Deformiran vzorec po zaključku testa.

Na sliki 38B vidimo velikost deformacije plašča stojine vogalnega elementa. Na prvi pogled je težko opaziti deformacijo plašča, zato smo zaradi lažje predstave, o velikosti deformacije, prislonili na plašč ravno jekleno ploščico vzorca pred testom in vzorca po zaključenem testu. Ploščica na sliki 38A, s celotno ploskvijo nalega na zunanjo ploskev stojine vogalnika in zunanjo stran plašča stebra. Po deformaciji zunanja ravnina ploščice in plašča nista več vzporedno ravni, saj se zunanja stojina vogalnika izboči. Ploščica na vzorec ne nalega več s celotno površino, nalega le na izbočeni del plašča vogalnika na sredini, na spodnjem delu pa se nasloni na steber. Deformacija vzorca je prikazana na sliki 38B, kjer je na plašč prislonjena jeklena ploščica.

Premik pločevine izven svoje prvotne "nedeformirane" ravnine je tako velik, da je prišlo do odstopanja vara navarjene ojačitvene ploščice od plašča vogalnika vogalnika. Sklepamo lahko tudi, da var ni bil izveden kvalitetno, saj se je odlepil od površine, kar pa ni v redu. Material med varjenjem ni bil pretopljen, zaradi česar se je var enostavno odlepil od površine. Ojačitvena ploščica se je zaradi izbočenja stojine ukrivila. Enak odziv smo dobili s simulacijo SIM6. Tudi pri numeričnem modelu je prišlo do bočne zvrnitve stojine vogalnika na enakem delu kot pri realnem testu. Na sliki 39B se vidi rob ploščice, ki sledi izbočitveni liniji stojine in velikost pomika v posamezni točki, ki pri tem nastane. Da bi preprečili izbočenje, bi morala biti stojina debelejša, še večji učinek pa bi dosegli s pravokotnimi ojačitvami na notranji strani vogalnika, ki bi preprečevale uklon stojine v tlaku.



Slika 39: A- Deformirana oblika testnega vzorca; B- Deformirana oblika in pomik (mm) v pravokotni smeri glede na ravnino plašča modela vzorca v programu ABAQUS pri dvakratni povečavi.

5.2 Analitična kontrola rezultatov numerične analize

5.2.1 Kontrola in določanje razreda kompaktnosti prečnih prerezov elementov modela

5.2.1.1 Kompaktnost stropnih elementov

Stropni nosilec je sestavljen iz dveh, med sabo zvarjenih elementov. Elementa sta zvarjena s kotnim varom $a=3$ mm, dolžine 5 cm, na medsebojni razdalji 30 cm. Stojini zvarov nista medsebojno zvarjeni, zato je potrebno določiti razred kompaktnosti za vsak element posebej. Elementi so narejeni iz hladno oblikovane pločevine, zato lahko sklepamo, da spadajo elementi v 3. ali 4. razred kompaktnosti. Če so elementi v 4. razredu kompaktnosti, pomeni, da so vitki. Pri takih prerezih je potrebno za analitične izračune določiti nadomestne karakteristike prerezov. Odločili smo se, da bomo preverili stojine profilov na čisti upogib po enačbi (11), tlačene pasnice pa na čisti tlak, z enačbo (12). Faktor "ε" izračunamo z enačbo (13) in za jekla S235 znaša 1. Z večanjem trdnostnega razreda se velikost faktorja zmanjšuje, tako da je vrednost "ε" za jekla S355 enak 0,81.

$$\text{KONTROLA STOJINE NA UPOGIB:} \quad c_w / t_w \leq 124\varepsilon \quad (11)$$

$$\text{KONTROLA PASNICE NA ČIST TLAK:} \quad c_f / t_f \leq 14\varepsilon \quad (12)$$

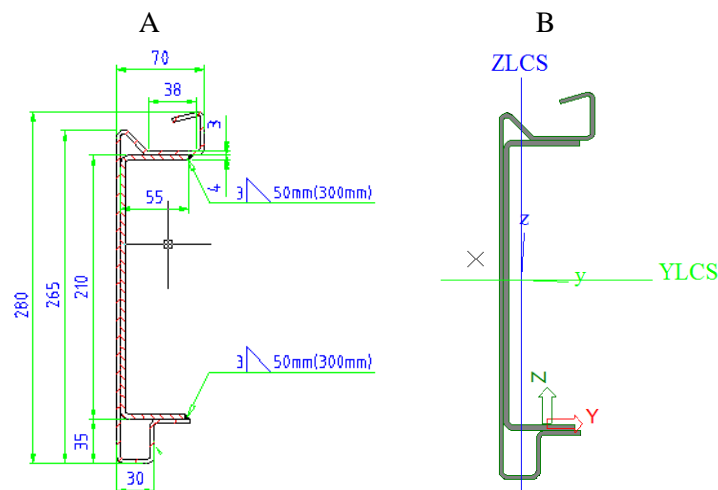
$$\varepsilon = \sqrt{235 / f_y} \quad (13)$$

LEGENDA: - c_w ... uklonska višina stojine

- c_f ... uklonska višina pasnice

- t_w ... debelina stojine

- t_f ... debelina pasnice



Slika 40: A-Geometrija sestavljenega stropnega profila z uvarjeno ojačitvijo; B-Izračun geometrijskih karakteristik s programom Scia Engineer.

5.2.1.1.1 Stropni profil

Uklonska višina stojine stropnega profila "c_w" znaša 259 mm, debelina profila pa 3 mm. Ker je profil nenavadne in nesimetrične oblike, je težko določiti del pasnice, ki je najbolj problematičen. Merodajni je zgornji, ravninski del profila, saj je tam največja možna uklonska dolžina pasnice, "c_f" tako znaša 38 mm.

KONTROLA STOJINE NA UPOGIB: $259\text{mm} / 3\text{mm} = 86,3 \leq 124 \cdot 0,81 = 100,44$

KONTROLA ZGORNJE PASNICE NA ČIST TLAK: $38\text{mm} / 3\text{mm} = 12,6 \leq 14 \cdot 0,81 = 11,34$

KONTROLA SPODNJE PASNICE NA ČIST TLAK: $24\text{mm} / 3\text{mm} = 8 \leq 14 \cdot 0,81 = 11,34$

Ugotovili smo, da je stojina profila v 3. razredu kompaktnosti, medtem ko je zgornja pasnica vitka in spada v 4. razred kompaktnosti. Pri tem smo pri preračunu predpostavili, da je zgornja pasnica na eni strani vpeta, nasprotni rob pa je prost. V resnici pa ostali del pasnice dodatno stabilizira pasnico, ki na prostem delu nudi dodatno togost. Togost se ponazori s pomočjo vzmeti. Kljub temu pa zgornji del pasnice v modelu ni v tlaku, zato pri analitičnem preračuna nosilnosti ni potrebno uporabiti nadomestne karakteristike prečnih prerezov. Odšteti bi morali del pasnice, ki se izboči in ne prispeva k nosilnosti. Spodnja pasnica pa je v 3. razredu kompaktnosti. Ker je naš model upogibno obremenjen in je spodnja pasnica v tlaku, zgornja pa v nategu, v tem primeru celotni prečni prerez sodeluje pri nosilnosti. Težava bi se pojavila, če bi momentna obremenitev delovala v nasprotni smeri, takrat bi bila vitkosti pasnice pomembna, saj bi v nasprotnem primeru imeli težave z nestabilnostjo.

5.2.1.1.2 Ojačitev stropnega profila

Uklonska višina ojačitve stropnega profila "c_f" znaša 202 mm, medtem ko je debelina profila 4 mm. Profil je enojno simetričen preko "y" osi, zato sta zgornja in spodnja pasnica enaki. Uklonska dolžina "c_f" znaša 51 mm.

KONTROLA STOJINE NA UPOGIB: $202\text{mm} / 4\text{mm} = 50,5 \leq 124 \cdot 0,81 = 100,44$

KONTROLA ZGORNJE PASNICE NA ČIST TLAK: $51\text{mm} / 3\text{mm} = 12,8 \leq 14 \cdot 0,81 = 11,34$

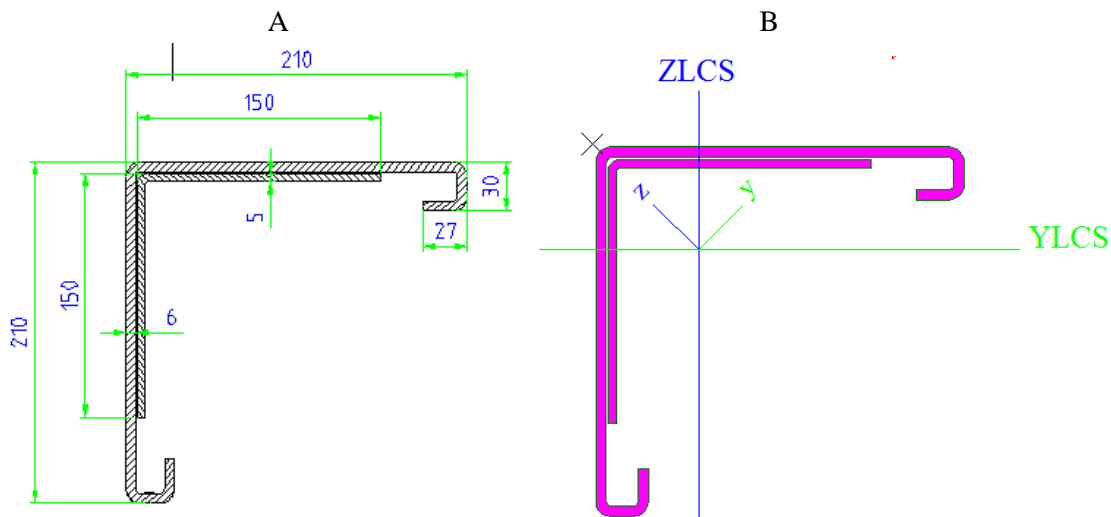
Ugotovili smo, da je stojina ojačitve profila v 3. razredu kompaktnosti, medtem ko sta pasnici vitki in spadta v 4. razred kompaktnosti.

Če bi obremenjevali samo ojačitev stropnega profila, bi se del tlačene pasnice uklonil, vendar kot vidimo na sliki 40A, sta ojačitev in stropni profil zvarjena skupaj preko pasnic ojačitve stropnega profila. Tako se zmanjša tudi uklonska dolžina tlačene pasnice stropnega profila. Lahko predpostavimo, da oba profila sodelujeta kot sestavljen nosilec in da pri prenosu obremenitve sodeluje

celotni prečni prerez. Tudi v primeru izračuna kompaktnosti pasnice ojačitve, smo se zaradi poenostavitve izračuna uporabili poenostavitve in smo predpostavili, da je en rob pasnice vpet, nasprotni pa prost.

5.2.1.1.3 Plašč stebra

Prečni prerez stebra je enojno simetričen. To se odraža tudi v zasuku lokalnih koordinatnih osi z in y za kot 45° , kot vidimo na sliki 41B. Primarno je steber obremenjen z upogibnim momentom okoli "ZLCS" ali "YLCS" in osno silo. Zato težko določimo kolikšen del prereza je tlačno obremenjen, kolikšen del prereza pa natezno. Kontrolo kompaktnosti stojine stebra preverimo zato na čisti tlak po enačbi (14), saj smo tako na varni strani. Pasnice plašča stebra kontroliramo le na tlak.



Slika 41: A-Geometrijske sestavljenega stebra z ojačitvijo; B-Izračun geometrijskih karakteristik s programom Scia Engineer.

KONTROLA STOJINE NA ČISTI TLAK: $c_w / t_w \leq 42\varepsilon$ (14)

KONTROLA STOJINE NA ČISTI TLAK: $198\text{mm} / 6\text{mm} = 33 \leq 42 \cdot 0,81 = 34,02$

KONTROLA PASNICE NA ČISTI TLAK: $21\text{mm} / 3\text{mm} = 3,5 \leq 14 \cdot 0,81 = 11,34$

Tako pasnica kot stojina plašča stebra sta v 3. razredu kompaktnosti.

5.2.1.1.4 Ojačitev plašča stebra

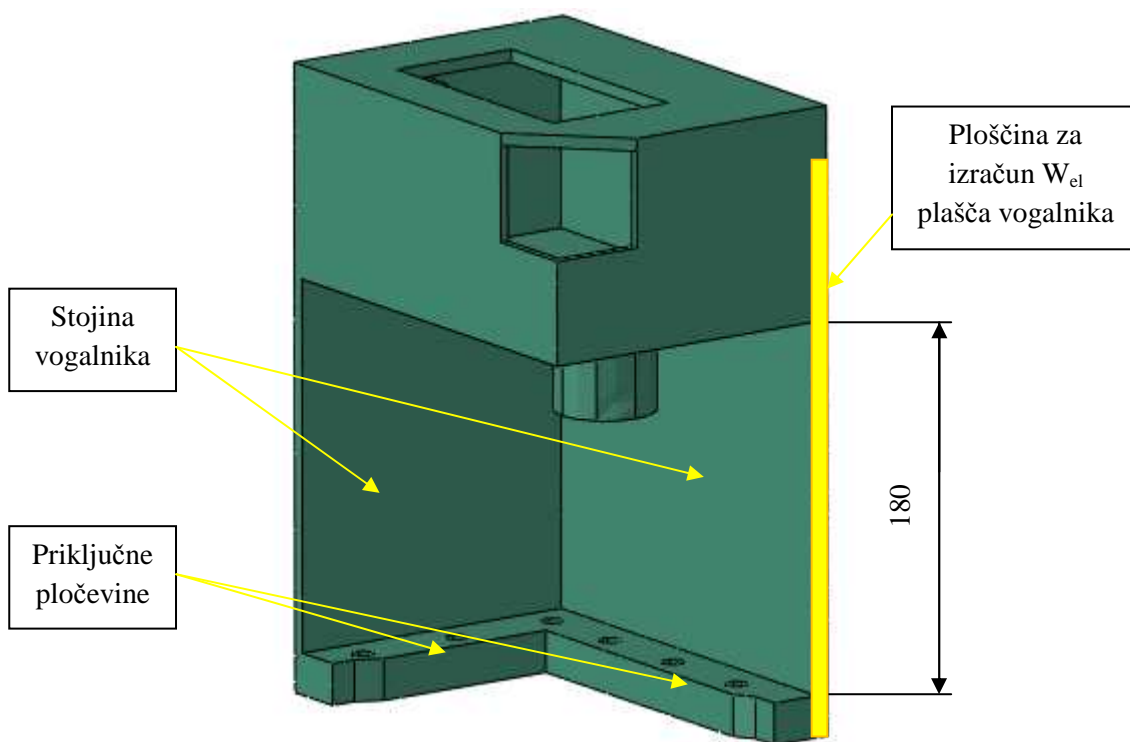
Debelina ojačitve stebra znaša 5 mm in je kot steber enojno simetrična ter ima obliko kotnika. Kompaktnost ojačitve preverimo na čisti tlak. Vzamemo kontrolo, ki je predpisana za stojino po enačbi (14)

KONTROLA STOJINE NA ČISTI TLAK: $144\text{mm} / 6\text{mm} = 24 \leq 42 \cdot 0,81 = 34,02$

Ojačitev stebra je v 3. razredu kompaktnosti.

5.2.1.1.5 Stojina plašča vogalnika

Vogalni element je sestavljen iz pločevin različnih debelin. Ne preverjamo kompaktnost vseh pločevin, saj niso vsi deli vogalnika nosilni. Preverimo le kompaktnost stojine, priključnih pločevin ne kontroliramo, saj so zaradi svojih dimenzij izjemno kompaktni. Uklonska dolžina stojine plašča znaša 180 mm, debelina pa 6 mm. Vogalnik je v horizontalni smeri, preko stropne prečke, obremenjen z momentom, v vertikalni smeri pa z osno silo. Zaradi kompleksne geometrije je težko določiti lokacijo nevtralne osi, posledično pa tudi kolikšen del prereza stojine je obremenjen tlačeno. Da bomo na varni strani, se tako kot pri plašču stebra, odločimo za kontrolo kompaktnosti na čisti tlak po enačbi (14).



Slika 42: Geometrija sestavljenega vogalnika s sestavnimi elementi.

KONTROLA STOJINE NA ČISTI TLAK: $180\text{mm} / 6\text{mm} = 30 \leq 42 \cdot 0,81 = 34,02$

Stojina plašča stebra je v 3. razredu kompaktnosti. Kot smo že omenili, kompaktnost ostalih elementov nismo preverjali, saj imajo manjše uklonske dolžine. Zaradi tega lahko predpostavimo, da so tudi ostali deli v 3. razredu kompaktnosti.

5.2.2 Analitični preračun odpornosti

Na prejšnjih straneh smo ugotovili, da je večina nosilnih elementov v 3. razredu kompaktnosti, zato lahko naredimo elastično analizo največje nosilnosti posameznega elementa na upogibno obremenitev. Odpornost elementov se izrazi z elastičnim odpornostnim momentom W_{el} . Zaradi kompleksne geometrije elementov, smo za preračun karakterističnih vrednosti uporabili program Scia Enginir 15. Geometrijske karakteristike smo lahko določili le za linijske elemente, za vogalni element pa smo del, ki je upogibno obremenjen, določili, glede na geometrijo stropnega profila, ki je privarjen na stropni vogalnik. Stropni profil se namreč na tem delu priključuje na plašč vogalnika, preko katerega se prenaša obremenitev, ki jo mora plašč vogalnika prevzeti. Plašč je debel 6 mm, na spodnjem delu je nanj navarjena debela priključna pločevina širine 25 mm in debeline 20 mm, na zgornjem pa se vogalnik razširi zaradi skodelice v stropu. Na sliki 42 je z oranžno barvo označeno območje, na katerega je privarjen stropni profil z ojačitvijo. Višina tega dela je enaka višini zunanje stojine stropnega profila in znaša 265 mm. Elastični odpornostni moment prečnega prereza pravokotnika izračunamo z enačbo (15).

$$W_{el} = \frac{h^2 \cdot b}{6} \quad (15)$$

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_y}{y_{M0}} \quad (16)$$

Izračunali smo, kolikšen je največji moment (Preglednica 4), ki ga posamezni element lahko prenese. Največjo momentno obremenitev smo izračunali po enačbi (16). Kot smo videli na sliki 39A, so se testni vzorci porušili na stiku stropnega profila in vogalnika. Podobne rezultate smo dobili tudi z numerično analizo SIM6 z metodo končnih elementov v programu ABAQUS-u. Zaradi lažje primerjave smo največji moment izrazili s silo. Moment smo delili z ročico od mesta vertikalne sile V_z , do mesta stojine. Ta znaša 1,4 m.

Preglednica 4: Elastični odpornostni moment, največji moment in največja sila na meji tečenja.

/	W_{el} [cm ³]	f_y [kN/cm]	M_{RD} [kNm]	F_{ED} [kN]
Stropni profil z ojačitvijo	143	35,5	51	36
Stropni profil brez ojačitvijo	93	35,5	33	24
Stojina plašča	70	23,5	17	12
Steber	156	35,5	55	40

Dobljeni podatki v tabeli 4 nakazujejo, da ima najmanjšo upogibno nosilnost stropni plašč vogalnika. Ostali elementi jo imajo vsaj trikrat višjo in bi zaradi tega lahko element obremenili z višjo prečno silo na koncu stropnega nosilca. Plašč vogalnika bi bilo potrebno ojačati, da bi bil celoten nosilni sistem boljše izkoriščen. Kot prvo bi bilo potrebno plašč izdelati iz materiala višje trdnosti. Uporabiti bi morali vsaj jeklo S355JR, da bi imeli material enake trdnosti, kot steber in stropni profil. Nosilnost bi lahko povečali tudi z večjo debelino vogalnika, dodatnimi ojačitvenimi rebri in diagonalami v stojini.

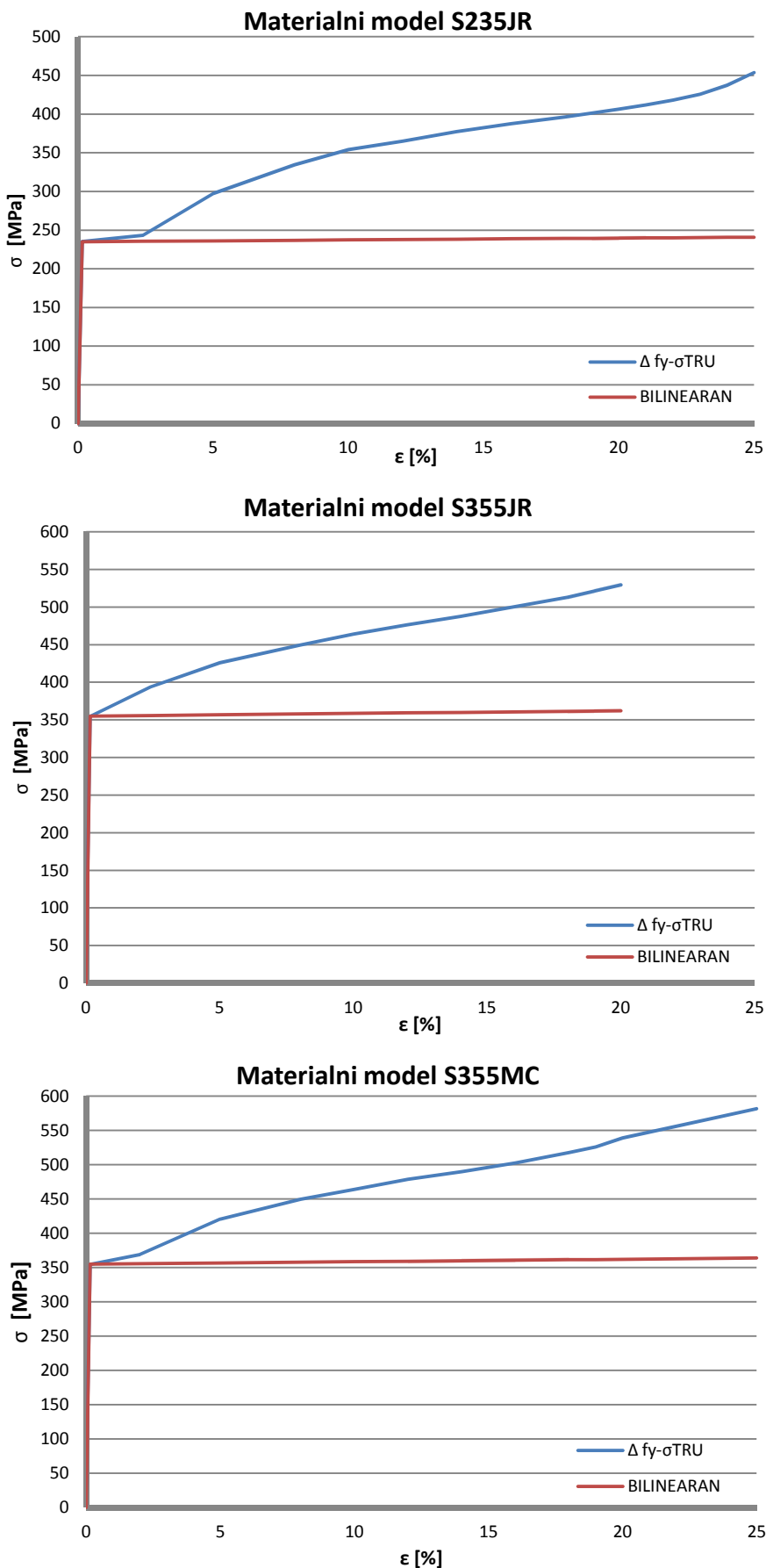
5.3 Vpliv osne sile na nosilnost sistema in vpliv materialnega modela v ABAQUS-u

Testni vzorci, ki so bili testirani na ZAG-u, so bili obremenjeni z osno silo na vrhu stebra in prečno silo na koncu stropnega profila. Ker so bili testni vzorci sočasno obremenjeni z osno in prečno silo, je vpliv posamezne obremenitve na deformiranje stojine stropnega vogalnika težko ovrednotiti, saj se je med izvajanjem testa meril le pomik na koncu stropnega profila. S simulacijo testa v programu ABAQUS pa lahko ovrednotimo, kako velik vpliv ima posamezna obremenitev na odziv modela.

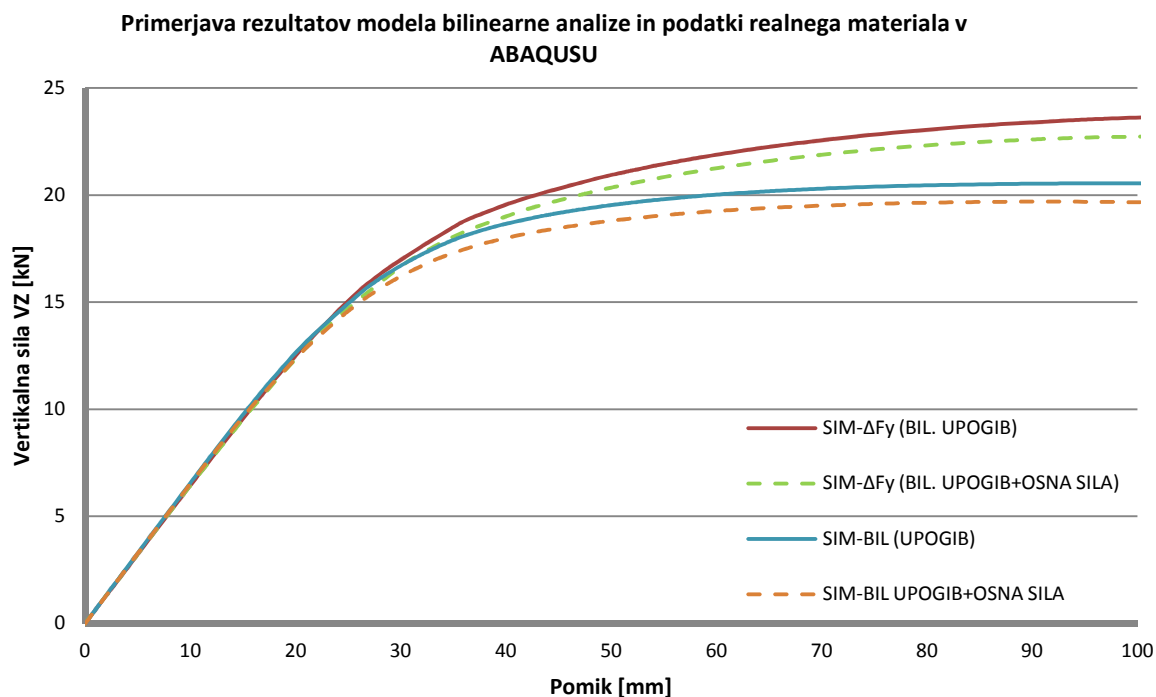
Ravno tako so nas zanimali rezultati analiz, če za materialni model uporabimo bilinearne podatke z utrditvijo materiala, ali pa realne diagrame, ki smo jih pridobili z enoosnim nateznim preizkusom. Da bi lahko ustrezno primerjali dobljene rezultate med bilinearnim in realnim materialnim modelom, je potrebno poenotiti napetost, pri kateri pride do tečenja materiala. Pri enoosnem nateznem preskusu smo namreč izmerili, da do tečenja materiala pride pri višjih napetostih. Zato moramo napetosti, ki sledijo po f_y , zmanjšati za razliko med napetostjo tečenja, dobljenih pri enoosnem nateznem preizkusu in karakteristično natezna trdnost materiala. To razliko smo poimenovali Δf_y . Pri jeklu S235JR ta razlika znašala 65 MPa, pri jeklih S355JR in S355MC pa smo morali napetosti zmanjšati za 30 MPa. Enoosni natezni preizkus jekla S235JR je namreč pokazal, da začne material teči pri napetosti 300 MPa, pri jeklih S355JR in S355MC pa pri 385 MPa. Seveda pa je krivulja utrjevanja materiala pri enoosnem nateznem preizkusu drugačna, kot je "premica" pri bilinearnem diagramu z utrditvijo.

Na grafikonih 10 so prikazani korigirani materialni modeli za posamezni tip jekla in bilinearni potek napetosti, ki so odvisne od velikosti deformacij. Vidimo, da so napetosti materiala do meje plastičnega tečenja enake, kasneje pa se vrednosti modelov razlikujejo. Kakšen vpliv imajo različni materialni modeli na obnašanje modela v programu ABAQUS, vidimo na grafikonu 11. Materialne modele smo primerjali na enaki geometriji modela, ki ga lahko vidimo na sliki 34.

Grafikon 10: Bilinearni materialni model z ugotovitvijo in korigirani materialni model, korigiran "Δfy".



Grafikon 11: Primerjava rezultatov numeričnih simulacij ob uporabi različnih materialnih podatkov in obremenitev.



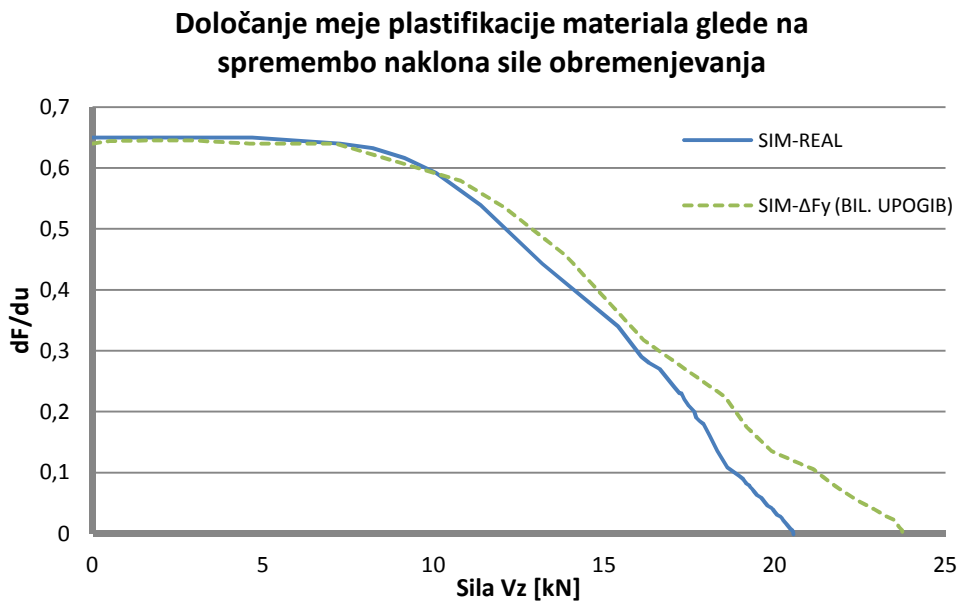
Na grafikonu 11 je prikazana razlika med dobljenimi rezultati analiz, če uporabimo realno utrjevanje materiala (SIM- ΔF_y) namesto bilinearne (SIM-BIL). Odziv modela je do meje plastifikacije linearen in enak pri obeh tipih modela. Po začetku plastifikacije prirastek sile ni več linearen glede na prirastek pomika. Preidemo v nelinearen del obremenjevanja, saj se velikost prirastka sile v vsakem naslednjem intervalu zmanjša, velikost pomika pa se poveča. Podoben odziv dobimo tudi pri simulaciji modela z realnim utrjevanjem materiala (SIM- ΔF_y), s to razliko, da je naklon krivulje strmejši, kot pri bilinearne podatkih materialnega modela. Pri modelih, kjer je bil uporabljen realni model utrjevanja materiala smo dosegli višjo maksimalno silo pri 100 mm pomika, ta je bila višja za 3 kN. Z modelom realnega utrjevanja dosežemo višje nosilnosti, vendar na nosilnost modela v nelinearnem območju vplivajo tudi drugi dejavniki (geometrija, konice napetosti, robni pogoji,...), ki pa jih težko opišemo z numeričnimi metodami.

Zanimal nas je tudi prispevek vpliva osne sile na deformiranje vzorca. Prispevek je v primerjavi z momentno obremenitvijo, ki je odvisen od vertikalne prečne sile, minimalen v začetnem, linearnem delu grafa. Večji prispevek k deformiranju modela ima osna sila v delu, kjer se nam sistem začne nelinearno odzivati na obtežbo. Vidimo torej, da se model plastificira predvsem zaradi momentne obremenitve, osna sila v nelinearnem delu le pripomore k manjšemu odporu sistema.

Ugotovili smo, da do plastifikacije pride v plašču vogalnika. Plašč se tudi izboči iz svoje prvotne ravnine zaradi prevelike tlačne obremenitve v spodnjem delu plašča, ki je posledica momentne obtežbe. Slednji je v vertikalni smeri dodatno tlačno obremenjen tudi zaradi osne sile v stebru, ki po uklonu iz svoje nedeformirane lege ustvarja dodatni moment zaradi premika ravnine.

Silo, pri kateri se sistem plastificira, smo določili z odvajanjem rezultatov obremenjevanja sile po pomiku (dF/du). Iz grafikona 12 lahko razberemo, pri kateri sili se je začel sistem plastificirati. Kot vidimo, sta se oba modela, z realnim utrjevanjem materiala (SIM- ΔF_y) in model z bilinernim utrjevanjem (SIM-BIL), začela plastificirati pri 10 kN.

Grafikon 12: Določevanje meje plastifikacije glede na spremembo naklona sile obremenjevanja.



6 PARAMETRIČNA ANALIZA

6.1 Preliminarna analiza

Za boljše razumevanje obnašanje vogalnega elementa je potrebno poleg merjenega odziva modela na silo obremenjevanja in pomik, pregledati tudi plastificiranje elementa pri različnih stopnjah obremenitve. Na sliki 43 je prikazan časovni potek širjenja deformacije materiala pri povečevanju vertikalne sile V_z na koncu stropnega profila. Na vsakem koraku slik časovnega intervala, je slika na vzdolžni in zadnji strani vogalnika, kjer vidimo širjenje plastifikacije materiala s povečevanjem obremenitve.

Kot smo že povedali, je nosilni model sestavljen iz jekla, ki imajo različne napetosti plastičnega tečenja. Če želimo videti, v kateri točki modela pride do prve plastifikacije v materialu, je potrebno v programu ABAQUS uporabiti funkcijo "AC YIELD". Ta nam omogoča, da dobimo informacijo o prekoračitvi napetosti tečenja, ko je tako imenovana primerjalna napetost σ_{eq} večja od napetosti tečenja f_y . Primerjalno napetost se izračuna po enačbi (17) in ji drugače rečemo tudi Missesov pogoj tečenja. Vrednosti σ_1 , σ_2 in σ_3 so glavne napetosti glede na normale ravnin posamezne točke. Napetosti so od točke do točke različne.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]} \leq f_y \quad (17)$$

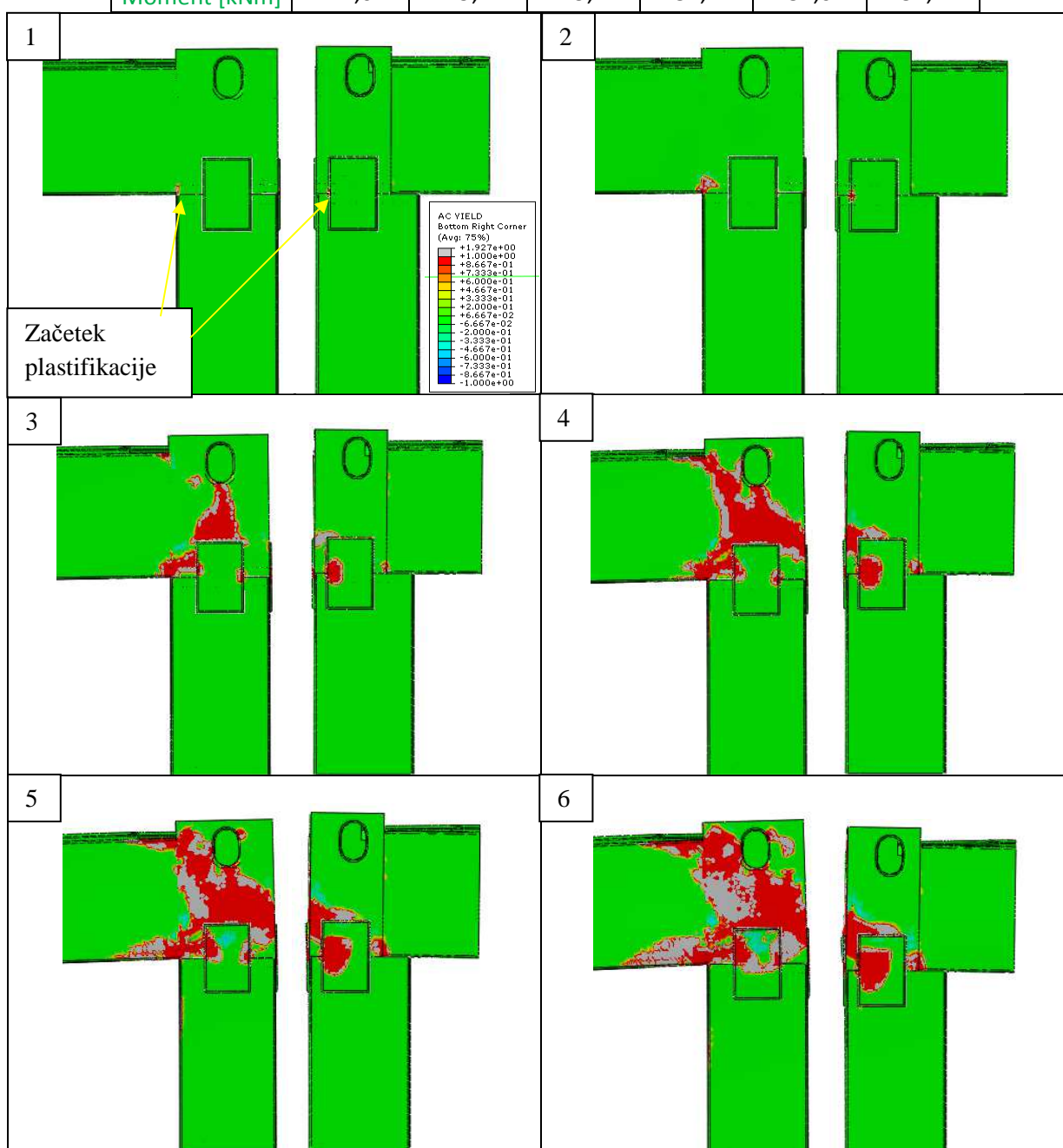
Časovni potek plastifikacije modela je prikazan na sliki 43. V začetnem nedeformiranem stanju so elementi obarvani zeleno, kar pomeni, da v sistemu ni nikakršnih napetosti. Prve notranje napetosti v modelu zaznamo s povečevanjem velikosti vertikalne sile V_z . Na prvi sliki 43 vidimo, da v spodnjem vogalu, na stiku stebra, vogalnika in stropnega profila, ter na zadnji strani, ob ojačitveni ploščici, pride do prekoračitve napetosti tečenja. Element se obarva z rdečo barvo, kar v našem primeru pomeni začetek plastifikacije, ki se začne pri 9 kN vertikalne obtežbe V_z in pripadajočim momentom 12,6 kNm. Na drugi sliki, po vrstnem redu, se območje plastifikacije širi. Večji je prirastek plastifikacije na vzdolžnem delu vogalnika, stik s stropnim profilom, na območju, kjer pride pri povečevanju obremenitve do izbočenja stojine plašča vogalnika (Slika 39). V tem trenutku je velikost sile V_z 12,8 kN, moment, ki ga povzroča sila na mestu plastifikacije, pa znaša 17,9 kNm. Z analitično analizo smo izračunali, da odpornostni moment plašča vogalnika znaša 17 kNm, ki ga povzroča ustrezno velika pripadajoča vertikalna sila 12 kN (Preglednica 4). Ko sta moment in sila prekoračena, se v plastificiranem delu začne material obnašati nelinearno. Sklepamo lahko, da se bo plastifikacija povečevala premo sorazmerno s povečevanjem obremenitve.

Na tretji zaporedni sliki se območje plastifikacije vogalnika izrazito razširi po celotni površini plašča in se postopoma seli na zadnjo stran plašča, ki pa je obremenjena pretežno z natezno silo. Vidimo tudi,

da se širi plastifikacija ojačitvene ploščice. Zaradi natezne obremenitve je presežena natezna nosilnost ploščic, ki se širi v notranjost ploščice. Plastifikacija ploščic in plašča vogalnika se v naslednjih fazah obremenitve še povečuje, tako da na zadnji sliki 6, vidimo skoraj celotno območje vogalnika plastificirano. V preglednici 5 so po korakih urejene velikosti obtežbe V_z in pripadajoči moment na območju stikovanja stropnega profila in vogalnika. Ročica znaša 1,4 m.

Preglednica 5: Elastični odpornostni moment, največji moment in največja sila na meji tečenja na mestu stičišča stropnega profila z vogalnikom.

KORAK:	1	2	3	4	5	6
Pomik [mm]	16,2	21,8	42,0	55,3	81,6	108,1
Sila V_z [kN]	10,5	13,7	21,2	23,2	24,7	24,4
Moment [kNm]	14,6	19,2	29,7	32,4	34,6	34,2



Slika 43: Časovni potek plastifikacije materiala pri povečevanju obremenitve.

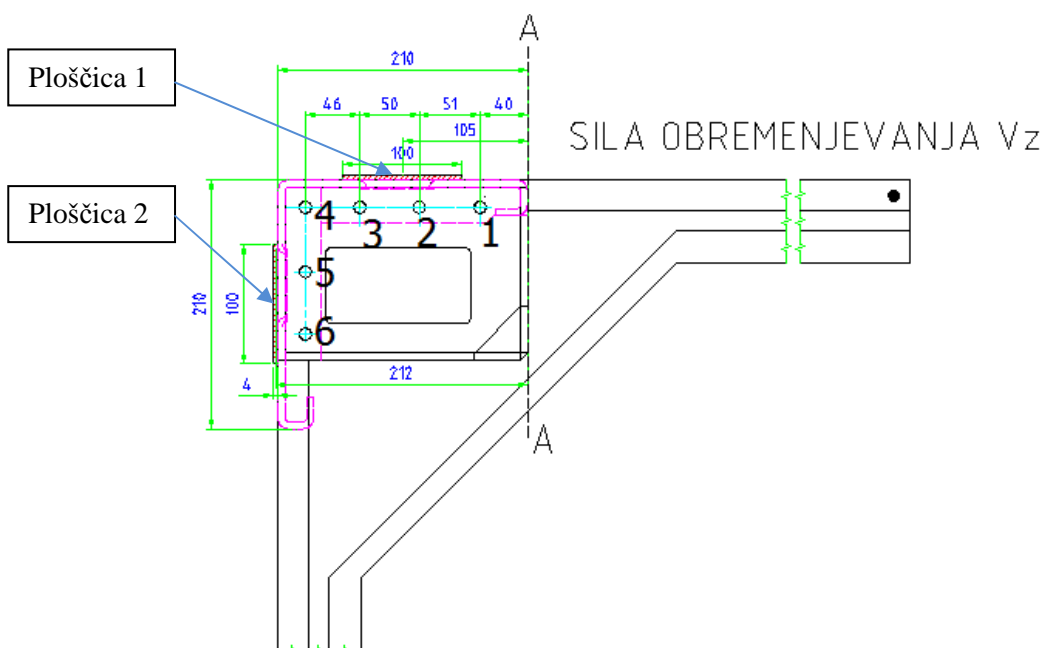
6.2 Analitičen izračun nosilnosti vijakov

Z numerično simulacijo smo ugotovili, da pri obremenjevanju spoja odpove stojina vogalnika. Preverjali smo pa tudi nosilnost vijakov. V numeričnem modelu smo vijake modelirali kot dva valja (Slika 33). Ožji del valja predstavlja navojni del, širši pa glavo. Navojni del smo toga vpeli v vrezane odprtine priključnih pločevin vogalnika. Uporabili smo funkcijo "TEI", ki predstavlja togo združevanje dveh elementov med sabo z definiranimi površinami. Na delu glave vijaka, ki nalega na spodnji del priključnih pločevin stebra, pa smo iz kontaktnih napetosti med glavo vijaka in priključnimi pločevinami izračunali silo v vijaku.

Maksimalni moment, ki ga vijaki lahko prevzamejo, izračunamo po enačbi (18). Pri tem je " $F_{t,Ed}$ " projektna sila, pri kateri pride do mejne nosilnosti vijaka. Nosilnost vijaka smo izračunali po prirejeni formuli, saj nismo upoštevali delnih varnostnih faktorjev za vezna sredstva " γ_{M2} ", ki znaša 1,25. Privzeli smo vrednost 1,0. Vijaki so natezno obremenjeni, zato smo predpostavili, da je najšibkejšo mesto na navojnem delu. Pri vijakih M12 ta površina znaša 0,843 cm². "n" je število vijakov v spoju, "m" pa nam pove, kateri vijak po vrstnem redu je v nategu. "a" je oddaljenost vijaka od nevtralne osi. V našem primeru smo predpostavili, da je pri obremenitvi že prvi vijak v nategu. Os vrtenja smo predpostavili okoli osi A-A, kot je označeno na sliki 44, saj smo predpostavili linearno razporeditev sil. Na njej so tudi kotirane razdalje od težišča vijakov in ojačitvenih ploščic do osi vrtenja.

$$M_{Rd,AA} = \frac{F_{t,Ed}}{a_{max}} \cdot \sum_{i=1, n=1}^{m, n} (n \cdot a_i^2) \quad (18)$$

$$F_{t,Ed} = A_s \cdot f_{ub} \cdot 0,9 \quad (19)$$



Slika 44: Tloris vijačnega spoja in predpostavljena os vrtenja A-A.

Preglednica 6: Preračun velikosti maksimalnega momenta, ki ga prenesejo vijaki M12 12.9 preden se prvi vijak plastificira.

$A_s=$	0,843	cm ²	a [cm]	n (vijakov)
$f_{ub}=$	120	kN/cm ²	4	1
$F_{t,Ed}=$	91,044	kN	9,1	1
$M_{Rd,AA}=$	66	kNm	14,1	1
			18,7	3
$V_{z,Rd}=$	47	kN		

V preglednici 6 je narejen elastični izračun maksimalnega momenta, ki ga vijачeni spoj prenese preden se prvi vijaki plastificirajo. Do plastifikacije pride pri najbolj oddaljenih vijakih v četrti vrsti, to so vijaki 4, 5 in 6 (Slika 44). Med ostale tri vijake se sila razporedi v razmerju togosti, ki je odvisna od oddaljenosti vijaka do vrtilišča. Silo v posameznem vijaku se izračuna z enačbo (20).

$$F_i = F_{t,Ed} \frac{a_i}{a_{max}} \quad (20)$$

K nosilnosti spoja med vogalnikom in stebrom poleg vijakov pripomoreta tudi dve ojačitveni ploščici. Nosilnost ploščic, po linearni teoriji, smo izračunali v preglednici 7.

Preglednica 7: Preračun velikosti maksimalnega momenta, ki ga prenesejo ploščici preden se najbolj oddaljena ploščica v celoti plastificira.

$A_{plošč.}=$	4	cm ²	a [cm]	n (ploščic)
$f_y=$	35,5	kN/cm ²	10,5	1
$F_{t,Ed}=$	127,8	kN	21,2	1
$M_{Rd,AA}=$	34	kNm		
$V_{z,Rd}=$	24	kN		

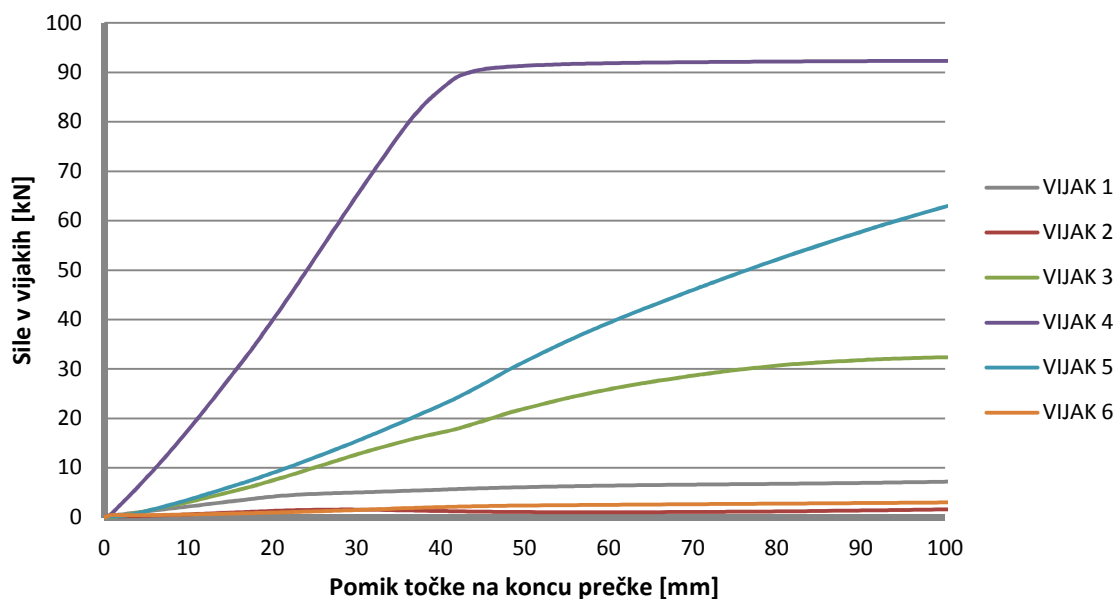
Če seštejemo odpornostna momenta vijakov in ploščic ugotovimo, da spoj prenese obremenitev momenta velikosti 100 kNm. Omenjeni moment delimo z ročico 1,4 m, glede na os A-A, izračunamo velikost vertikalne obteže "V_z" 64,5 kN, ki jo lahko sprejmejo vijaki in ojačitveni ploščici hkrati. Pri nas pa se konstrukcija začne plastificirati že pri 12,8 kN vertikalne obtežbe, do porušitve pa pride pri obtežbi 24 kN.

Dobljeni izračuni so narejeni po linearni teoriji ob predpostavki, da se plastificirajo vsi vijaki hkrati, ki so najbolj oddaljeni od osi vrtenja A-A. Poleg tega k nosilnosti prispevajo tudi obe ojačitveni ploščici. Na sliki 44 vidimo, da sta vijaka 5 in 6 enako oddaljena od osi vrtenja kot vijak 4, zato bi bilo pričakovati, da bodo vsi trije vijaki enako obremenjeni.

Na grafikonu 13 so prikazani rezultati merjenja sile v vijakih pri numerični analizi SIM6. Vidimo, da vijaki 4, 5 in 6, ki so v isti ravnini in enako oddaljeni od osi vrtenje A-A, niso enako obremenjeni. V vijaku 5 sploh ne pride do plastifikacije, medtem ko je vijak 6 praktično neobremenjen. Vidimo tudi, da vijaka 1 in 2 nista obremenjena. Linearni izračun nosilnosti vijakov je torej napačen, saj je upogibna nosilnost vijakov prevelika. Potreben je ponovni preračun upogibne odpornosti vijakov s podatki, ki smo jih dobili z numerično analizo v programu ABAQUS.

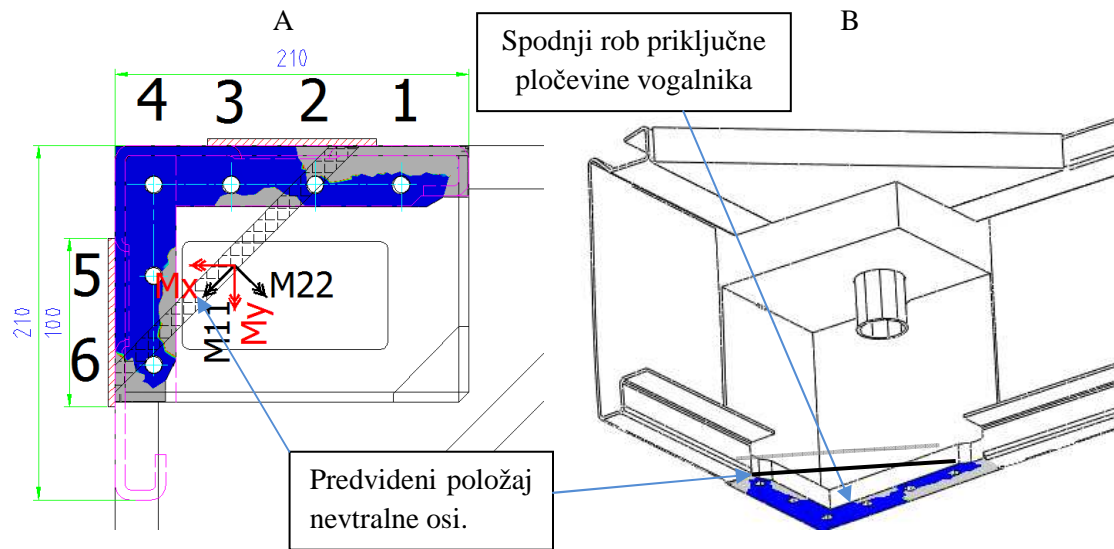
Grafikon 13: Sila v vijakih M12 12.9 glede na velikost pomika stropnega profila.

Sila v vijakih M12 12.9. pri SIM6



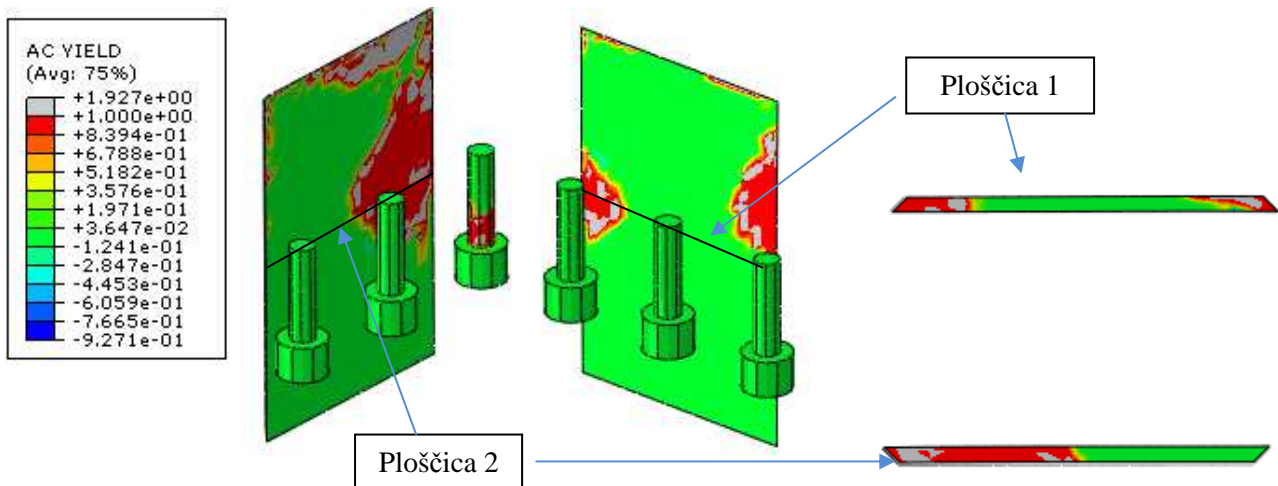
Glede na zgornje ugotovitve je potrebno definirati dejansko nevtralno os. Ta glede na velikosti sil v vijakih poteka v bližini vijakov 5 in 2. Lokacijo nevtralne osi lahko predpostavimo, zaradi izjemno kompleksne zasnove stropnega vogalnika. Pri določanju si pomagamo s kontaktnimi silami, ki nastanejo med priključnima pločevinama stebra in vogalnika. Na sliki 45A vidimo, kolikšen del priključne površine je v tlaku. Slika 45 je podana brez lestvice oziroma skale o velikosti kontaktnih tlakov, saj nas intenziteta napetosti ne zanima, ker želimo le določiti potek nevtralne osi.

Tlačeni deli so obarvani v sivi barvi, medtem ko modri del prikazuje območje brez kontakta med priključnima pločevinama. Vidimo, da sta kraka priključnih pločevin okoli vijakov 1, 2 in 6 obarvana sivo. Kot je razvidno na grafikonu 13 ti vijaki prevzamejo zanemarljivo majhen del nateznih obremenitev. Lokacija poteka nevtralne osi je posledica enojne simetrije stebra. Težišče in smer lokalnega koordinatnega sistema stebra vidimo na sliki 41B, ki pa je sicer izračunan za pretežni del stebra in ne za območje mesta stikovanja priključnih pločevin stebra in vogalnika. Ta se zato razlikuje od težišča stebra zaradi dodatnih priključnih pločevin.



Slika 45: A- Območje predvidene lokacije nevtralne osi; B- Stropni vogalnik, kjer je označena priključna pločevina.

Na sliki 46 je prikazano, kolikšen del ojačitvenih ploščic je plastificiran v trenutku, ko se začne najbolj obremenjen vijak 4 plastificirati. To se zgodi pri 55 mm vertikalnem pomiku stropnega nosilca. Na desni sliki 46 vidimo kolikšen del prečnega prereza ploščic na stiku obeh priključnih pločevin sodeluje v spoju. Skozi ti dve površini se prenašajo natezne obremenitve. Pri ploščici 1 je plastificiran del manjši kot pri ploščici 2.

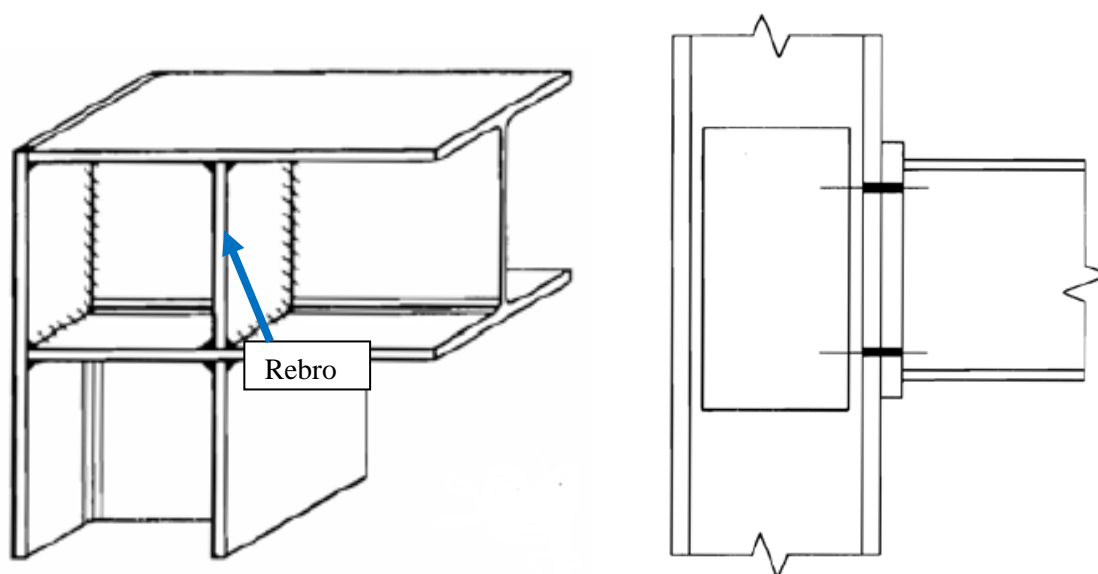


Slika 46: Stopnja plastifikacije vijakov M12 12.9. in ojačitvenih ploščic v 3D pogledu (slika levi) in prečni prerez ojačitvenih ploščic, označen s črno črto.

6.3 Možni načini ojačitve stropnega vogalnika in rezultati analiz v ABAQUS-u

Kot smo že ugotovili, se model poruši zaradi premajhne nosilnosti plašča vogalnika. Da bi izboljšali obnašanje vogalnika, bi bilo primerno, da bi uporabili material višje trdnosti. Če z izbiro boljšega materiala ne povečamo nosilnosti, moramo stojino plašča ojačati, kar lahko storimo na različne načine. Vogalnik ima zelo specifično geometrijo in nima klasičnih elementov konstrukcijskih spojev kot klasične jeklene konstrukcije, vendar lahko načine za izboljšanja nosilnosti iščemo v klasičnih spojih jeklenih konstrukcij.

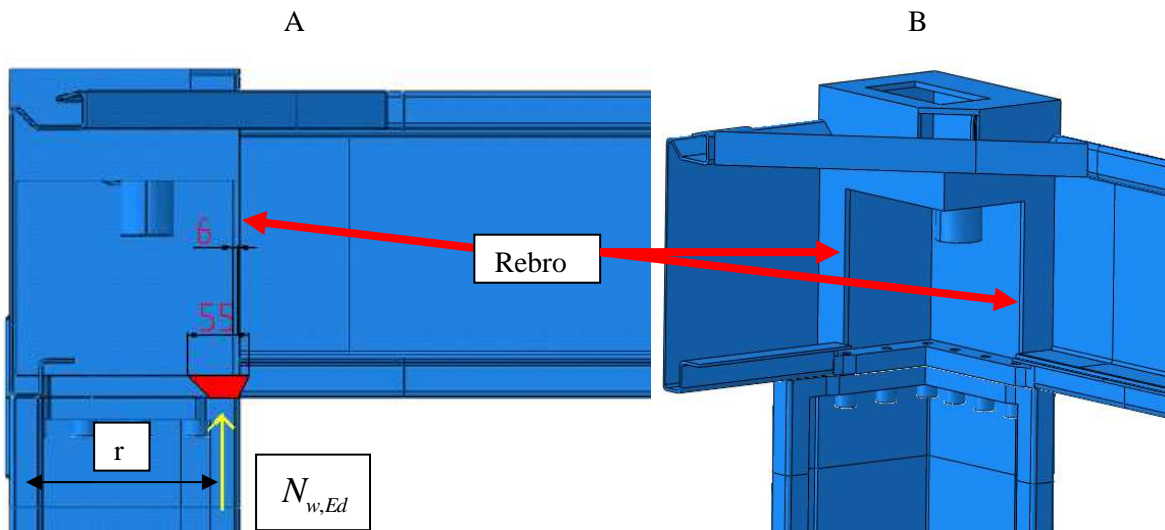
Eden prvih možnih načinov ojačevanja je, da pravokotno na stojino vogalnika dovarimo rebro, ki bi preprečevalo izbočenje pločevine izven svoje ravnine. V vogalu je namreč spoj obremenjen z velikim momentom, ki ga lahko v prerezu nosilnega elementa ponazorimo z dvojico sil na določeni razdalji. Velik vnos tlačne sile povzroči odpoved stojine, zato jo je potrebno na način, kot je prikazano na levi sliki 47, ojačati. V našem primeru na mestu izbočenja nimamo rebra. Nosilnost stojine lahko povečamo tudi s povečanjem debeline stojine plašča vogalnika. V klasičnih spojih jeklenih konstrukcij, stojino ojačamo z dodatno pločevino v stojini (slika 47 desno).



Slika 47: Možni načini povečanja nosilnosti in togosti spoja.

Površino, ki je potrebna za prevzem vnosa koncentrirane sile v element, izračunamo z enačbo (21). Pri tem je b_{eff} dolžina in t_w debelina materiala, na katerega se prenese tlačna sila $N_{w,Ed}$. Dolžino določimo s pomočjo geometrije, saj se tlačna sila $N_{w,Ed}$ razporedi na večjo širino materiala pod kotom 45° na eni strani, na drugi pa ta kot ni tako velik. Na mestu, kjer se sila razporedi pod kotom 45° , imamo namreč debelo priključno pločevino, preko katere se prenese koncentrirana sila na plašč vogalnika. γ_{M0} je varnostni faktor za material in znaša 1,0.

$$N_{w,Ed} = b_{eff} \cdot t_w \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (21)$$



Slika 48: A- Širina raznosa koncentrirane tlačne obremenitve z dodatnim ojačitvenim rebro; B- 3D pogled na vogalnik z rebri na vsaki strani vogalnika.

V našem primeru je plašč vogalnika debeline 6 mm. Kot je prikazano na levi sliki 48 se tlačna sila "N_{w,Ed}" razporedi na dolžini 55 mm. Na sliki 43 na drugi sliki po vrstnem redu vidimo, da pride v vogalniku do plastifikacije materiala. V preglednici 8 vidimo, da pride do plastifikacije pri sili 12,8 kN, kar na območju spajanja stropnega profila z vogalnikom, znaša 17,9 kNm. Ker je potek nevtralne osi stebra še za 15 cm naprej od spajanja stropnega profila z vogalnikom, je moment zaradi večje ročice posledično večji in se po celotnem stebri, vse do vpetja ne spreminja. Velikost momenta v stebri vidimo v preglednici 8. Da bi lahko izračunali velikost tlačne sile "N_{w,Ed}" moramo moment deliti z ročico 0,19 m. To je statična višina, ki je označena na sliki 48A.

Preglednica 8: Velikost tlačne sile N_{w,Ed}.

KORAK:	1	2	3	4	5	6
Pomik [mm]	14,6	20,9	43,7	62,4	80,1	102,2
Sila V _z [kN]	9,0	12,8	21,2	23,2	23,8	23,4
Moment [kNm]	12,6	17,9	29,7	32,5	33,3	32,7
Sila N _{w,Ed} [kN]	74	104	173	190	194	191

Kot vidimo v preglednici 8, je tlačna sila "N_{w,Ed}" sorazmerno velika in se s povečevanjem vertikalne sile "V_z" povečuje. V preglednici 9 je izračunana odpornost stojine plašča materiala na vnos koncentrirane tlačne sile "N_{w,Ed}" in odpornost z dodatnim ojačitvenim rebrom, ki je enak debelini plašča vogalnika, v dolžino pa meri 4 cm. V preglednici je prikazana kolikšna je odpornost plašča vogalnika "N_{w,Rd}" brez ojačitvenega rebra. Izračun je narejen za material S235JR. Izračunana je tudi odpornost ojačitvenega rebra "N_{w,Rd OJAČITVE}" in skupna odpornost ojačitvenega rebra in plašča

vogalnika na $N_{w,Rd NOVI}$. Vidimo, da je odpornost plašča in ojačitvenega rebra že v 3. koraku manjša, kot je obremenitev. Z linearno interpolacijo lahko izračunamo pričakovano silo, pri kateri bo prišlo do plastifikacije modela. To naredimo tako, da izračunamo razmerje med vertikalno silo V_z in silo odpora na tlačno silo $N_{w,Ed}$. Novo silo plastifikacije izračunamo tako, da $N_{w,Rd NOVI}$ pomnožimo z vrednostjo enačbe (22). Izračun enačbe (23) pokaže, da je nova vrednost vertikalne sile V_z , 16 kN.

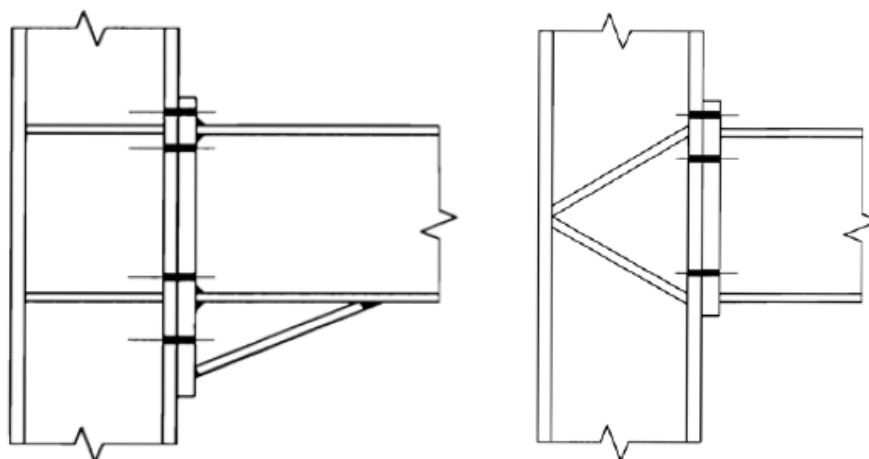
$$\frac{\Delta V_z}{\Delta N_{w,Rd}} = \frac{12,8kN - 9,0kN}{104kN - 74kN} = 0,12kN / kN \quad (22)$$

$$0,126kN / kN \cdot N_{w,Rd NOVI} = 0,12kN / kN \cdot 134kN = 16kN \quad (23)$$

Preglednica 9: Analitični izračun odpornosti stojine plašča vogalnika na tlačno silo $N_{w,Ed}$ in odpornost z dodatnim ojačitvenim rebrom.

KORAK:	1	2	3	4	5	6
Sila $N_{w,Ed}$ [kN]	74	104	173	190	194	191
A_{obst} [cm ²]	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
$N_{w,Rd}$ [kN]	78	78	78	78	78	78
PRESEŽEK: $N_{w,Rd}$ [kN]	-4	27	96	112	116	113
$A_{ojačitev}$ [cm ²]	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
$N_{w,Rd OJAČITVE}$ [kN]	56,4	56,4	56,4	56,4	56,4	56,4
$N_{w,Rd NOVI}$ [kN]	134	134	134	134	134	134

Poleg ojačitvenih reber in povečevanjem debeline stojine, lahko spoj ojačimo tudi s tako imenovanimi "K" diagonalami. Ta način ojačevanja pride predvsem v poštev, ko se smer obremenitve spreminja. Če nam prostor dopušča, pa lahko nosilnost spoja povečamo z "VUTO". Vuta nam poveča upogibno odpornost spoja. Zaradi višje statične višine je tudi velikost vnosa koncentrirane tlačne sile manjša, saj momentno obremenitev delimo z večjo ročico, ki je posledica večje višine nosilnega elementa. Oba možna načina ojačevanja spojev vidimo na sliki 49.



Slika 49: Možni načini povečanja nosilnosti in togosti spoja.

6.3.1 Izboljšanje nosilnosti vogalnika z materialom višje trdnosti, ojačitvenim rebrom in diagonalami

6.3.2 Izboljšanje nosilnosti z materialom višje trdnosti in ojačitvenimi rebri

Kot smo že v predhodnih poglavjih omenili, se nam konstrukcija poruši v predelu stojine vogalnika zaradi koncentriranega vnosa sile v stojino vogalnika. Ta povzroči lokalno nestabilnost vogalnika v predelu spajanja s stropnim profilom. Nosilnost bi lahko povečali z izboljšanjem kvalitete materiala, po vsej verjetnosti pa bi bila potrebna tudi dodatna ojačitvena rebra, ki bi povečala odpornost stojine na vnos koncentrate sile. Princip in lega ojačitvenega rebra je prikazan na sliki 48, kjer vidimo dodatni ojačitveni rebri na vsaki strani stropnega vogalnika. V prvih korakih povečevanja nosilnosti postopamo torej s spreminjanjem kvalitete materiala in dodajanjem ojačitvenega rebra. Naredil smo tri numerične simulacije, pri katerih smo spreminjali kvaliteto materiala in dodajali ojačitveno rebro v vogalnik. Kombinacije variant med simulacijami so prikazane v preglednici 10.

Preglednica 10: Simulacije in načini ojačevanja modela.

SIMULACIJA	KVALITETA MATERILALA VOGALNIKA	POSEBNOSTI	VIJAKI
SIM6	S235JR	/	M12 12.9
SIM7	S355JR	/	M12 12.9
SIM8	S235JR	REBRO	M12 12.9
SIM9	S355JR	REBRO	M12 12.9

Na grafikonu 14 vidimo primerjavo rezultatov med numeričnimi simulacijami SIM6, SIM7, SIM8 in SIM9, pri katerih smo simulirali različne kombinacije ojačevanja vogalnika. SIM6 predstavlja simulacijo testnega, neojačanega vogalnika, ki je bil testiran na ZAG-u. Ostale tri simulacije SIM7, SIM8 in SIM9 pa so rezultati testov modela z izboljšavami, kot so definirani v preglednici 10.

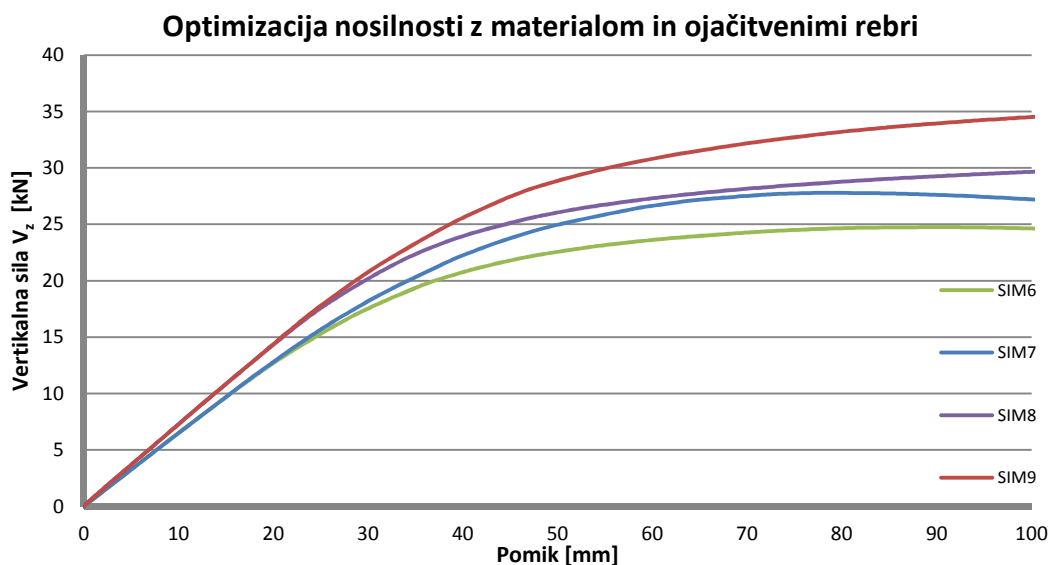
Pri simulaciji SIM7 smo izboljšali kvaliteto jekla vogalnika. Pri SIM6 je bil namreč vogalnik narejen iz jekla S235JR, sedaj pa smo kvaliteto jekla povečali na S355JR. Kot vidimo na grafu 14 smo s povečanjem kvalitete jekla povečali nosilnost. Pri SIM6 je bila največja izmerjena vertikalna sila V_z 24,7 kN, medtem ko maksimalna sila pri SIM7 znaša 27,7 kN. Torej smo z višjo kvaliteto jekla nosilnost povečali za 3 kN. Rahlo se je zvišala tudi sila, pri kateri pride do plastifikacije modela, saj vidimo, da se začne krivulja V_z (vertikalna sila)-u (pomik) kasneje odklanjati (Grafikon 15). Linearni del obremenjevanja popolnoma sovпада s SIM6, v nelinearnem delu pa se model obnaša drugače, saj se je zaradi boljše kvalitete jekla povečala nosilnost.

Pri modelu SIM8 smo obstoječemu modelu SIM6 dodali ojačitveno rebro, pri čemer nismo povečevali kvalitete materiala. Zanimalo nas je namreč, kako se spremeni obnašanje modela pri spremembi

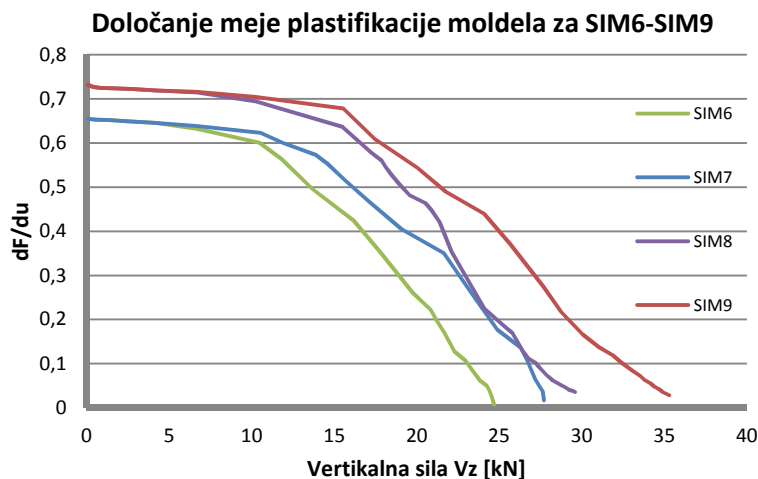
geometrije. Z ojačitvenim rebrom pa smo povečali odpornost na vnos koncentrirane sile v področju stojine plašča. Že iz samega naklona premice SIM8 vidimo, da smo z ojačitvenimi rebri povečali togost sistema, saj se sila v linearnem delu obremenjevanja konstrukcije povečuje hitreje kot pomik (Grafikon 15). Pri modelu SIM8 smo dosegli tudi višjo nosilnost, maksimalna sila je znašala 29,5 kN, s čimer smo za 5,1 kN povečali nosilnost v primerjavi z modelom SIM6. S povečanjem togosti modela se ni povečala le nosilnost, ampak se je povečala tudi sila, pri kateri se začne sistem plastificirati. Sila plastifikacije je pri modelu SIM6 znašala 10,5 kN, medtem ko pri modelu SIM8 znaša 15,5 kN. Ta sila je za 0,5 kN manjša od ocenjene sile 16 kN, ki smo jo izračunali z enačbo (23).

Model SIM8 smo nato nadgradili še z boljšo kvaliteto jekla, tako da smo za vogalnik in ojačitveno rebro uporabili jeklo S355JR (SIM9). Ugotovili smo, da se je povečala le nosilnost modela, medtem ko je togost ostala praktično nespremenjena. Do podobne ugotovitve smo prišli že pri primerjavi med modeli SIM6 in SIM7, kjer smo pri enaki geometriji modela izboljšali material vogalnika.

Grafikon 14: Primerjava nosilnosti med različnimi načini ojačevanja vogalnika.



Grafikon 15: Določanje meje plastifikacije glede na spremembo naklona sile obremenjevanja pri modelih SIM6-SIM9.

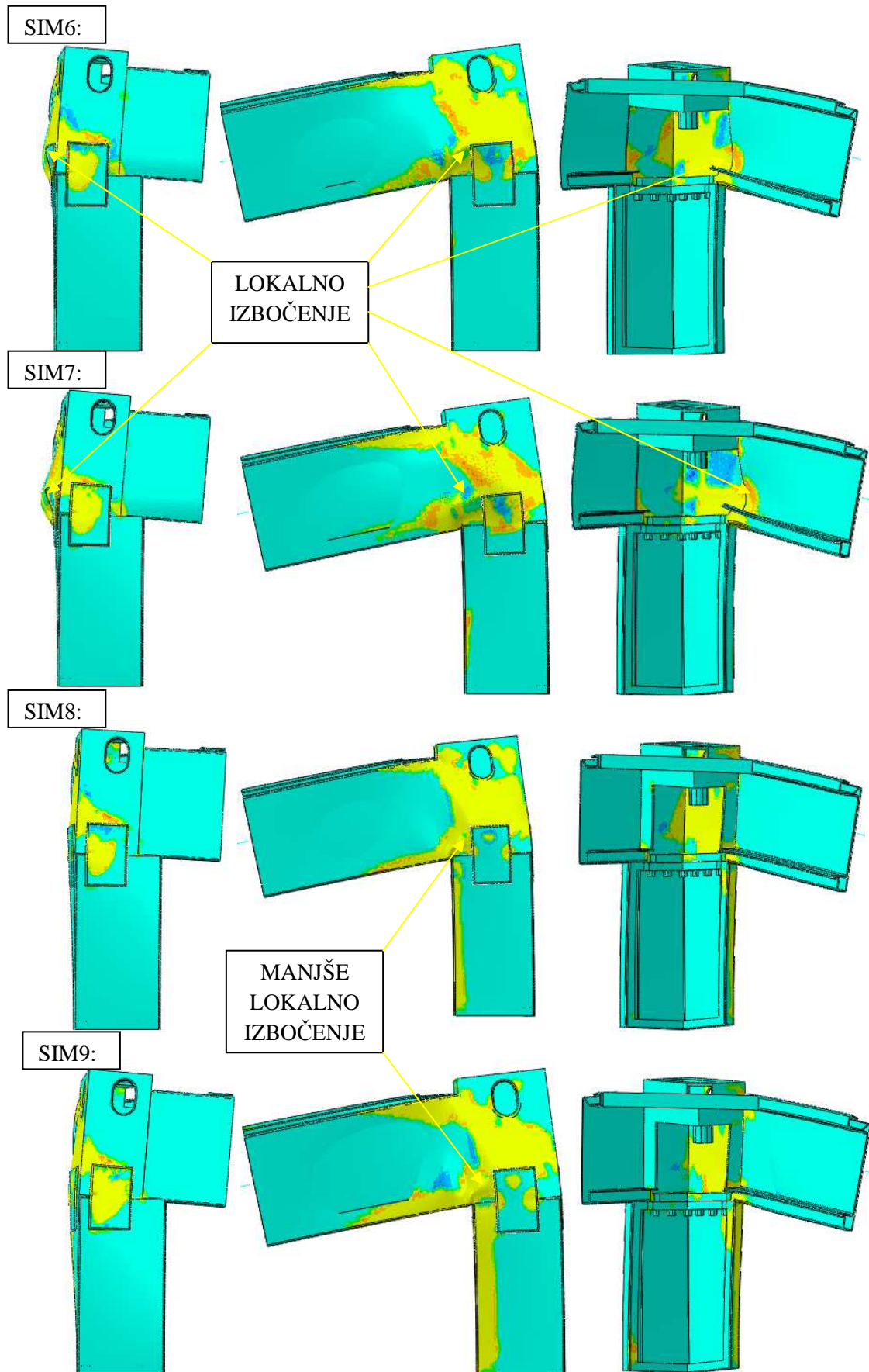


Na sliki 50 so iz različnih strani prikazana območja plastifikacije modelov SIM6, SIM7, SIM8 in SIM9 pri 5 kratni povečavi deformacije. Vse slike so bile izrezane na koncu numeričnih analiz, ko velikost vertikalnega pomika znaša 100 mm. Za primerjavo območij plastifikacije se nismo odločili pri največji vertikalni sili, saj vsaka simulacija modela ne doseže največjo silo ob enakem pomiku. Območja plastifikacije so obarvana z rumeno, oranžno in zeleno barvo. Prav tako vidimo primerjavo deformiranja modelov SIM6, SIM7, SIM8 in SIM9 pri enaki velikosti vertikalnega pomika.

Vidimo, da je oblika deformiranja modelov pri simulacijah SIM6 in SIM7 izjemno podobna. Čeprav smo pri vogalniku analize SIM7 uporabili material višje kvalitete, S355 JR, pa je deformacijska oblika enaka. To smo tudi pričakovali, saj s povečevanjem kvalitete materiala povečujemo le nosilnost. Togost sistema se tako ne spremeni. Pri obeh primerih simulacij je prišlo do izbočenja stojine stropnega vogalnika, ki se odkloni iz prvotne, nedeformirane oblike. Celotna stojina vogalnika je močno plastificirana, območje plastifikacije pa se širi po zgornji in spodnji strani stropnega profila, medtem ko ojačitev v stropnem profilu praktično ni plastificirana. To nakazuje na slabo povezanost stropnega profila in ojačitve, saj sta elementa stikovana na notranjem, manj obremenjenem delu, s prekinjenim kotnim varom. Veliko bolje bi bilo, če bi bile stojine elementov med sabo zvarjene še na spodnjem in zgornjem delu stojine ojačitve. V stebrih v obeh primerih praktično ne prihaja do plastifikacija materiala.

Pri simulacijah SIM8 in SIM9 smo v model dodali ojačitvena rebra na stiku stojine stropnega profila in stojine vogalnika. Ojačitev je debela 6 mm, široka 40 mm in sega od "šaličke" vogalnika, do priključne pločevine. Vidimo, da se je s tem bistveno izboljšalo obnašanje vogalnika, saj se pločevina stojine ne izboči več. Kljub temu je še vedno večji del stojine stropnega vogalnika plastificiran, plastifikacija pa se nam pojavi tudi v kraku stebra. Zaradi povečanja togosti stojine vogalnika z dodanim ojačitvenim rebrom, se poveča tudi obremenitev, ki jo lahko model prenese (Grafikon 14). S tem se poveča tudi obremenjenost ostalih elementov, stebra in stropnega vogalnika.

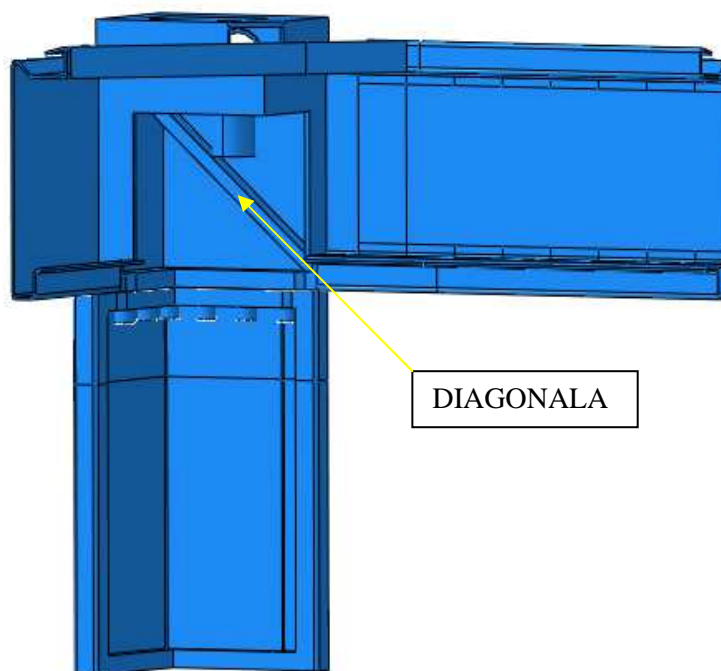
Ugotovili smo, da z ojačitvenim rebrom bistveno povečamo togost modela, s povečanjem kakovosti materiala, pa se nam izboljša nosilnost modela. Kljub temu pa vidimo, da se stojna plašča vogalnika še vedno močno plastificira. Poleg tega se nam zaradi povečanja togosti vogalnika začne plastificirati krak stebra. Priporočljivo bi bilo, da v krak stebra uvarimo dodatno pločevino, ki bi stabilizirala krak in s tem povečala odpornostni moment stebra. Prav tako bi morali združiti stojini stropnega profila in stropne ojačitve. Stojini bi morali biti med seboj povarjeni s čepastimi zvari, ki bi povečali sodelovanje stojin.



Slika 50: Primerjava velikost plastifikacije simulacij modelov SIM6-SIM9 pri 5 kratni povečavi deformacij in 100 mm vertikalnega pomika.

6.3.3 Dodatno izboljšanje nosilnosti z diagonalami

Pri uporabi materiala višje trdnosti smo prišli do zaključka, da izboljšamo le nosilnost modela. Togost modela se nam ne spremeni, zaradi česar bi se z nadaljnjim povečevanjem kvalitete materiala model plastificiral še vedno sorazmerno kmalu. Na sliki 50 vidimo, da je kljub izboljšanju materiala vogalnika in uporabi ojačitvenega rebra, še vedno večji del vogalnika plastificiran. Zato smo se odločili, da bomo stojino plašča vogalnika dodatno ojačali z diagonalo, ki bi potekala od spodnjega desnega roba do zgornjega levega roba (Slika 51). Diagonala bo široka 15 mm, visoka pa 20 mm. Predvidevamo namreč, da bomo z diagonalo ojačali stojino vogalnika in povečali togost. Naredili smo dve simulaciji, SIM10 in SIM11, pri katerih je bila geometrija modela enaka. Spreminjali smo le trdnost materiala vogalnika, saj smo pri modelu SIM10 uporabili jeklo S235JR, pri modelu SIM11 pa jeklo S355JR.



Slika 51: Model simulacij SIM10 in SIM11.

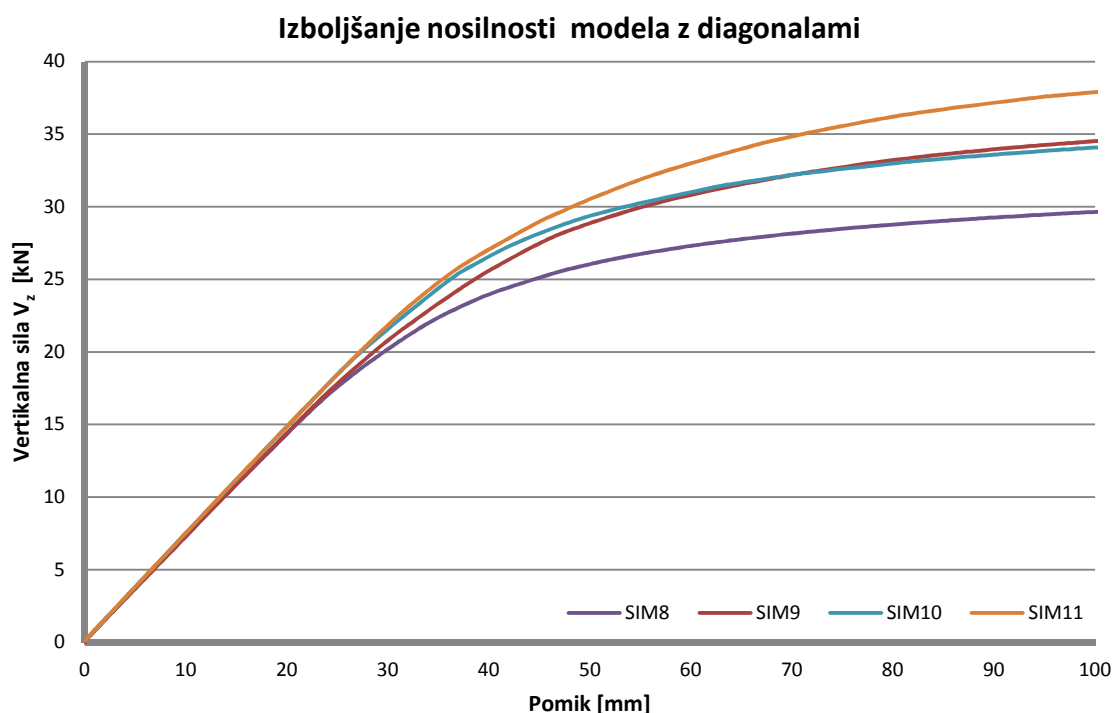
Preglednica 11: Simulacije in načini ojačevanja modela.

SIMULACIJA	KVALITETA MATERILALA VOGALNIKA	POSEBNOSTI	VIJAKI
SIM6	S235JR	/	M12 12.9
SIM7	S355JR	/	M12 12.9
SIM8	S235JR	REBRO	M12 12.9
SIM9	S355JR	REBRO	M12 12.9
SIM10	S235JR	REBRO+DIAGONALA	M12 12.9
SIM11	S355JR	REBRO+DIAGONALA	M12 12.9

Na grafikonu 16 je prikazana primerjava rezultatov numeričnih modelov med simulacijami SIM8, SIM9, SIM10 in SIM11, njihove razlike pa so opisane v preglednici 11. Ob uporabi diagonale v stojini panela se je togost simulacij SIM10 in SIM11 rahlo povečala v primerjavi s simulacijami SIM8 in SIM9. Zvišala se je tudi sila, pri kateri pride do plastifikacije materiala. Pri modelih SIM8 in SIM9 se je model začel plastificirati pri 16 kN velikosti vertikalne sile, medtem ko sila pri modelih SIM10 in SIM11 znaša 20 kN.

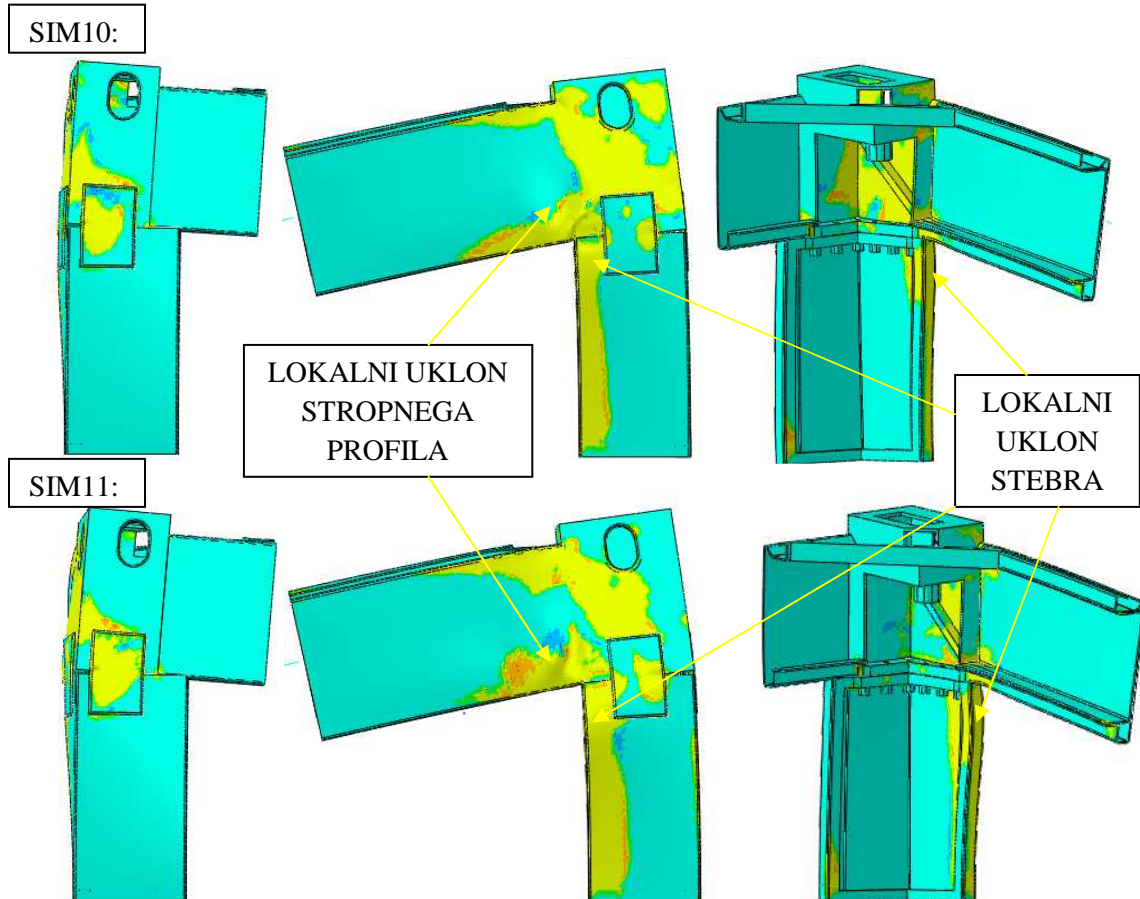
Zaradi dodatne diagonale, ki ojačuje stojino panela, se nam je povečala tudi maksimalna nosilnost pri 100 mm vertikalnega pomika "u". Sila pri simulaciji SIM10 znaša 34 kN, medtem ko pri SIM11 znaša 37,5 kN. Obe sili sta še vedno manjši, kot sta največji sili na meji plastičnega tečenja, ki smo jih izračunali v preglednici 4. Z dodatno diagonalo smo izboljšali obnašanje vogalnika, saj v stojini vogalnika ne prihaja več do lokalne nestabilnosti in izbočenja plašča vogalika.

Grafikon 16: Primerjava nosilnosti med modela numeričnih simulacij SIM8-SIM11.



Deformirane oblike in velikost plastifikacije modelov simulacij SIM10 in SIM11, pri 100 mm vertikalnega pomika, so prikazane na sliki 52. Deformacije modelov so zaradi boljšega občutka o deformiranju elementov petkrat povečane. Vidimo, da je še vedno del vogalnika plastificiran, vendar je območje plastifikacije, glede na rezultate simulacij SIM6-SIM9 (Slika 50), manjše. Zaradi dodatnega ojačitvenega rebra in diagonale se je povečala togost vogalnika. Pri modelih SIM10 in SIM11 ne prihaja več do lokalnih nestabilnosti v stojini plašča vogalnika. Lokalne nestabilnosti se pojavijo v kraku stebra in stojini stropnega profila. Tudi območje plastifikacije stebrov in stropnih profilov je veliko večje kot na slikah 50.

Vidimo tudi, da se ojačitev v stropnem profilu praktično ne plastificira, glede na zunanjo stran stropnega profila, ki pa je pretežno plastificirana. To le potrjuje naše domneve, da ojačitev stropnega profila in stropni profil ne sodelujeta dovolj dobro pri prenosu obtežbe. Naše domneve se ujemajo tudi z izračunom v preglednici 4, kjer smo izračunali, da stropni profil prevzame maksimalno 24 kN obtežbe, preden se začne plastificirati.



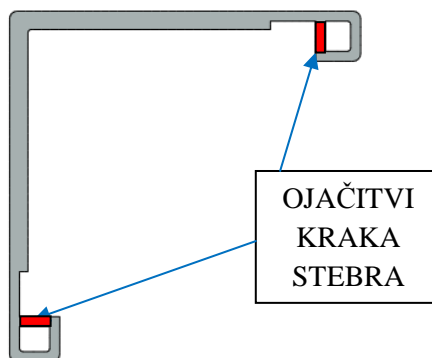
Slika 52: Primerjava velikosti plastifikacije simulacij modelov SIM10 in SIM11 pri 5kratni povečavi deformacij in 100 mm vertikalnega pomika.

Pri simulacijah SIM10 in SIM11 se prvič pojavi problem nestabilnosti v kraku stebra. Lokacija lokalne nestabilnosti stebra je prikazana na sliki 52. Opazimo lahko tudi, da je večji uklon stebra pri simulaciji SIM11, saj smo uporabili pri vogalniku jeklo S355JR, medtem ko je bilo pri simulaciji SIM10 uporabljeno jeklo S235JR. Zaradi uporabe jekla višje kvalitete, ima vogalnik pri simulaciji SIM11 večjo odpornost in lahko prenese višjo obremenitev, zato pride do odpovedi nosilnosti v ostalih elementih modela.

Glede na zgornje ugotovitve je nosilnost vogalnika z ojačitvenim rebrom in diagonalo dovolj velika, saj se nam težave z nosilnostjo in stabilnostjo, pojavijo v stebru in stropnem profilu. Z ojačevanjem vogalnika smo namreč dosegli mejne sile, ki sta jih sposobna prenesti stropni profil z ojačitvijo in steber (Preglednica 4).

6.3.4 Dodatno izboljšanje nosilnosti z zaprtim krakom pasnice stebra

Simulaciji SIM10 in SIM 11 sta pokazali na težavo stabilnosti tlačene pasnice stebra, ki se nam ukloni pri obremenjevanju. Zato smo se odločili, da pasnici stebra zapremo s pločevino na notranji stani. S tem povežemo zunanji del stojine plašča stebra in notranji krak pasnice. Princip ojačevanja je prikazan na sliki 53, kjer sta označeni ojačitvi kraka stebra. Pri simulaciji SIM 32 smo le nadgradili simulacijo SIM11. Materiala nismo spreminjali, dodatno smo ojačili le steber.

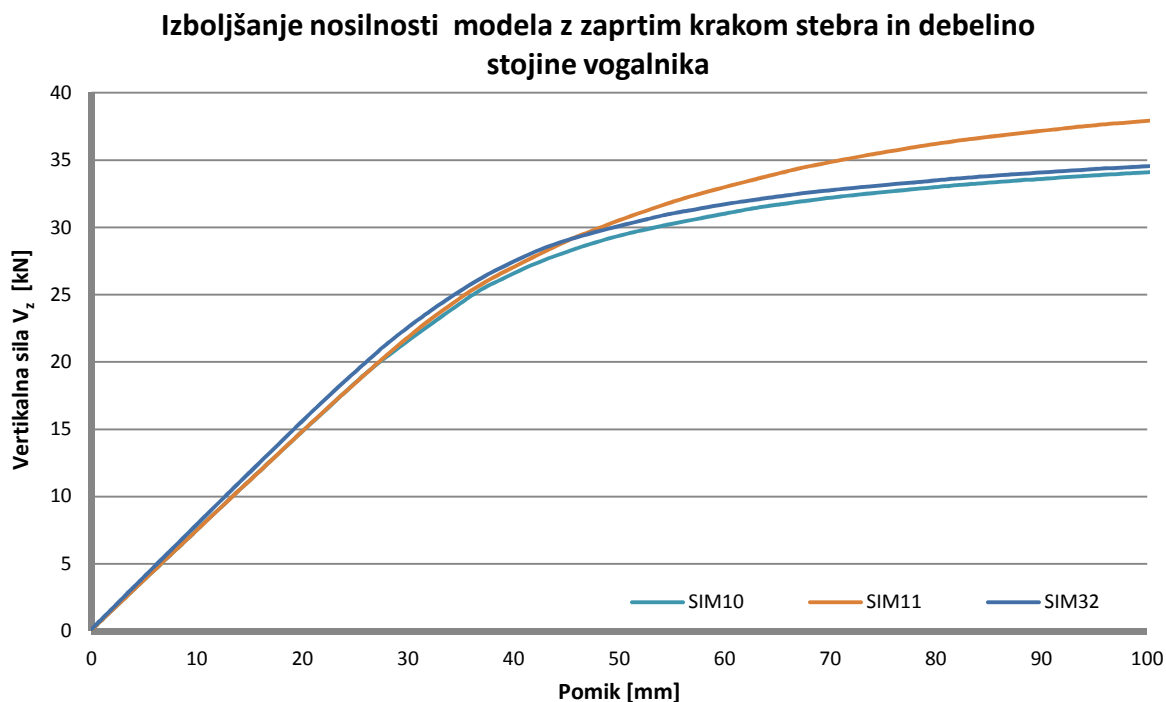


Slika 53: Prečni prerez stebra in lokacija ojačanih pasnic stebra pri simulaciji SIM32.

Preglednica 12: Simulacije in načini ojačevanja modela.

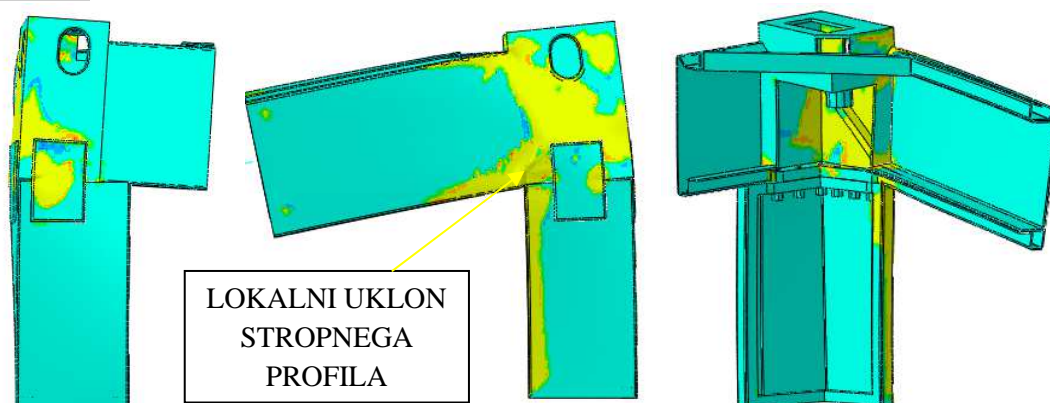
SIMULACIJA	KVALITETA MATERILALA VOGALNIKA	POSEBNOSTI	VIJAKI
SIM6	S235JR	/	M12 12.9
SIM7	S355JR	/	M12 12.9
SIM8	S235JR	REBRO	M12 12.9
SIM9	S355JR	REBRO	M12 12.9
SIM10	S235JR	REBRO+DIAGONALA	M12 12.9
SIM11	S355JR	REBRO+DIAGONALA	M12 12.9
SIM32	S355JR	REBRO+DIAGONALA+ ZAPRT KRAK STEBRA	M12 12.9

Grafikon 17: Primerjava nosilnosti med modeli numeričnih simulacij SIM10, SIM11 in SIM32.



Kot vidimo na grafikonu 17 smo zaradi ojačitev v kraku stebra rahlo zvišali togost sistema. Vidimo pa, da se je nosilnost bistveno zmanjšala. Ker smo povečali upogibno odpornost stebra, se nam zopet pojavljajo težave v stojini vogalnika. Poleg tega je zelo plastificirana spodnja pasnica stropnega profila. Smiselno bi bilo, da se odebeli stojina plašča in s tem poveča upogibna odpornost vogalnika. Prav tako bi bilo potrebno ojačati spodnji del stropnega profila. To naredimo tako, da v spodnji del vstavimo polno jeklo, ki bi bilo v bistvu podaljšek priključne pločevine stropnega vogalnika. Priključna pločevina je zaradi svoje debeline izjemno toga, s tem bi ojačali spodnji del vogalnika.

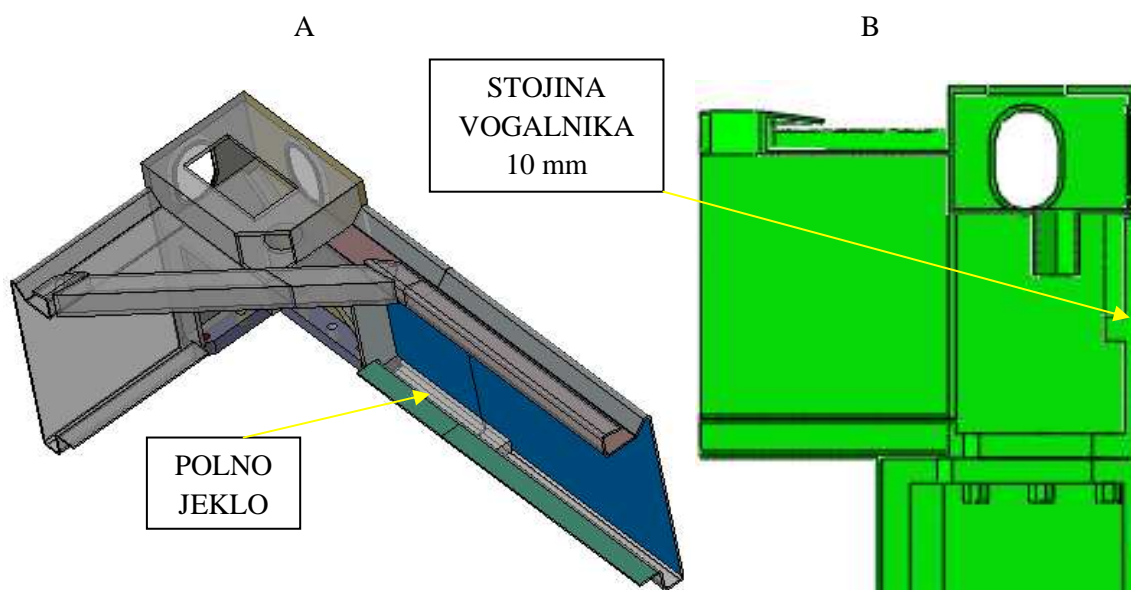
SIM32:



Slika 54: Prikaz velikosti plastifikacije simulacije modela SIM32 pri 5kratni povečavi deformacij in 100 mm vertikalnega pomika.

6.3.5 Dodatno izboljšanje nosilnosti z varjenim polnim jeklom v dnu stropnega nosilca in odebelitvijo plašča stropnega vogalnika

Omenili smo že, da bi morali spodnji del stropnega profila ojačati. To smo storili z uvarjenim polnim jeklom, ki predstavlja podaljšek priključne pločevine stropnega vogalnika. Z njim bi povečali vztrajnostni moment in togost stropnega profila. Na sliki 55B vidimo, da bi bilo potrebno povečati debelino plašča stojine vogalnika. V predhodnih analizah smo ugotovili, da se kljub ojačevanju vogalnika z dodatnim rebrom in diagonali, velik del stojine plašča, zaradi obremenitve, plastificira. S tem bi povečali odpornostni moment vogalnika in togost stojine.

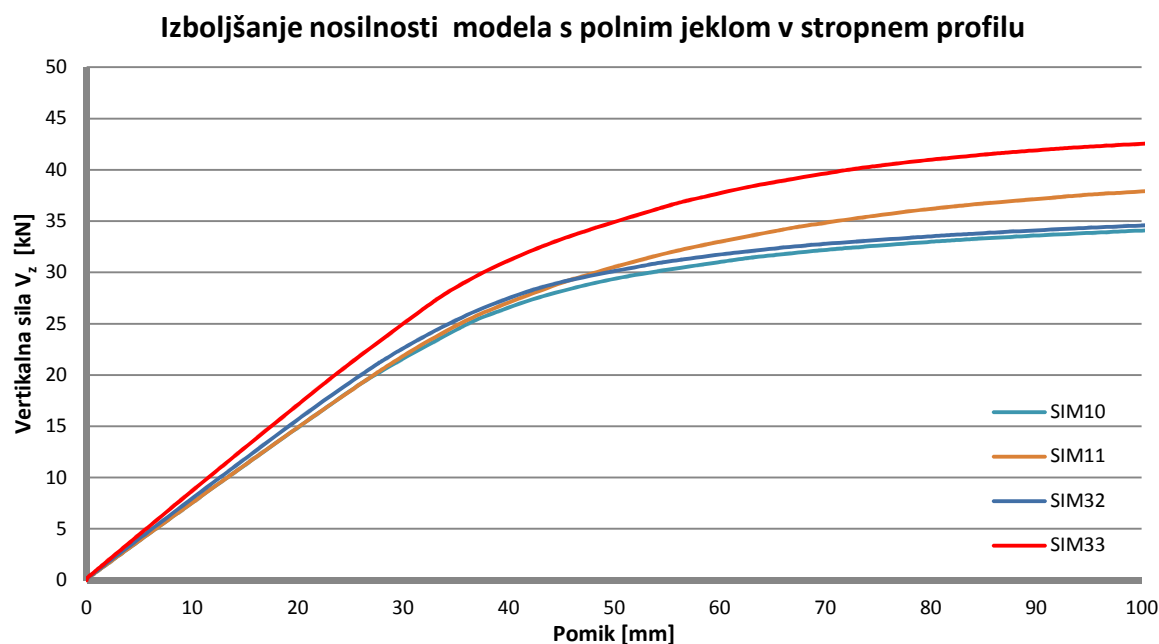


Slika 55: Lokacija dodatnega ojačitvenega polnega jekla v stropnem profilu.

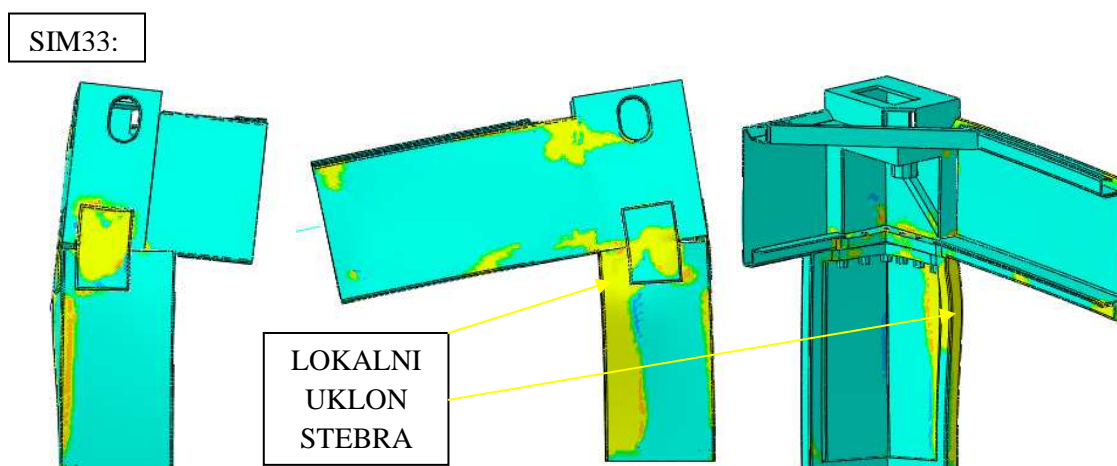
Preglednica 13: Simulacije in načini ojačevanja modela.

SIMULACIJA	KVALITETA MATERILALA VOGALNIKA	POSEBNOSTI	VIJAKI
SIM6	S235JR	/	M12 12.9
SIM7	S355JR	/	M12 12.9
SIM8	S235JR	REBRO	M12 12.9
SIM9	S355JR	REBRO	M12 12.9
SIM10	S235JR	REBRO+DIAGONALA	M12 12.9
SIM11	S355JR	REBRO+DIAGONALA	M12 12.9
SIM32	S355JR	REBRO+DIAGONALA+ ZAPRT KRAK STEBRA	M12 12.9
SIM33	S355JR	REBRO+DIAGONALA+ ZAPRT KRAK STEBRA+ STOJINA 10mm+ POLNO JEKLO	M12 12.9

Grafikon 18: Primerjava nosilnosti med modeli numeričnih simulacij SIM10, SIM11, SIM32 in SIM33.



Kot smo domnevali, smo z dodatnim ojačevanjem stropnega profila, povečali nosilnost modela. Zvišala se je tudi togost, saj ima krivulja bistveno večji naklon, kot ostali modeli. Sila, pri kateri pride v modelu do plastifikacije, se je glede na SIM11 zvišala za 4kN in sedaj znaša 24 kN. Na slikah 56 je razvidno, da s polnim jeklom v spodnjem delu stropnega profila povečamo nosilnost stopnega profila do te mere, da je območje plastifikacije v stojini vogalnika in stropnem profilu minimalno. Največja sila, ki smejo dosegli pri 100 mm vertikalnega pomika je znašala 42,7 kN. Problematična postane nosilnost stebra, saj se nam krak stebra ukloni (Slika 56). Tudi plastifikacija ojačitvenih ploščic je veliko večja kot pri modelu SIM 32.



Slika 56: Prikaz velikosti plastifikacije simulacije modela SIM33 pri 5kratni povečavi deformacij in 10 0mm vertikalnega pomika.

6.4 Nosilnost spoja vogalnika brez ojačitvenih ploščic

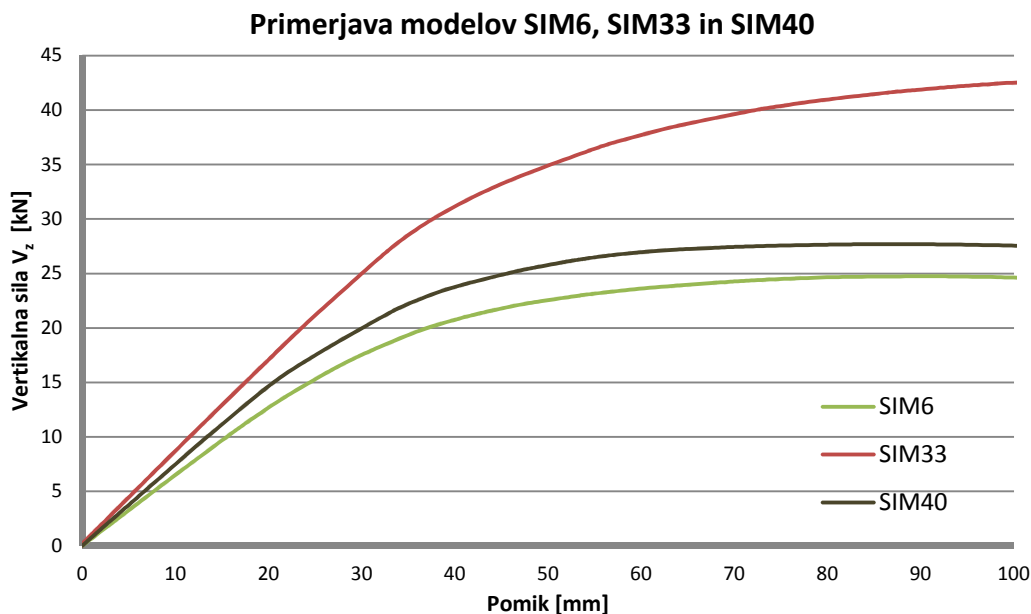
Nosilne elemente modela smo ojačali do te mere, da postane problematičen spoj vogalnika in stebra. Spomnimo, da je spoj narejen z vijaki M12 12.9 in navarjenima ojačitvenima ploščicama na zunanji strani vogalnika. Na slikah 56 vidimo, da sta površini ojačitvenih ploščic v večji meri plastificirani. V poglavju 6.2 smo ugotovili, da določeni vijaki praktično ne sodelujejo pri prenosu obremenitve, saj del obtežbe prevzmeta ojačitveni ploščici. Zaradi različnih materialnih karakteristik in geometrije je analitični izračun razdelitve obremenitve med vijaki in ploščicami preveč kompliciran. Ker smo povečali nosilnost ostalih elementov modela, lahko sedaj ugotovimo, kolikšna največja nosilnost vijakov, če odstranimo ojačitveni ploščici. Predpostavljamo namreč, da je sedaj merodajna nosilnost vijakov M12 12.9.

Preglednica 14: Simulacije in načini ojačevanja modela.

SIMULACIJA	KVALITETA MATERILALA VOGALNIKA	POSEBNOSTI	VIJAKI
SIM6	S235JR	/	M12 12.9
SIM7	S355JR	/	M12 12.9
SIM8	S235JR	REBRO	M12 12.9
SIM9	S355JR	REBRO	M12 12.9
SIM10	S235JR	REBRO+DIAGONALA	M12 12.9
SIM11	S355JR	REBRO+DIAGONALA	M12 12.9
SIM32	S355JR	REBRO+DIAGONALA+ ZAPRT KRAK STEBRA	M12 12.9
SIM33	S355JR	REBRO+DIAGONALA+ ZAPRT KRAK STEBRA+ STOJINA 10mm+ POLNO JEKLO	M12 12.9
SIM40	S355JR	REBRO+DIAGONALA+ ZAPRT KRAK STEBRA+ STOJINA 10mm+ POLNO JEKLO	M12 12.9 (BREZ OJAČITVENIH PLOŠČIC)

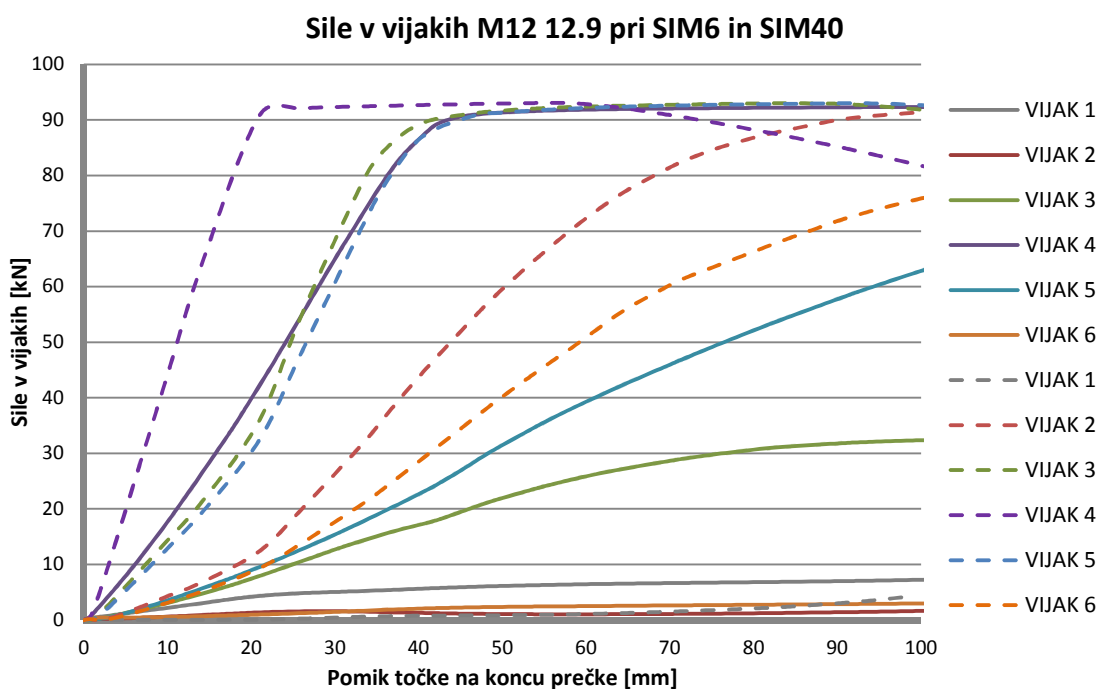
Na grafikonu 19 je prikazana nosilnost in pomik modela SIM40, kje smo spoj stropnega vogalnika in stebra naredili le z vijaki. Na grafu sta prikazani še krivulji odziva simulacij modelov SIM6 in SIM33. Tako lahko primerjamo, kolikšna je nosilnost ojačanega modela (SIM32) z začetnim neojačanim modelom (SIM6). Togost modela SIM40 se je z ojačevanjem nosilnih elementov bistveno povečala. Povečanje togosti vidimo v večjem naklonu premice v linearnem delu, preden se začne model plastificirati in preidemo v nelinearno območje obnašanja modela. Prav tako se je zaradi izbire boljšega materiala povečala nosilnost. Ta pri modelu SIM33 znaša 42,7 kN, pri 100 mm vertikalnega pomika, medtem ko pri modelu SIM6 znaša 24,7 kN. Nosilnost modela smo z ojačevanjem zvišali kar za 18 kN.

Grafikon 19: Primerjava nosilnosti med modeli numeričnih simulacij SIM6, SIM33 in SIM40.

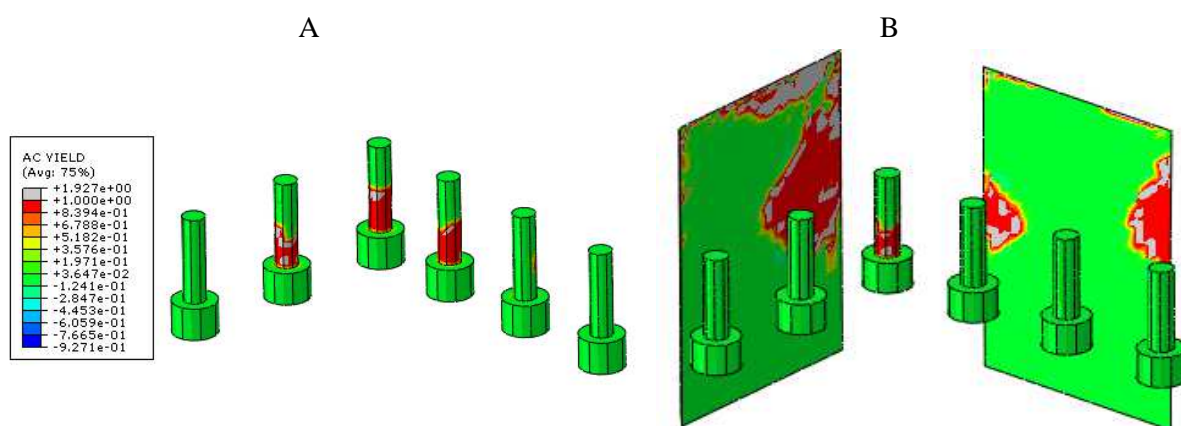


Ko smo modelu SIM33 odstranili ojačitveni ploščici, smo dobili nosilnost modela, če v spoju uporabimo samo vijake (SIM40). Vidimo, da je ta, v primerjavi s SIM33, bistveno manjša. Največja vertikalna sila, ki jo je sistem sposoben prenesti znaša 27,5 kN. Togost sistema SIM40 je sicer večja kot pri SIM6, zaradi vseh ojačitev, ki smo jih z izboljševanjem modela uporabili. Zavedati se moramo, da ne bi dobili pravilne nosilnosti vijakov z modelom, pri katerem bi bil kritičen drugi nosilni element, kot vijaki. Zaradi tega je večja togost modela SIM40, v primerjav z modelom SIM6 nepomembna in jo lahko zanemarimo, saj nas zanima le največja vertikalna obremenitev, ki jo vijaki lahko prenesejo.

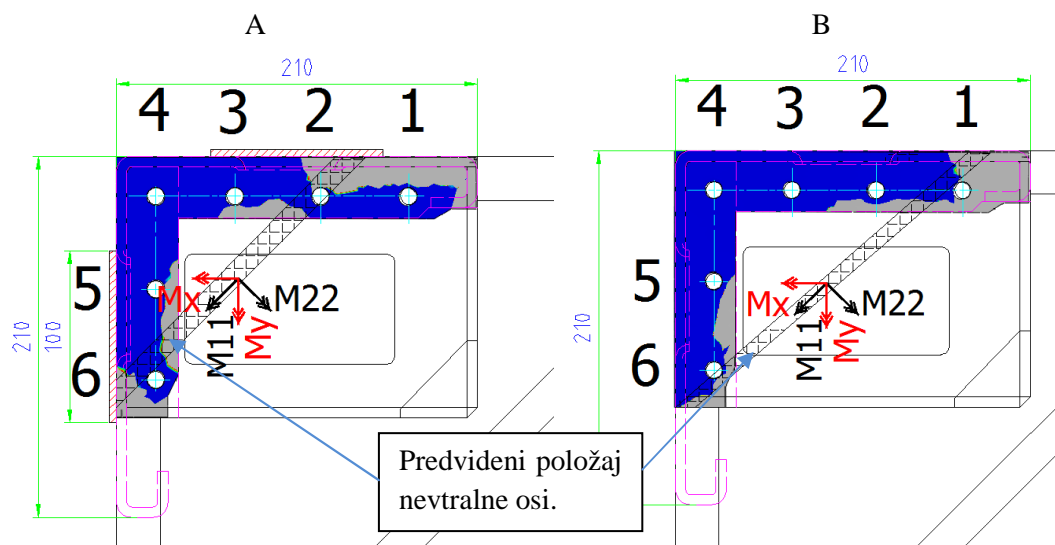
Grafikon 20: Primerjava nosilnosti vijakov modela SIM6 (polne črte) in SIM40 (črtkane črte).



Na grafikonu 20 lahko primerjamo sile v vijakih med simulacijama SIM6 (vijaki in ojačitveni ploščici) in SIM40. Sile v vijakih modela SIM40, so v odvisnosti od pomika prečke prikazane s črtkano črto, medtem ko so sile v vijakih modela SIM6 prikazane s polno črto. Vidimo, da so vijaki pri modelu SIM40 bistveno bolj obremenjeni, kot so pri modelu SIM6, kjer k nosilnosti spoja pripomorejo tudi ojačitveni ploščici. Vijak številka 4 polno nosilnost doseže kmalu po začetku obremenjevanja modela in v pol krajšem času kot pri modelu SIM6. Zanimiv je odziv vijakov 3 in 5, pri katerih se intenziteta obremenjevanja poveča, ko vijak 4 doseže plastifikacijo materiala. To se zgodi pri 20 mm vertikalnega pomika točke na koncu nosilca. Takrat se začne prirastek sile v vijaku povečevati hitreje, saj vijak 4 ne more več prevzeti dodatne obremenitve. Pri 55 mm vertikalnega pomika so tako vijaki 3, 4 in 5 že v celoti plastificirani. Velikost plastifikacije omenjenih vijakov lahko vidimo na sliki 57A, kjer vidimo, da so stebila vijakov 3, 4 in 5 v celoti plastificirana. Zaradi spremembe zasnove spoja se je premaknila tudi predvidena lokacija nevtralne osi. To smo določili iz kontaktnih tlakov med priključnimi pločevinami in je prikazana na sliki 58A.



Slika 57: A- Plastifikacija vijakov pri SIM40 in 55mm pomiku točke na koncu nosilca; B- Plastifikacija vijakov in ojačitvenih ploščic pri SIM6 in 55mm pomiku točke na koncu nosilca (Poglavje 6.2);



Slika 58: A- Območje predvidene lokacije nevtralne osi SIM40; B- A- Območje predvidene lokacije nevtralne osi SIM6.

7 ZAKLJUČEK

Projektiranje nosilnih elementov in spojev v jeklenih konstrukcijah je izjemno zahtevno. Zaradi kompleksnosti se pri klasičnih spojih v jeklenih konstrukcijah poslužujemo poenostavitve. Če pa je zasnova spoja zapletena in so prečni prerezi nenavadnih oblik, pa je dokazovanje nosilnosti še toliko bolj zapleteno. To dokazujemo s preizkusi pri pooblaščenih inštitutih, ki razpolagajo s primerno opremo za izvajanje testov. Ti so lahko izjemno dragi, poleg tega pa ne moremo zajeti vseh podatkov o obnašanju preizkušancev. Marsikaterih komponent sploh ne moremo izmeriti.

Kot smo videli, si lahko pri zapletenih statičnih problemih, pri določanju nosilnosti gradbenih elementov pomagamo s primernimi računalniškimi programi, kot je program ABAQUS. Tako lahko z natančnimi vhodnimi podatki, kot so geometrija, materialne karakteristike, robni pogoji, itd., simuliramo obnašanje modelov. Te lahko poljubno spreminjamo in popravljamo, saj lahko teste večkratno ponavljamo, izboljšujemo in preučujemo, kaj se z modelom dogaja, če spreminjamo določene parametre.

Tako je bilo zelo pomembno, da smo za materialne modela uporabili pravilne podatke. Kot smo ugotovili, je kvaliteta jekla v povprečju višja kot je nazivna natezna trdnost materiala. Ugotovili smo, da dobimo drugačno obnašanje modela, če smo za materialne karakteristike uporabili materialne podatke enoosnega nateznega preizkusa, kot pa bilinearni diagram, kjer upoštevamo rahlo utrjevanje materiala.

V magistrskem delu smo tako na podlagi enoosnih nateznih preizkusov trdnosti jekla, na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani in eksperimentalnih testov stropnega vogalnika na ZAG-u, izdelali numerični model v programu ABAQUS. Pri numerični simulaciji, ki je imela enake robne pogoje, obtežbo in material, kot testni vzorci na ZAG-u, smo z uporabo metode končnih elementov, dobili podoben odziv modela na obtežbo, kot pri testnih vzorcih (SIM6). Numerične simulacije lahko kvalitetno nadomestijo realne teste, poleg tega pa lahko pri simulacijah spreminjamo robne pogoje in teste večkratno ponavljamo.

Zanimal nas je tudi vpliv osne sile na nosilnost modela. Ugotovili smo, da osna sila na nosilnost nima tako velik vpliv, ko je model še v linearnem območju. Ko pa pride enkrat do prve plastifikacije v modelu, pa osna sila zmanjšuje nosilnost. Ugotovili smo namreč, da se zaradi upogibne obremenitve ukloni plašč stropnega vogalnika. Sila zaradi lokalnega izbočenja plašča zmanjšuje nosilnost modela. Plašč stopnega vogalnika se je izbočil zaradi lokalnega vnosa sile, zato smo poskušali nosilnost modela izboljšati z dodatnim rebrom v stojini. Z njim smo povečali odpornost na vnos koncentrirane sile, poleg tega pa smo bočno stabilizirali plašč.

Nosilnost modelov smo nato nadgrajevali z dodatnimi elementi in spreminjanjem kvalitete materiala, ter pri tem spremljali obnašanje modela pri enakih robnih pogojih in obtežbi. Ugotovili smo, da na togost sistema vplivamo le s spreminjanjem geometrije in dodajanjem ojačitev (rebra, diagonale,...). S povečevanjem togosti pa se nam je povečala tudi nosilnost elementov, saj smo dosegali višje vrednosti največjih sil V_z , preden je prišlo do porušitve vzorca. Pri nekaterih simulacijah do porušitve vzorca sploh ne pride, saj krivulje pri 100 mm vertikalnega pomika še vedno naraščajo in lahko predpostavimo, da bi bile največje sile višje. Odločili smo se namreč, da zaradi primerjave modelov med seboj, vse obremenjujemo do enakega vertikalnega pomika. Ugotovili smo tudi, da se s povečevanjem kvalitete jekla, ne povečuje sila, pri kateri pride do plastifikacije modela. Z boljšo kvaliteto jekla se je povečevala le nosilnost.

Dotaknili smo se tudi nosilnosti spoja vijakov in ojačitvenih ploščic. Spremljali smo lahko velikost sile v posameznem vijaku in plastifikacijo ploščic pri različni stropni vertikalne obtežbe. Sile v vijakih smo izračunali iz kontaktnih napetosti med glavo vijaka in priključnimi pločevinami. Tako smo lahko spremljali, pri kateri obtežbi pride do plastifikacije vijaka. Po pričakovanju je prišlo do plastifikacije na navojnem delu, saj je prečni prerez vijaka tam najmanjši.

Ugotovili smo tudi kolikšna je nosilnost spoja, če so v spoju uporabljeni le vijaki. S primerjavo modelov SIM6 in SIM40 smo ugotovili, da nosilnost ojačitvenih ploščic bistveno pripomore k nosilnosti. Ploščici povečata tudi togost modela, saj je premica sile obremenjevanja in pomika (SIM40) pod ostrejšim naklonom kot pri SIM6. Če bi želeli doseči enako nosilnost spoja samo z vijaki, bi bilo potrebno povečati prečni prerez vijakov, posledično pa bi morali povečati tudi širine priključnih pločevin.

8 VIRI

Beg, D. 2009. Jeklene konstrukcije 1 B-UNI. Študijsko gradivo - prosojnice. Ljubljana, Univerza v Ljubljani: loč. pag.

Beg, D. 2011. Jeklene konstrukcije 2 MA-UNI. Študijsko gradivo - prosojnice. Ljubljana, Univerza v Ljubljani: loč. pag.

Beg, D. Projektiranje jeklenih konstrukcij v skladu z Evrokodom 3. Kratek povzetek. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za metalne konstrukcije: str. 38, 72.

SIST EN 1993-1-1: 2005. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij - 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo.

Elektronski viri:

ETA. 2016.

<http://www.eota.eu/en-GB/content/what-is-an-eta/18/> (Pridobljeno 14.3.2016.)

Maticamb. 2016.

<http://maticamb.si/> (Pridobljeno 13.1.2016.)

Plastic model. 2016.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Plasticity> (Pridobljeno 13.1.2016.)

REM-reference.

<http://www.rem.si/en/brochures/> (Pridobljeno 4.4.2016.)

SIMULIA. 2016.

<http://www.simulia.com/download/rum11/UK/Feedback-Presentation-1.pdf> (Pridobljeno 5.3.2016.)

Trimo. 2015.

http://www.trimo.si/media/strehe-in-fasade_13017.pdf (Pridobljeno 9.10.2015)