

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:

Hlastec, J., 2015. Obnašanje tlačno obremenjenih enojno simetričnih jeklenih profilov. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Sinur, F., somentor Može, P.): 96 str.

Datum arhiviranja: 20-11-2015

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:

Hlastec, J., 2015. Obnašanje tlačno obremenjenih enojno simetričnih jeklenih profilov. Master Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Sinur, F., co-supervisor Može, P.): 96 pp.

Archiving Date: 20-11-2015

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:

**JAN HLASTEC**

**OBNAŠANJE TLAČNO OBREMENJENIH ENOJNO  
SIMETRIČNIH JEKLENIH PROFILOV**

Magistrsko delo št.: 13/II.GR

**BEHAVIOUR OF SINGLY SYMMETRIC STEEL  
PROFILES SUBJECTED TO COMPRESSIVE FORCE**

Graduation – Master Thesis No.: 13/II.GR

**Mentor:**

doc. dr. Franc Sinur

**Somentor:**

doc. dr. Primož Može

Ljubljana, 03. 11. 2015

## **STRAN ZA POPRAVKE**

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

»Ta stran je namenoma prazna.«

## **IZJAVE**

Podpisani Jan Hlastec izjavljam, da sem avtor magistrskega dela z naslovom »Obnašanje tlačno obremenjenih enojno simetričnih jeklenih profilov«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 21. september 2015

Jan Hlastec

»Ta stran je namenoma prazna.«

## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

- UDK:** 006.7/.8:624.014.2(043.3)
- Avtor:** Jan Hlastec
- Mentor:** doc. dr. Franc Sinur
- Somentor:** doc. dr. Primož Može
- Naslov:** Obnašanje tlačno obremenjenih enojno simetričnih jeklenih profilov
- Tip dokumenta:** Magistrsko delo – B.
- Obseg in oprema:** 96 str., 21 pregl., 24 sl., 61 graf., 102 en., 2 pril.
- Ključne besede:** uklonska nosilnost jeklenih elementov, enojno simetrični jekleni profili, enakokraki kotni profili, torzijski, torzijsko-upogibni in upogibni uklon, SIST EN 1993, SIST EN 1999

### **Izvelek:**

V magistrskem delu so obravnavani tlačno obremenjeni enojno simetrični jekleni profili. Podrobneje so analizirani centrično in ekscentrično tlačno obremenjeni vroče valjani jekleni elementi s prečnim prerezom kotnika. Predstavljeni so postopki določitve uklonske nosilnosti za elemente s kompaktnim in vitkim prečnim prerezom po evropskih Evrokod in ameriških AISC standardih. Predstavljeni postopki so uporabljeni pri izračunu uklonske nosilnosti izbranega elementa z vitkim prečnim prerezom. Vpliv zaostalih napetosti in geometrijskih nepopolnosti, ki so posledica načina izdelave jeklenih elementov, je v standardih upoštevan v uklonskih krivuljah. V numeričnih simulacijah obnašanja tlačno obremenjenih kotnih profilov v programskem okolju Abaqus, so bile omenjene materialne in geometrijske nepopolnosti združene v ekvivalentne geometrijske nepopolnosti z ustrezno amplitudo. Rezultati numeričnih simulacij centrično obremenjenih kotnikov s kompaktnim prečnim prerezom se ujemajo z ustrezno uklonsko krivuljo. Pri ekscentrično obremenjenih elementih je ustreznost numeričnega modela preverjena s primerjavo rezultatov uklonske nosilnosti z rezultati tujih raziskovalcev. Rezultati numeričnih simulacij centrično in ekscentrično obremenjenih elementov so nadalje primerjani z rezultati standardov. Podani so predlogi za natančnejši izračun uklonske nosilnosti enojno simetričnih jeklenih profilov in poenotenje različnih delov standardov.

»Ta stran je namenoma prazna.«



## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 006.7/.8:624.014.2(043.3)

**Author:** Jan Hlastec

**Supervisor:** Assist. Prof. Franc Sinur, Ph. D.

**Cosupervisor:** Assist. Prof. Primož Može, Ph. D.

**Title:** Behaviour of singly symmetric steel profiles subjected to compressive force

**Document type:** Master's Thesis

**Scope and tools:** 96 p., 21 tab., 24 fig., 61 graph., 102 eq., 2 ann.

**Keywords:** buckling design of steel elements, singly symmetric steel profiles, equal leg angles, torsional, torsional-flexural and flexural buckling, SIST EN 1993, SIST EN 1999

### **Abstract:**

This Master Thesis deals with singly symmetric steel profiles subjected to compressive force. Detailly are analysed centrally and eccentrically loaded hot rolled steel elements with equal leg cross-section. The procedures for determining the buckling load for elements with a compact and slender cross-section according the European Eurocodes and American AISC standards are presented. Featured procedures are used in the calculations of buckling capacity for selected element with a slender cross-section. Influence of residual stresses and geometrical imperfections resulting from the method of manufacture of steel elements, is incorporated in buckling curves. Numerical analysis of buckling behaviour were calculated in numerical environment Abaqus. In numerical simulations material and geometric imperfections were combined in an equivalent geometric imperfection with the corresponding amplitude, so that the results of numerical simulations for centrally loaded elements with a compact cross-section coincide with the corresponding buckling curve in Eurocode standard. Adequacy of the numerical model eccentrically loaded elements was validated by comparing the results of the buckling load by the results of other researchers. The results of numerical simulations centrally and eccentrically loaded elements are further compared with the results calculated according the standards. Proposals for less complicated and more accurate calculations are given for standards.

»Ta stran je namenoma prazna.«

## **ZAHVALA**

Iskreno se zahvaljujem mentorju doc. dr. Francu Sinurju za vse strokovne razlage, nasvete, spodbudo in pomoč pri izdelavi magistrskega dela.

Zahvala gre tudi somentorju doc. dr. Primožu Možetu in sodelavcem na Katedri za metalne konstrukcije za pomoč in spodbudno delovno okolje.

Sošolci in kolegi s fakultete, hvala vam za nepozabna študentska leta.

Hvala staršem, ki so mi študij omogočili in me pri njem podpirali.

Posebna zahvala pa tebi Špela, za razumevanje v času študija in spodbudo pri izdelavi tega dela.

»Ta stran je namenoma prazna.«

## KAZALO VSEBINE

<b>STRAN ZA POPRAVKE .....</b>	<b>I</b>
<b>IZJAVE .....</b>	<b>III</b>
<b>BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK .....</b>	<b>V</b>
<b>BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT .....</b>	<b>VII</b>
<b>ZAHVALA .....</b>	<b>IX</b>
<b>KAZALO VSEBINE .....</b>	<b>XI</b>
<b>KAZALO PREGLEDNIC .....</b>	<b>XII</b>
<b>KAZALO SLIK .....</b>	<b>XIII</b>
<b>KAZALO GRAFIKONOV .....</b>	<b>XIV</b>
<b>KAZALO PRILOG .....</b>	<b>XVI</b>
<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2 NOSILNOST TLAČNO OBREMENJENIH JEKLENIH ELEMENTOV .....</b>	<b>4</b>
<b>3 CENTRIČNO OBREMENJENI ENAKOKRAKI KOTNI PROFILI .....</b>	<b>8</b>
3.1 Uklonska nosilnost kotnih profilov .....	9
3.1.1 SIST EN 1993-1-1 .....	11
3.1.2 SIST EN 1993-3-1 .....	15
3.1.3 SIST EN 1999-1-1 (Uporaba principa določitve uklonske nosilnosti za jeklene elemente) .....	18
3.1.4 AISC .....	22
3.2 Primerjava standardov .....	25
3.3 Numerične simulacije obnašanja centrično obremenjenih vitkih kotnikov .....	30
3.4 Primerjava rezultatov numeričnih simulacij z rezultati standardov .....	39
3.5 Predlogi za ustrežnejši izračun uklonske nosilnosti .....	43
3.5.1 Youngov predlog o spremembi enačbe standarda AISC za upogibni uklon .....	43
3.5.2 Uklonska krivulja za torzijski in torzijsko-upogibni uklon v SIST EN 1993-1-1 .....	44
3.5.3 Uporaba redukcijskega faktorja $\eta$ v SIST EN 1993-3-1 .....	46
3.5.4 Sprememba uklonske krivulje SIST EN 1999 .....	47
3.5.5 Določitev nove družine uklonskih krivulj .....	49
<b>4 EKSCENTRIČNO OBREMENJENI ENAKOKRAKI KOTNI PROFILI .....</b>	<b>51</b>
4.1 Uklonska nosilnost kotnih profilov .....	51
4.1.1 SIST EN 1993-1-1 .....	51
4.1.2 SIST EN 1993-3-1 .....	54
4.1.3 SIST EN 1999-1-1 (Uporaba principa določitve uklonske nosilnosti za jeklene elemente) .....	56
4.1.4 AISC .....	57
4.2 Primerjava standardov .....	61
4.3 Numerične simulacije obnašanja ekscentrično obremenjenih vitkih kotnikov .....	65
4.3.1 Začetne nepopolnosti v obliki sinusoide z enim polvalom .....	67
4.3.2 Začetne nepopolnosti v obliki torzijskega zasuka .....	68
4.3.3 Začetne nepopolnosti v obliki lokalnih nepopolnosti .....	70
4.3.4 Začetne nepopolnosti v obliki prve uklonske oblike .....	72
4.3.5 Izbira začetnih nepopolnosti v numerični analizi .....	72
4.4 Rezultati numeričnih simulacij .....	73
4.4.1 Členkasto podprti elementi (spoji z enim vijakom) .....	73
4.4.2 Vpeti elementi (spoji z dvema vijakoma) .....	76
4.5 Primerjava rezultatov numeričnih simulacij z rezultati standardov .....	78
4.5.1 Členkasto podprti elementi (spoji z enim vijakom) .....	78
4.5.2 Vpeti elementi (spoji z dvema vijakoma) .....	82
4.6 Predlogi za ustrežnejši izračun uklonske nosilnosti .....	85

4.6.1	Uporaba torzijskega in torzijsko-upogibnega uklona v SIST EN 1993-3-1 .....	85
4.6.2	Sprememba redukcije upogibnega uklona SIST EN 1999 .....	88
4.6.3	Upoštevanje torzijskega in torzijsko-upogibnega uklona v AISC.....	89
<b>5</b>	<b>ZAKLJUČKI .....</b>	<b>92</b>
<b>VIRI .....</b>	<b>.....</b>	<b>94</b>
	Uporabljeni viri .....	94
	Ostali viri.....	95
	Standardi.....	95

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Faktorji nepopolnosti (SIST EN 1993-1-1, Preglednica 6.1) .....	12
Preglednica 2: Izbira uklonske krivulje (SIST EN 1993-1-1, Preglednica 6.2) .....	12
Preglednica 3: Izbira faktorja efektivne vitkosti $k$ (SIST EN 1993-3-1, Preglednica G.1) .....	17
Preglednica 4: Vrednosti $\alpha$ in $\lambda_0$ za upogibni uklon (SIST EN 1999-1-1, Preglednica 6.6).....	19
Preglednica 5: Vrednosti $\alpha$ in $\lambda_0$ ter izbira $A_{eff}$ za torzijski in torzijsko-upogibni uklon (SIST EN 1999-1-1, Preglednica 6.7) .....	20
Preglednica 6: Rezultati izračuna uklonske nosilnosti centrično obremenjenega enakokrakega kotnika .....	26
Preglednica 7: Materialne karakteristike .....	30
Preglednica 8: Kombinacija ekvivalentnih nepopolnosti (Sinur in sod., 2013) .....	35
Preglednica 9: Razmerja $b/t$ uporabljena v numerični analizi .....	37
Preglednica 10: Pomik in zasuk prečnega prereza centrično podprtega elementa .....	38
Preglednica 11: Sprememba faktorjev.....	48
Preglednica 12: Izbira geometrijskih karakteristik (SIST EN 1991-1-1, Preglednica 6.7) .....	52
Preglednica 13: Izbira faktorja efektivne vitkosti $k$ (SIST EN 1993-3-1, Preglednica G.2) .....	55
Preglednica 14: Primerjava rezultatov za kotnik z razmerjem $b/t=20$ pri povezavi z enim vijakom ....	61
Preglednica 15: Primerjava rezultatov za kotnik z razmerjem $b/t=20$ pri povezavi z dvema vijakoma	61
Preglednica 16: Materialne karakteristike .....	72
Preglednica 17: Primerjava rezultatov različnih numeričnih modelov.....	73
Preglednica 18: Pomik in zasuk prečnega prereza na sredini razpona členkasto podprtega elementa..	74
Preglednica 19: Deformiranje elementa z razmerjem $b/t=17$ na sredini razpona.....	75
Preglednica 20: Pomik in zasuk prečnega prereza na sredini razpona togo vpetega elementa .....	77
Preglednica 21: Deformiranje elementa z razmerjem $b/t=17$ na sredini razpona.....	78

## KAZALO SLIK

Slika 1: Deformiranje pločevin kotnika pri lokalni nestabilnosti.....	1
Slika 2: Zasuk in pomik prečnega prereza in elementa pri globalnih nestabilnostih .....	2
Slika 3: Ravnotežje sil na deformiranem elementu.....	4
Slika 4: Uklonske dolžine (Beg, D. Projektiranje jeklenih konstrukcij...) .....	5
Slika 5: Vpliv elasto-plastičnosti materiala na uklonsko nosilnost.....	6
Slika 6: Vpliv zaostalih napetosti.....	6
Slika 7: Vpliv geometrijskih nepopolnosti.....	7
Slika 8: Število kotnikov glede na vitkost prereza (Sinur in Može, 2015).....	7
Slika 9: Enojno in dvojno simetrični prečni prerezi (SIST EN 1993-1-1) .....	8
Slika 10: Geometrijski in glavni osi, težišče in strižno središče kotnika .....	8
Slika 11: Dimenzije profilov za določanje kompaktnosti (SIST EN 1993-1-1, Preglednica 5.2).....	9
Slika 12: Zaostale napetosti v vroče valjanih (levo) in hladno oblikovanih (desno) kotnikih .....	9
Slika 13: Slika podpore in obtežbe (levo) in vezi (desno).....	31
Slika 14: Shematičen prikaz mreže končnih elementov.....	32
Slika 15: Predznak ekvivalentnih nepopolnosti glede na smer pomika (Sinur, 2015) .....	32
Slika 16: Zasuk kotnika (Sinur, 2015) .....	34
Slika 17: Predlagani postopek izračuna uklonske nosilnosti (Sinur in Može, 2015) .....	45
Slika 18: Slika podpore in obtežbe (levo) in vezi (desno).....	66
Slika 19: Tolerance pri izdelavi (EN 10056-2, Preglednica 1) .....	67
Slika 20: Uklonska oblika v obliki sinusoide z enim polvalom .....	67
Slika 21: Torzijska uklonska oblika kotnika .....	69
Slika 22: Tolerance pri izdelavi (EN 10056-2, Preglednica 1) .....	70
Slika 23: Lokalne nepopolnosti na obremenjenem kraku .....	70
Slika 24: Velikost pomikov (levo) in razporeditev napetosti (desno) ob lokalnem izbočenju.....	71

**KAZALO GRAFIKONOV**

Grafikon 1: Uklonske krivulje za upogibni uklon po SIST EN 1993.....	13
Grafikon 2: Uklonski krivulji za upogibni uklon po SIST EN 1999 .....	19
Grafikon 3: Uklonski krivulji za torzijski in torzijsko-upogibni uklon po SIST EN 1999.....	21
Grafikon 4: Uklonska krivulja za upogibni uklon elementov s kompaktnim prečnim prerezom po AISC .....	23
Grafikon 5: Primerjava standardov pri $b/t=15$ , centrična obremenitev .....	27
Grafikon 6: Primerjava standardov pri $b/t=17$ , centrična obremenitev .....	27
Grafikon 7: Primerjava standardov pri $b/t=20$ , centrična obremenitev .....	28
Grafikon 8: Primerjava standardov pri $b/t=22$ , centrična obremenitev .....	28
Grafikon 9: Primerjava standardov pri $b/t=25$ , centrična obremenitev .....	29
Grafikon 10: Primerjava standardov pri $b/t=30$ , centrična obremenitev .....	29
Grafikon 11: Grafikon $\sigma$ - $\epsilon$ za idealen elasto-plastičen material z utrditvijo $E/10000$ .....	31
Grafikon 12: Vpliv velikosti upogibnih ekvivalentnih nepopolnosti s pozitivnim predznakom na uklonsko nosilnost (Sinur in sod., 2013) .....	33
Grafikon 13: Vpliv velikosti upogibnih ekvivalentnih nepopolnosti z negativnim predznakom na uklonsko nosilnost (Sinur in sod., 2013) .....	33
Grafikon 14: Vpliv velikosti torzijskih ekvivalentnih nepopolnosti na uklonsko nosilnost (Sinur in sod., 2013) .....	34
Grafikon 15: Numerični rezultati za kompakten prečni prerez in uklonske krivulje (Sinur in sod., 2013).....	36
Grafikon 16: Numerični rezultati za kompakten prečni prerez in uklonske krivulje (Sinur in sod., 2013).....	36
Grafikon 17: Rezultati numeričnih simulacij (Sinur in sod., 2013).....	37
Grafikon 18: Vpliv vitkosti na uklonsko nosilnost.....	39
Grafikon 19: Primerjava rezultatov pri $b/t=15$ , centrična obremenitev.....	40
Grafikon 20: Primerjava rezultatov pri $b/t=17$ , centrična obremenitev.....	40
Grafikon 21: Primerjava rezultatov pri $b/t=20$ , centrična obremenitev.....	41
Grafikon 22: Primerjava rezultatov pri $b/t=22$ , centrična obremenitev.....	41
Grafikon 23: Primerjava rezultatov pri $b/t=25$ , centrična obremenitev.....	42
Grafikon 24: Primerjava rezultatov pri $b/t=30$ , centrična obremenitev.....	42
Grafikon 25: Primerjava numeričnih rezultatov z Youngovim predlogom.....	44
Grafikon 26: Ujemanje rezultatov z uporabo T in TF uklonske krivulje (Sinur in Može, 2015) .....	46
Grafikon 27: Primerjava numeričnih rezultatov z analitičnimi rezultati z upoštevanim faktorjem $\eta$ ...	47
Grafikon 28: Primerjava numeričnih rezultatov s predlogom spremembe uklonske krivulje .....	48
Grafikon 29: Primerjava numeričnih rezultatov s predlogom uporabe drugega faktorja nepopolnosti	49



Grafikon 30: Primerjava numeričnih rezultatov s predlogom nove družine uklonskih krivulj .....	50
Grafikon 31: Primerjava standardov pri $b/t=11$ , ekscentrična obremenitev .....	62
Grafikon 32: Primerjava standardov pri $b/t=13$ , ekscentrična obremenitev .....	62
Grafikon 33: Primerjava standardov pri $b/t=15$ , ekscentrična obremenitev .....	63
Grafikon 34: Primerjava standardov pri $b/t=17$ , ekscentrična obremenitev .....	63
Grafikon 35: Primerjava standardov pri $b/t=20$ , ekscentrična obremenitev .....	64
Grafikon 36: Primerjava standardov pri $b/t=22$ , ekscentrična obremenitev .....	64
Grafikon 37: Odziv osnovnega modela v primerjavi z različnimi uklonskimi nosilnostmi .....	66
Grafikon 38: Vpliv nepopolnosti v obliki sinusoide z enim polvalom na uklonsko nosilnost .....	68
Grafikon 39: Vpliv torzijske nepopolnosti na uklonsko nosilnost .....	69
Grafikon 40: Vpliv lokalnih nepopolnosti na uklonsko nosilnost .....	71
Grafikon 41: Rezultati numeričnih simulacij členkasto podprtih elementov .....	74
Grafikon 42: Rezultati numeričnih simulacij togo vpetih elementov .....	76
Grafikon 43: Primerjava rezultatov pri $b/t=11$ , ekscentrična obremenitev .....	79
Grafikon 44: Primerjava rezultatov pri $b/t=13$ , ekscentrična obremenitev .....	79
Grafikon 45: Primerjava rezultatov pri $b/t=15$ , ekscentrična obremenitev .....	80
Grafikon 46: Primerjava rezultatov pri $b/t=17$ , ekscentrična obremenitev .....	80
Grafikon 47: Primerjava rezultatov pri $b/t=20$ , ekscentrična obremenitev .....	81
Grafikon 48: Primerjava rezultatov pri $b/t=22$ , ekscentrična obremenitev .....	81
Grafikon 49: Primerjava rezultatov pri $b/t=11$ , ekscentrična obremenitev .....	82
Grafikon 50: Primerjava rezultatov pri $b/t=13$ , ekscentrična obremenitev .....	83
Grafikon 51: Primerjava rezultatov pri $b/t=15$ , ekscentrična obremenitev .....	83
Grafikon 52: Primerjava rezultatov pri $b/t=17$ , ekscentrična obremenitev .....	84
Grafikon 53: Primerjava rezultatov pri $b/t=20$ , ekscentrična obremenitev .....	84
Grafikon 54: Primerjava rezultatov pri $b/t=22$ , ekscentrična obremenitev .....	85
Grafikon 55: Primerjava nosilnosti centrično in ekscentrično obremenjenih kotnikov po SIST EN 1993-3-1 .....	86
Grafikon 56: Primerjava rezultatov predlaganega postopka in numeričnih rezultatov .....	87
Grafikon 57: Primerjava rezultatov predlaganega postopka in numeričnih rezultatov .....	87
Grafikon 58: Primerjava rezultatov s predlogom uporabe faktorja $\eta=0,5$ za členkaste povezave .....	88
Grafikon 59: Primerjava rezultatov s predlogom uporabe faktorja $\eta=0,55$ za povezave z dvema vijakoma .....	89
Grafikon 60: Upoštevanje T in TF uklona pri členkasto podprtih elementih .....	90
Grafikon 61: Upoštevanje T in TF uklona pri kotnikih s povezavami z dvema vijakoma .....	90

**KAZALO PRILOG****Priloga A: Izračun uklonske nosilnosti centrično obremenjenega kotnika.....A1**

A.1: EC3-1-1 ..... A2

A.2: EC3-3-1 ..... A3

A.3: EC9-1-1 ..... A3

A.4: AISC ..... A4

**Priloga B: Izračun uklonske nosilnosti ekscentrično obremenjenega kotnika .....B1**

B.1: EC3-1-1 ..... B3

B.2: EC3-3-1 ..... B4

B.3: EC9-1-1 ..... B6

B.4: AISC ..... B7

## 1 UVOD

Jekleni elementi s prečnim prerezom kotnika se, zaradi ugodnega razmerja med težo in nosilnostjo ter enostavnosti povezovanja z drugimi elementi, v praksi zelo pogosto uporabljajo. Običajno v paličjih, sestavljenih nosilcih ter kot povezja ali samostojni nosilni elementi. V magistrskem delu so obravnavani tlačno obremenjeni vroče valjani enakokraki kotni profili. Kljub pogosti uporabi, obnašanje takšnih elementov ni dovolj raziskano, standardi pa večinoma podajajo konservativne rešitve njihove uklonske nosilnosti.

Z razvojem visoko trdnih jekel, ki zagotavljajo večjo nosilnost, so prečni prerezi postajali vse vitkejši, z zmanjševanjem dimenzij prečnih prerezov pa so tlačno obremenjeni elementi postali dovzetnejši za izgubo stabilnosti.

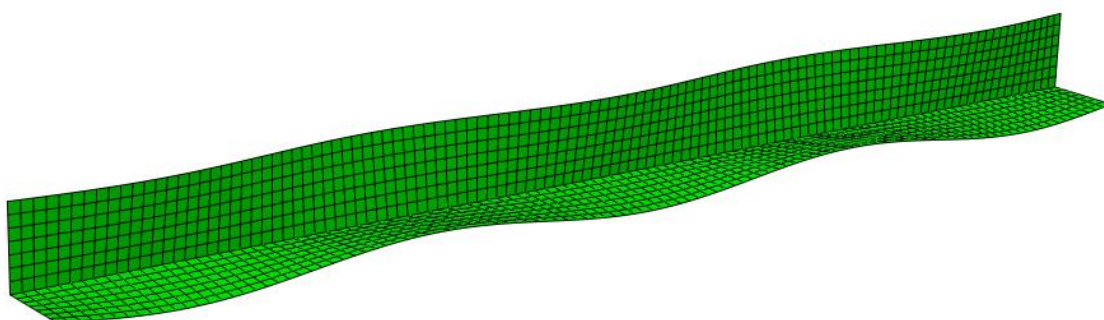
Odvisno od lastnosti prečnega prereza in dolžine elementa se v splošnem lahko razvijejo različne vrste nestabilnosti:

-lokalna nestabilnost

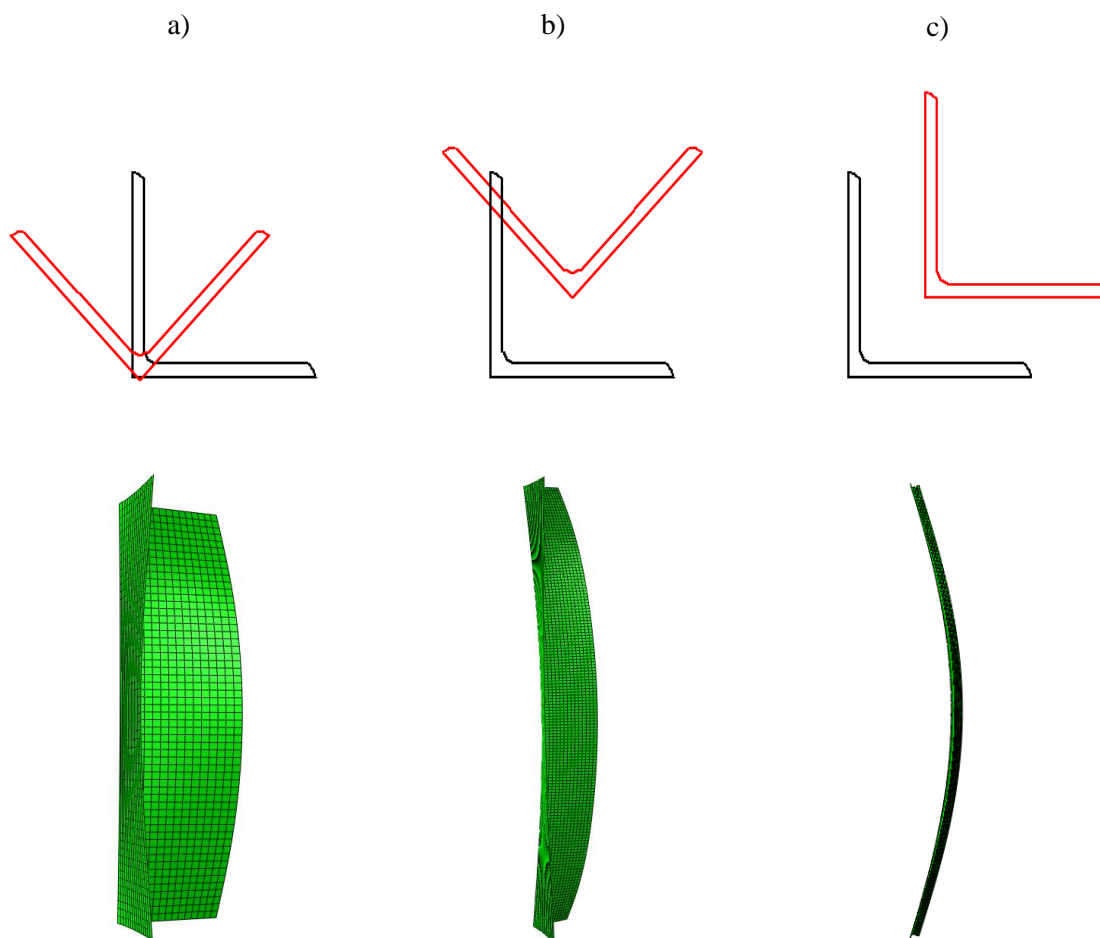
- izbočenje pločevin kraka (slika 1)

-globalne nestabilnosti

- torzijski uklon (slika 2a)
- torzijsko-upogibni uklon (slika 2b)
- upogibni uklon (slika 2c)



Slika 1: Deformiranje pločevin kotnika pri lokalni nestabilnosti



Slika 2: Zasuk in pomik prečnega prereza in elementa pri globalnih nestabilnostih

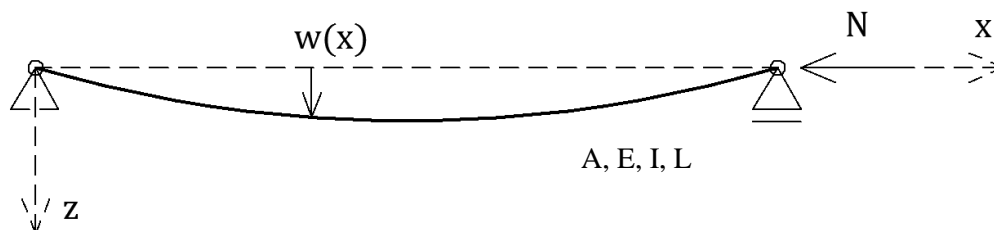
Odziv obravnavanih elementov je zaradi enojne simetrije prereza težko predvideti. Magistrsko delo se v prvem delu osredotoča na področje torzijskega in torzijsko-upogibnega uklona centrično obremenjenih vitkih kotnih profilov, kjer je element podprt in tlačno obremenjen v težišču prereza. Primerjani so postopki določitve uklonske nosilnosti po različnih standardih. Na podlagi rezultatov numeričnih simulacij obnašanja vitkih kotnikov so predlagani ukrepi za natančnejši izračun uklonske nosilnosti in poenotenje rešitev uklonske nosilnosti različnih delov standardov SIST EN 1993 in SIST EN 1999.

Elementi s prečnim prerezom kotnika se v praksi največkrat priključujejo preko vijačenega ali varjenega spoja na enem od krakov. V drugem delu magistrskega dela je zato analizirano obnašanje kotnih profilov, ki so obremenjeni ekscentrično preko le enega kraka. Podpora in obtežba sta zato v numeričnem modelu definirani v težišču enega od krakov kotnika. Zaradi ekscentričnosti obremenitve se v elementih poleg osne sile pojavi tudi upogibni moment, ki dodatno zmanjšuje nosilnost, hkrati pa je odziv elementa kompleksnejši. Izračun uklonske nosilnosti po različnih standardih je primerjan z rezultati numeričnih simulacij obnašanja tlačno obremenjenih kotnih profilov.

Cilj magistrskega dela je prikazati in primerjati rezultate analitičnih in numeričnih izračunov uklonske nosilnosti centrično in ekscentrično podprtih vroče valjanih elementov s kompaktnimi in vitkimi prečnimi prerezi. S pomočjo rezultatov numeričnih simulacij je razloženo obnašanje obravnavanih elementov, ugotovitve so primerjane s spoznanji drugih avtorjev. Nekateri deli standarda SIST EN 1993 med seboj niso usklajeni glede kompaktnosti prečnih prerezov in izračuna uklonske nosilnosti, zato so podani predlogi za harmonizacijo postopka določitve uklonske nosilnosti. Podani so komentarji in predlogi za enostavnejši in natančnejši izračun uklonske nosilnosti enojno simetričnih jeklenih profilov.

## 2 NOSILNOST TLAČNO OBREMENJENIH JEKLENIH ELEMENTOV

Uklonsko nosilnost geometrijsko in materialno idealnih elementov lahko določimo z Eulerjevo kritično silo, ki predstavlja elastično uklonsko nosilnost tlačno obremenjenega elementa. Določimo jo s pomočjo ravnotežja notranjih sil obremenjenega elementa v deformirani legi.



Slika 3: Ravnotežje sil na deformiranem elementu

Ravnotežna enačba:

$$M(x) = N w(x) \quad (1)$$

Kinematična enačba:

$$\frac{1}{R} \approx w''(x) = -\frac{M}{EI} \rightarrow M = -w''(x) EI \quad (2)$$

Z vstavitvijo kinematične enačbe v ravnotežno dobimo homogeno diferencialno enačbo tlačno obremenjenega elementa:

$$w''(x) EI + N w(x) = 0 \quad w''(x) + \omega^2 w(x) = 0 \quad \omega^2 = \frac{N}{EI}, \quad (3)$$

ki jo rešimo z nastavkom:  $w = A \sin(\omega x) + B \cos(\omega x)$ .

Ob upoštevanju robnih pogojev:

$$x = 0 \rightarrow w = 0 \quad \text{in} \quad x = L \rightarrow w = 0$$

dobimo netrivialno rešitev  $\omega L = n \pi, \quad n \in \mathbb{Z}$

Pri reševanju stabilnostnih problemov iščemo minimalno rešitev, zato dejansko dolžino elementa  $L$  zamenjamo z uklonsko dolžino  $l_u$ , ki predstavlja razdaljo med prevojnimi točkami uklonske oblike.

$$l_u = \frac{L}{n} \quad \omega^2 = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} = \frac{N_{cr}}{EI} \quad (4)$$

Eulerjeva kritična sila je torej določena kot minimalna vrednost, pri kateri se element ukloni in izhaja iz rešitve diferencialne enačbe za  $n=1$ :

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l_u^2} \quad (5)$$

Enačba (5) nam pove, da se pri konstantnih materialnih in geometrijskih lastnostih prečnega prereza vrednost Eulerjeve kritične sile spreminja s kvadratom uklonske dolžine. V primeru, da je element

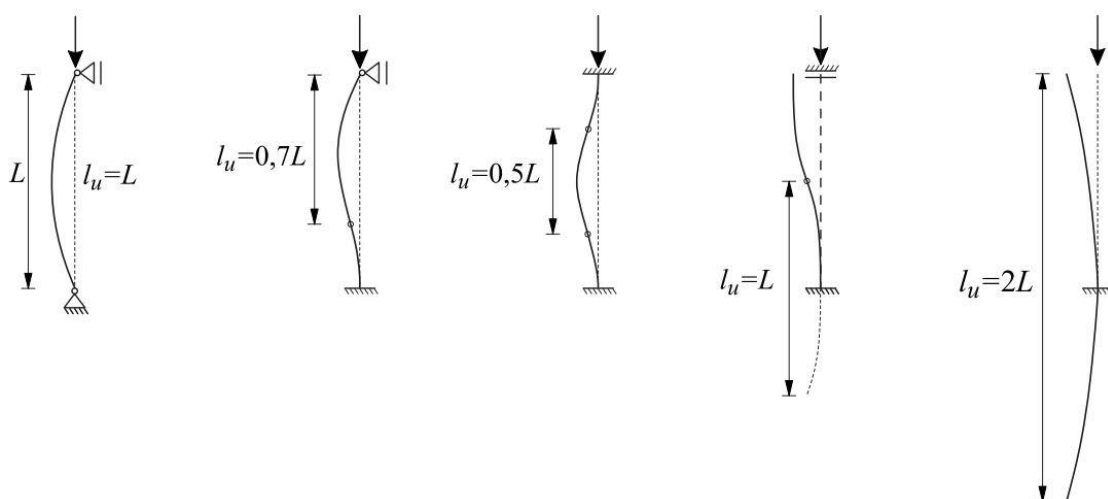
podprt tako, da je uklonska dolžina elementa dvakrat manjša od dolžine elementa, je za elastičen uklon potrebna štirikrat večja sila kot pri istem elementu, ki je podprt tako, da je uklonska dolžina enaka dolžini elementa.

Vitkost elementa določata uklonska dolžina in geometrijske karakteristike prečnega prereza, kot je določeno z enačbo 6. Na sliki 4 pa so prikazane uklonske dolžine, ki so odvisne od načina podpiranja elementa.

$$\lambda = \frac{l_u}{i} \quad (6)$$

Minimalna kritična napetost in vztrajnostni polmer sta določena kot:

$$\sigma_{cr} = \frac{N_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 E I}{A l_u^2} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}, \quad i^2 = \frac{I}{A} \quad (7)$$



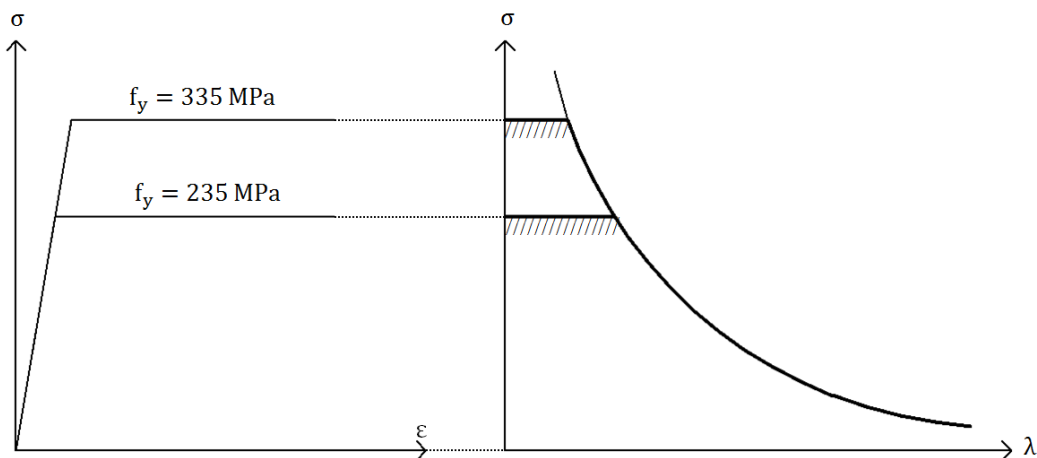
Slika 4: Uklonske dolžine (Beg, D. Projektiranje jeklenih konstrukcij...)

Pri določitvi dejanske uklonske nosilnosti je potrebno upoštevati, da je jeklo elasto-plastičen material in da so elementi v gradbenih konstrukcijah zaradi načina izdelave in obdelave geometrijsko nepopolni, prisotne pa so tudi zaostale napetosti. Eulerjeva kritična sila zato ne predstavlja dejanske nosilnosti, pomaga pa nam pri določitvi relativne vitkosti elementov, kot je določeno z enačbo (8).

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr}}}, \quad N_{pl} = A f_y \quad (8)$$

Relativno vitkost elementov določimo kot geometrijsko nosilnost, normalizirano z mejno nosilnostjo.

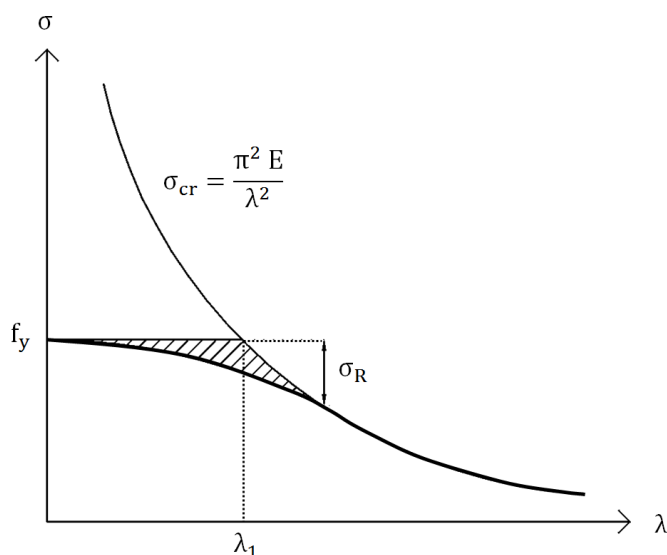
Vpliv elasto-plastičnosti materiala se kaže v omejitvi nosilnosti s polnoplastično nosilnostjo prereza.



Slika 5: Vpliv elasto-plastičnosti materiala na uklonsko nosilnost

Iz slike 5 je razvidno, da kriterij polno plastične nosilnosti prereza velja za elemente z majhno vitkostjo oziroma toge elemente.

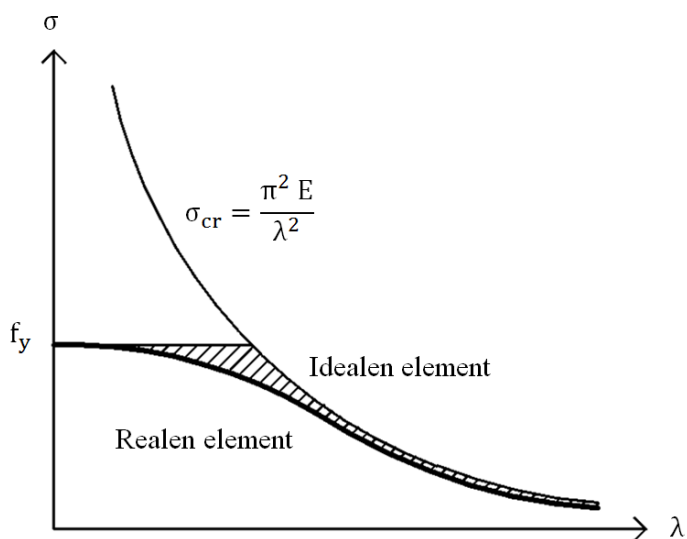
Zaostale napetosti  $\sigma_R$  zmanjšujejo togost, kar neugodno vpliva na nosilnost tlačno obremenjenih elementov. Njihov vpliv je največji v območju srednjih vitkosti  $\lambda \approx \lambda_1 = \pi \sqrt{E/f_y}$ , to je v območju prehoda iz meje plastičnosti materiala v Eulerjevo kritično silo  $f_y \approx \sigma_{cr}$ . Na sliki 6 je prikazana krivulja nosilnosti idealno ravne palice z upoštevanjem elasto-plastičnosti materiala in zaostalnih napetosti.



Slika 6: Vpliv zaostalnih napetosti

Geometrijske nepopolnosti, ki se jim pri realnih gradbenih elementih zaradi toleranc pri izdelavi ne moremo izogniti, zmanjšujejo nosilnost na celotnem območju vitkosti elementa. Na sliki 7 je poleg elasto-plastičnosti in vpliva zaostalnih napetosti prikazan tudi vpliv geometrijskih nepopolnosti.

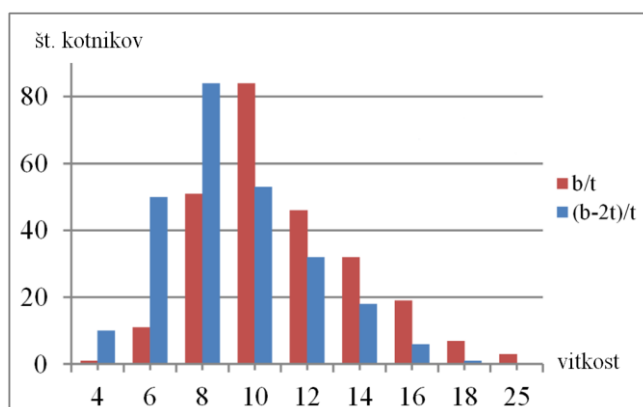




Slika 7: Vpliv geometrijskih nepopolnosti

Vpliv zaostalih napetosti in geometrijskih nepopolnosti lahko poenostavljeno zajamemo z ekvivalentnimi geometrijskimi nepopolnostmi. Vsi opisani vplivi so zajeti v uklonskih krivuljah različnih standardov, postopki določitve uklonske nosilnosti enojno simetričnih jeklenih profilov po standardih SIST EN in AISC so predstavljeni v nadaljevanju magistrskega dela.

Zaradi načina izračuna, vpliva na velikost uklonske nosilnosti tudi kompaktnost prečnega prereza. Standardi določajo uklonsko nosilnost na podlagi relativne vitkosti, ki se izračuna z enačbo (8). Za prečne prereze, ki ne izpolnjujejo kriterija kompaktnosti, kakor je predstavljeno v nadaljevanju, se določi efektivni prečni prerez  $A_{eff}$ . Glede na definicijo kompaktnosti po različnih standardih je bila analizirana ponudba dimenzij kotnikov pri proizvajalcu ArcelorMittal (Sinur in Može, 2015).

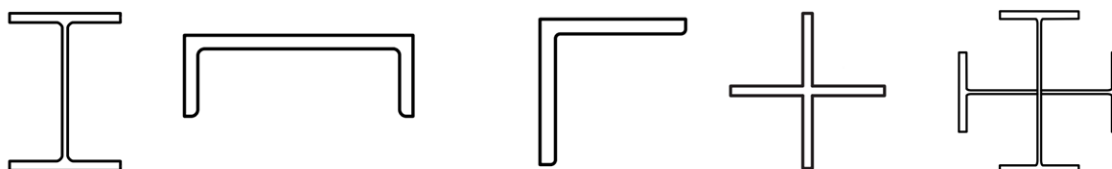


Slika 8: Število kotnikov glede na vitkost prereza (Sinur in Može, 2015)

Število zelo vitkih prečnih prerezov je glede na ponudbo omenjenega proizvajalca zelo majhno. Večinoma so zastopani prerezi z vitkostjo prereza  $b/t = 8$  in  $b/t = 10$ . Vitkosti večje od  $b/t = 20$  praktično niso zastopane.

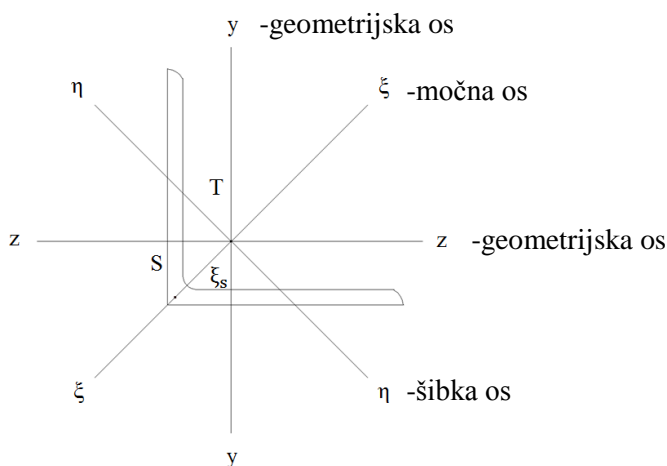
### 3 CENTRIČNO OBREMENJENI ENAKOKRAKI KOTNI PROFILI

Za centrično obremenjene elemente z dvojno simetričnim prerezom (simetrični I in H profili) je značilen upogibni uklon, medtem ko se elementi z nesimetričnim prečnim prerezom (nesimetrični I profili, C in U profili, L kotniki) ali odprtim prečnim prerezom (križni profili, iz zunanjih delov sestavljeni prečni prerezi) lahko uklonijo tudi torzijsko ali torzijsko-upogibno.



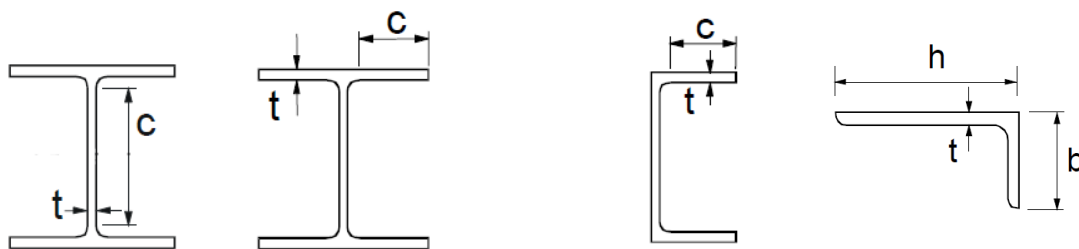
Slika 9: Enojno in dvojno simetrični prečni prerezi (SIST EN 1993-1-1)

Magistrsko delo se v prvem delu osredotoča na stabilnost centrično obremenjenih enakokrakih kotnih profilov in na določitev njihove uklonske nosilnosti. Odvisno od kompaktnosti prečnega prereza in dolžine elementa, se pri centrični osni obremenitvi takšnih elementov lahko razvije torzijski, torzijsko-upogibni ali upogibni uklon. V splošnem velja, da se kratki elementi uklonijo torzijsko, dolgi pa upogibno. Torzijsko-upogibni uklon je posledica oblike prečnega prereza, saj težišče  $T$ , v katerem deluje obremenitev, ne sovpada s strižnim središčem  $S$ , okoli katerega se element pri torzijskem uklonu zavrti. Zaradi ekscentričnosti  $\xi_s$  se dodatno pojavi še upogibni uklon. Interakcija torzijskega in upogibnega uklona je torej značilna za srednje dolge elemente z nesimetričnim, enojno simetričnim in odprtim prečnim prerezom.



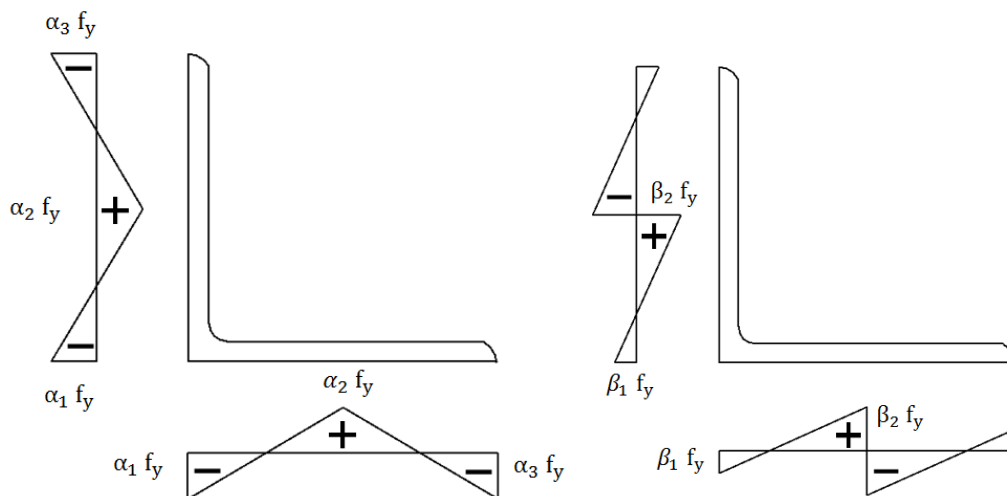
Slika 10: Geometrijski in glavni osi, težišče in strižno središče kotnika

Za nosilnost in stabilnost elementov je pomembna tudi kompaktnost prerezov, saj lokalno izbočenje pločevin pomeni izgubo nosilnosti ali pa vodi v uklon elementa. Standardi v ta namen podajajo omejitve razmerja  $c/t$  oziroma  $h/t$ , kot je določeno na sliki 11.



Slika 11: Dimenzije profilov za določanje kompaktnosti (SIST EN 1993-1-1, Preglednica 5.2)

Poleg oblike in kompaktnosti prereza ter dolžine elementa vplivajo na stabilnost tlačno obremenjenih jeklenih elementov že omenjene začetne nepopolnosti in zaostale napetosti, ki so odvisne od postopka izdelave konstrukcijskih elementov. Ločimo vroče in hladno oblikovane elemente. Vroče valjani elementi nastanejo v postopku kontinuiranega oblikovanja, ko material nad temperaturo kristalizacije potuje skozi serijo valjev, ki postopno oblikujejo prečni prerez. Hladno oblikovani jekleni elementi nastanejo s stiskanjem, vtiskanjem ali valjanjem relativno tankih jeklenih plošč pri sobni temperaturi v končno obliko. Na sliki 12 je prikazana primerjava razporeditve zaostalih napetosti pri vroče valjanih in hladno oblikovanih kotnih profilih. Odvisne so od debeline pločevine, njihove vplive pa je potrebno upoštevati v numeričnih simulacijah. Poudariti je potrebno, da je velikost zaostalih napetosti pri hladno oblikovanih elementih lahko bistveno večja kot pri vroče valjanih elementih ( $\alpha_i \ll \beta_i$ ).



Slika 12: Zaostale napetosti v vroče valjanih (levo) in hladno oblikovanih (desno) kotnikih

V magistrskem delu je obravnavan postopek izračuna uklonske nosilnosti enakokrakih vroče valjanih kotnih profilov po standardih SIST EN 1993, SIST EN 1999 in AISC. Uklonske krivulje so primerjane z rezultati numeričnih simulacij, ki so bile izvedene v okviru raziskav Katedre za metalne konstrukcije na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo, Univerze v Ljubljani.

### 3.1 Uklonska nosilnost kotnih profilov

Določitev nosilnosti vitkih tlačno obremenjenih kotnikov je zahteven postopek, saj je odziv elementov zaradi enojno simetričnega prereza z majhno torzijsko togostjo težko predvideti. Preveriti je potrebno različne načine izgube stabilnosti in določiti merodajno uklonsko nosilnost.

Popovic, Hancock in Rasmussen (1999) so primerjali rezultate eksperimentov tlačno obremenjenih hladno oblikovanih pocinkanih kotnikov z izračuni njihove nosilnosti po avstralskih in ameriških standardih za hladno oblikovane kotnike. Izbrane so bile tri skupine enakokrakih kotnih profilov z vitkostjo prečnega prereza  $b/t = 20, 12,5$  in  $10$  oziroma dolžino krakov  $50$  milimetrov in debelinami pločevine krakov  $2,5, 4$  in  $5$  milimetrov z oznakami  $L50 \times 50 \times 2,5, L50 \times 50 \times 4,0$  in  $L50 \times 50 \times 5,0$ . Po določitvi materialnih lastnosti ter velikosti in razporeditvi zaostalih napetosti, so izvedli obremenilne teste, kjer so vzorce, opremljene z merilnimi lističi, tlačno obremenili do porušitve. Zaradi primerjave in analize uklonskih dolžin je imelo  $12$  vzorcev vpete,  $18$  pa členkasto podprte robove. Izkazalo se je, da so avstralski in ameriški standardi v večini primerov zelo konservativni in da je nosilnost v testih med  $15$  in  $40\%$  večja od analitično izračunanih rezultatov. Pomembna ugotovitev je tudi, da je dodatno ekscentričnost v velikosti  $L/1000$ , ki povzroča upogibni moment okoli šibke osi, smiselno upoštevati samo pri vitkih prerezih. Avtorji v zaključku predlagajo dodatne raziskave pogoja kompaktnosti, saj je glede na trenutne zahteve avstralskega standarda le ta konservativen.

Ellobody in Young (2005) sta s pomočjo numeričnih simulacij nadgradila rezultate prve skupine raziskovalcev. Za potrebe numeričnih simulacij obnašanja hladno oblikovanih pocinkanih kotnikov so bile izvedene raziskave lastnosti materiala, razporeditve zaostalih napetosti in lokalnih začetnih nepopolnosti. V programskem okolju Abaqus je bila izvedena numerična simulacija odziva vitkih kotnih profilov pri tlačni osni obremenitvi. V numeričnih modelih je bila upoštevana izmerjena geometrija, začetne lokalne in globalne nepopolnosti, zaostale napetosti in materialne lastnosti vzorcev. S pomočjo uklonske analize je bila določena uklonska oblika in kritična obtežba. Dodatno je bila izvedena nelinearna analiza, s katero so ugotavljali odziv elementa po izgubi stabilnosti oziroma postkritično obnašanje. Z namenom verifikacije računalniških modelov, so izvedli poskuse na  $21$  vzorčnih elementih. Primerjava rezultatov je pokazala zelo majhno odstopanje, s čimer so potrdili ustreznost računalniških modelov. Nadalje so preučevali vpliv zaostalih napetosti, ki pa se je izkazal za zanemarljivega. Zaradi kompleksnosti modeliranja in majhnega vpliva na mejno nosilnost, togost in uklonsko obliko, so zaostale napetosti v parametrični študiji opustili. Avstralski in ameriški standardi so v primerjavi z rezultati numeričnih simulacij zelo konservativni, zato avtorja podajata modificirano enačbo za izračun kritične uklonske napetosti upogibnega uklona, ki je v nadaljevanju določena z enačbo (62). Uklonske nosilnosti, izračunane z modificirano enačbo, se dobro ujemajo z rezultati numeričnih analiz hladno oblikovanih kotnikov. Primerjava rezultatov modificirane uklonske enačbe in rezultatov numeričnih simulacij tlačno obremenjenih vroče valjanih kotnikov je prikazana v poglavju 3.5.

Čeprav se raziskave zgoraj omenjenih avtorjev nanašajo na uklonsko nosilnost hladno oblikovanih kotnih profilov, so njihove ugotovitve pomembne tudi za vroče valjane kotne profile.

V nadaljevanju so predstavljeni postopki izračuna uklonske nosilnosti vroče valjanih kotnikov po evropskih SIST EN 1993 in SIST EN 1999 ter ameriških standardih AISC. Obravnavano je področje

globalne izgube stabilnosti. Lokalno nestabilnost je potrebno preprečiti z izbiro kompaktnih prerezov, ali pa, kot je predstavljeno v nadaljevanju tega magistrskega dela, uporabiti ustrezne postopke določitve uklonske nosilnosti, ki jih podajajo standardi.

### 3.1.1 SIST EN 1993-1-1

Standard SIST EN 1993 del 1-1 podaja rešitev nosilnosti tlačno obremenjenih elementov v obliki uklonskih krivulj. Odvisno od oblike prečnega prereza in načina izdelave je podanih 5 krivulj (preglednica 1), ki določajo mejno nosilnost. Standard loči postopke izračuna uklonske nosilnosti za torzijski, oziroma torzijsko-upogibni ter upogibni uklon. Standard zelo dvoumno podaja pogoj kompaktnosti prečnega prereza, saj sta kot pogoj za 3. razred kompaktnosti podana dva kriterija. Glede na oznake, je pogoj  $(b + h)/2t \leq 11,5\varepsilon$  predviden za kotnike z različno dolgimi kraki. V magistrskem delu so obravnavani samo enakokraki kotni profili, zato je kot pogoj za 3. razred kompaktnosti uporabljen pogoj  $b/t \leq 15\varepsilon$  ali  $(b - t - r)/t \leq 14\varepsilon$ .

#### 3.1.1.1 Upogibni uklon

- Za 1., 2. in 3. razred kompaktnosti:  $\frac{b}{t} \leq 15\varepsilon$  ali  $\frac{b-t-r}{t} \leq 14\varepsilon$ ,  $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}}, \quad N_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{l_u^2} \quad \text{ali} \quad \bar{\lambda} = \frac{l_u}{i \lambda_1}, \quad \lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9\varepsilon, \quad i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (9)$$

- Za 4. razred kompaktnosti:  $\frac{b}{t} > 15\varepsilon$  ali  $\frac{b-t-r}{t} > 14\varepsilon$ ,  $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}}, \quad N_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{l_u^2} \quad \text{ali} \quad \bar{\lambda} = \frac{l_u}{i \lambda_1}, \quad \lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9\varepsilon, \quad i = \sqrt{\frac{I}{A_{eff}}} \quad (10)$$

Efektivni prečni prerez  $A_{eff}$  se določi skladno s SIST EN 1993-1-5. Obravnavamo stabilnostni problem, zato nas zanima minimalna vrednost kritične uklonske sile  $N_{cr}$ , kar pomeni, da iščemo minimalno vrednost  $\frac{1}{l_u^2}$ .

Analitičen model določitve uklonske nosilnosti predstavlja Ayrton-Perryjeva formula, s katero določimo brezdimezionalno uklonsko nosilnost:

$$\chi_F = \begin{cases} 1,0 & \bar{\lambda} \leq 0,2 \\ \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} & \bar{\lambda} > 0,2 \end{cases} \quad \phi = 0,5(1 + \eta + \bar{\lambda}^2) \quad (11)$$

Vpeljana je ravnost elementa  $\eta = \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0)$ , ki zajema geometrijske in materialne nepopolnosti. Omejitev vitkosti z vrednostjo  $\bar{\lambda}_0 = 0,2$  je meja, do katere vpliv uklona ni pomemben. Vrednost faktorja nepopolnosti  $\alpha$ , ki določa pet uklonskih krivulj, je določena eksperimentalno, odvisno od vrste in dimenzij prečnega prereza ter kvalitete materiala. Vrednosti so podane v preglednici 1.

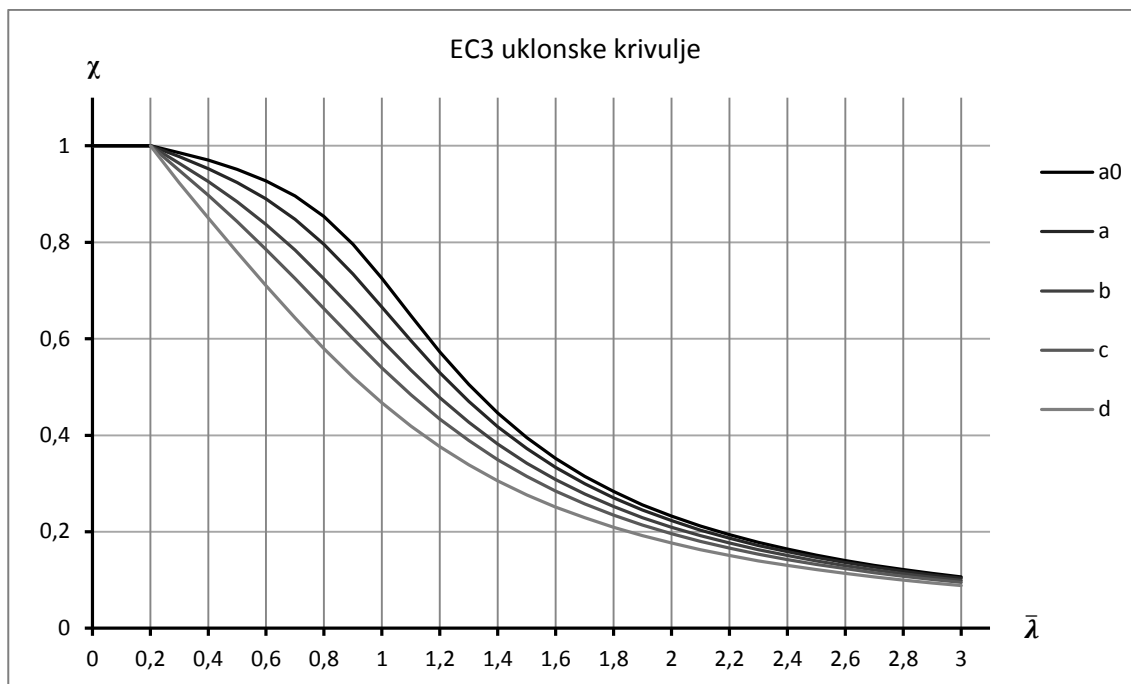
Preglednica 1: Faktorji nepopolnosti (SIST EN 1993-1-1, Preglednica 6.1)

Uklonska krivulja	$a_0$	a	b	c	d
Faktor nepopolnosti $\alpha$	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Preglednica 2: Izbira uklonske krivulje (SIST EN 1993-1-1, Preglednica 6.2)

Prečni prerez		Omejitev	Uklon okoli osi	Uklonska krivulja		
				S 235 S 275 S 355 S 420	S 460	
Valjani prerezi		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40$ mm	y-y z-z	a b	$a_0$ $a_0$
			$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$ mm	y-y z-z	b c	a a
		$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100$ mm	y-y z-z	b c	a a
			$t_f > 100$ mm	y-y z-z	d d	c c
Varjeni I-prerezi		$t_f \leq 40$ mm	y-y z-z	b c	b c	
		$t_f > 40$ mm	y-y z-z	c d	c d	
Votli prerezi		vroče obdelani	katera koli	a	$a_0$	
		hladno oblikovani	katera koli	c	c	
Varjeni skatlasti prerezi		splošno (razen kot spodaj)	katera koli	b	b	
		debeli zvari: $a > 0,5 t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	katera koli	c	c	
U-, T- in polni prerezi			katera koli	c	c	
L- prerezi			katera koli	b	b	

Glede na preglednico 2, ki jo podaja obravnavani standard, je za uklon kotnih profilov okoli obeh osi določena uklonska krivulja b.



Grafikon 1: Uklonske krivulje za upogibni uklon po SIST EN 1993

Uklonska nosilnost za kompaktno prereze se določi z enačbo (12), za vitke pa enačbo (13).

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd,F} = \chi_F A f_y / \gamma_{M1} \quad (12)$$

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd,F} = \chi_F A_{eff} f_y / \gamma_{M1} \quad (13)$$

### 3.1.1.2 Torzijski in torzijsko-upogibni uklon

Pri kotnikih z vitkim prečnim prerezom, ki so obremenjeni s tlačno osno silo, je zaradi vitkosti in oblike prereza potrebno preveriti nevarnost torzijskega in torzijsko-upogibnega uklona. Posebnost enakokrakih kotnikov je simetričnost prereza glede na močno os. Ob upoštevanju te geometrijske lastnosti, je prva rešitev enačbe (14) določena z enačbo (15), ki predstavlja upogibni uklon okoli šibke osi. Rešitvi za torzijsko-upogibni uklon sta določeni z enačbo (16), iz katere je očitno, da gre pri torzijsko-upogibnem uklonu enakokrakega kotnika za interakcijo torzije in upogiba okoli močne osi.

(14)

$$(N_{cr,\xi} - N_{cr})(N_{cr,\eta} - N_{cr})(N_{cr,T} - N_{cr})i_s^2 - \alpha_{\eta w} \eta_s^2 N_{cr}^2 (N_{cr,\xi} - N_{cr}) - \alpha_{\xi w} \xi_s^2 N_{cr}^2 (N_{cr,\eta} - N_{cr}) = 0$$

$$N_{cr,1} = N_{cr,\eta} \quad (15)$$

$$N_{cr,2,3} = \frac{1}{2\left(1 - \frac{\xi_s^2}{i_s^2}\right)} \left[ (N_{cr,\xi} + N_{cr,T}) \mp \sqrt{(N_{cr,\xi} + N_{cr,T})^2 - 4N_{cr,\xi}N_{cr,T} \left(1 - \frac{\xi_s^2}{i_s^2}\right)} \right] \quad (16)$$

$$N_{cr,\xi} = \frac{\pi^2 E I_\xi}{l_{u,\xi}^2} \quad (17)$$

$$N_{cr,\eta} = \frac{\pi^2 E I_\eta}{I_{u,\eta}^2} \quad (18)$$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_s^2} \left[ G I_t + \frac{\pi^2 E I_\omega}{I_{u,T}^2} \right] \quad (19)$$

$$i_s^2 = \frac{I_\eta + I_\xi}{A} + \eta_s^2 + \xi_s^2 \quad (20)$$

Enačba (17) predstavlja elastično kritično silo za upogibni uklon okoli močne osi, enačba (18) elastično kritično silo za upogibni uklon okoli šibke osi, enačba (19) pa elastično kritično silo za torzijski uklon.

Relativno vitkost  $\bar{\lambda}_T$  pri torzijskem in torzijsko-upogibnem uklonu glede na kompaktnost prereza določimo z enim izmed spodnjih izrazov:

- Za 1., 2. in 3. razred kompaktnosti:  $\frac{b}{t} \leq 15\varepsilon$  ali  $\frac{b-t-r}{t} \leq 14\varepsilon$ ,  $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_{T,TF} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr,min}}} \quad (21)$$

- Za 4. razred kompaktnosti:  $\frac{b}{t} > 15\varepsilon$  ali  $\frac{b-t-r}{t} > 14\varepsilon$ ,  $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_{T,TF} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr,min}}} \quad (22)$$

$$N_{cr,min} = \min(N_{cr,2,3}, N_{cr,T}) \quad \text{-za enojno simetrične prereze}$$

$$N_{cr,min} = \min(N_{cr,\eta}, N_{cr,T}) \quad \text{-za dvojno simetrične prereze}$$

Enako kot pri upogibnem uklonu se izračuna brezdimeziionalna uklonska nosilnost  $\chi_{T,TF}$ :

$$\chi_{T,TF} = \begin{cases} 1,0 & \bar{\lambda} \leq 0,2 \\ \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} & \bar{\lambda} > 0,2, \end{cases} \quad \phi = 0,5(1 + \eta + \bar{\lambda}^2), \quad \eta = \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) \quad (23)$$

Standard v tem primeru ne podaja drugačnih uklonskih krivulj, ampak se naveže na uklonske krivulje, ki so podane pri upogibnem uklonu.

Torzijska oziroma torzijsko-upogibna uklonska nosilnost za kompaktne prereze se določi z enačbo (24), za vitke pa z enačbo (25).

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd,T,TF} = \chi_{T,TF} A f_y / \gamma_{M1} \quad (24)$$

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd,T,TF} = \chi_{T,TF} A_{eff} f_y / \gamma_{M1} \quad (25)$$



Rezultat stabilnostne analize elementa je minimalna vrednost izmed vseh uklonskih nosilnosti:

$$N_{b,Rd} = \min \begin{cases} N_{b,Rd,T,TF} \\ N_{b,Rd,F} \end{cases} \quad (26)$$

### 3.1.1.3 Primer

Obraunavan je preko obeh krakov tlačno obremenjen kotni profil podanih dimenzij in materialnih karakteristik, ki je sestavni del noge daljnovoda. Prikazani so vmesni rezultati, podroben izračun je izveden v Prilogi A.1.

Podatki:

$$b = h = 150 \text{ mm}, \quad t = 7,5 \text{ mm}, \quad b/t = 20$$

$$L = l_u = 1500 \text{ mm}$$

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2 \quad G = 80769 \text{ N/mm}^2 \quad f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

Geometrijske karakteristike:

$$A = 2193,75 \text{ mm}^2 \quad A_{eff} = 1672,1 \text{ mm}^2$$

$$I_\eta = 1967945,46 \text{ mm}^4 \quad I_\xi = 7825517,58 \text{ mm}^4 \quad I_t = 41132,8 \text{ mm}^4$$

Kritične uklonske sile in brezdimezionalne uklonske nosilnosti:

$$N_{cr,\eta} = 1812,8 \text{ kN} \quad N_{cr,\xi} = 7208,6 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_F = 0,466 \quad \chi_F = 0,899 \quad N_{b,Rd,F} = 353,3 \text{ kN}$$

$$N_{cr,T} = 465,7 \text{ kN} \quad N_{cr,2} = 11810,1 \text{ kN} \quad N_{cr,3} = 454,2 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_{T,TF} = 0,930 \quad \chi_{T,TF} = 0,642 \quad N_{b,Rd,T,TF} = 252,3 \text{ kN}$$

Merodajna je minimalna vrednost uklonskih nosilnosti:

$$N_{b,Rd} = \min \begin{cases} 465,7 \\ 252,3 \\ 353,3 \end{cases} = 252,3 \text{ kN}$$

### 3.1.2 SIST EN 1993-3-1

Del 3-1 standarda SIST EN 1993 posebej obravnava področje uporabe jeklenih elementov v stolpih, jamborih in dimnikih. Uklonska nosilnost je določena s pomočjo efektivne relativne vitkosti, hkrati pa

je v odvisnosti od robnih pogojev reducirana s faktorjem  $\eta$ . Podan je samo izračun upogibnega uklona, saj je kontrola torzijskega in torzijsko-upogibnega uklona zajeta v kontroli lokalne nestabilnosti pločevin kotnika. Nevarnost nestabilnosti zaradi vitkosti prečnega prereza je za prereze v 4. razredu kompaktnosti upoštevana s strožjim pogojem kompaktnosti in upoštevanjem efektivnega prečnega prereza ter določitvijo efektivne relativne vitkosti.

$$\text{Za 1., 2. in 3. razred kompaktnosti: } \frac{b}{t} \leq 15\varepsilon \quad \text{ali} \quad \frac{b-2t}{t} \leq 15\varepsilon, \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

$$\bar{\lambda}_{\text{eff}} = k \bar{\lambda} = k \sqrt{\frac{A f_y}{N_{\text{cr}}}} \quad (27)$$

$$N_{\text{cr}} = \frac{\pi^2 E I}{l_u^2} \quad \text{ali} \quad \bar{\lambda} = \frac{l_u}{i \lambda_1}, \quad \lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9\varepsilon, \quad i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (28)$$

$$\text{Za 4. razred kompaktnosti: } \frac{b}{t} > 15\varepsilon \quad \text{ali} \quad \frac{b-2t}{t} > 15\varepsilon, \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

$$\bar{\lambda}_{\text{eff}} = k \bar{\lambda} = k \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_y}{N_{\text{cr}}}} \quad (29)$$

$$N_{\text{cr}} = \frac{\pi^2 E I}{l_u^2} \quad \text{ali} \quad \bar{\lambda} = \frac{l_u}{i \lambda_1}, \quad \lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9\varepsilon, \quad i = \sqrt{\frac{I}{A_{\text{eff}}}} \quad (30)$$






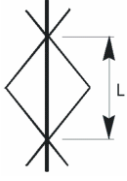
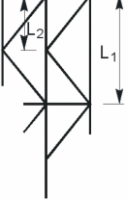
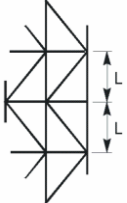
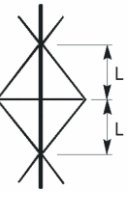
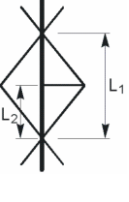
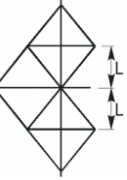
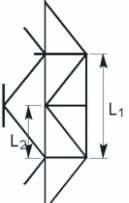
$$\chi = \begin{cases} 1,0 & \bar{\lambda} \leq 0,2 \\ \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_{\text{eff}}^2}} & \bar{\lambda} > 0,2, \end{cases} \quad \phi = 0,5(1 + \eta + \bar{\lambda}_{\text{eff}}^2) \quad (31)$$

Prav tako se ravnost elementa  $\eta = \alpha(\bar{\lambda}_{\text{eff}} - \bar{\lambda}_0)$  določi s pomočjo efektivne relativne vitkosti elementa. Faktor efektivne vitkosti  $k$  je odvisen od načina podpiranja in se izbere na podlagi preglednice 3. Za potrebe primerjave rezultatov uklonske nosilnosti je bila izbrana vrednost pri simetričnem načinu podpiranja enojnih kotnih profilov okoli šibke osi. Zaradi primerjave uklonskih nosilnosti je privzeta sistemska dolžina elementov in faktor  $\eta=1$ . Glede na obravnavane elemente je v preglednici 3 ustrezna izbira primera (a). Uklonska nosilnost za kompaktne prereze se določi z enačbo (32), za vitke pa z enačbo (33).

$$N_{\text{Ed}} \leq \eta N_{\text{b,Rd}} = \eta \chi A f_y / \gamma_{\text{M1}} \quad (32)$$

$$N_{\text{Ed}} \leq \eta N_{\text{b,Rd}} = \eta \chi A_{\text{eff}} f_y / \gamma_{\text{M1}} \quad (33)$$

Preglednica 3: Izbira faktorja efektivne vitkosti k (SIST EN 1993-3-1, Preglednica G.1)

Simetrične podpore			Nesimetrične podpore			
Prez			Prez			
Osi	v-v	y-y	Osi	v-v	y-y	y-y
Primer (a) 	$0,8 + \frac{\bar{\lambda}}{10}$ ampak $\geq 0,9$ in $\leq 1,0$	1,0	Primer (d) 	$1,2 \left( 0,8 + \frac{\bar{\lambda}}{10} \right)$ ampak $\geq 1,08$ in $\leq 1,2$ na $L_2$	$1,2 \left( 0,8 + \frac{\bar{\lambda}}{10} \right)$ ampak $\geq 1,08$ in $\leq 1,2$ na $L_1$	1,0 na $L_1$
Primer (b)  asimetrično  simetrično	$0,8 + \frac{\bar{\lambda}}{10}$ ampak $\geq 0,9$ in $\leq 1,0$	1,0	Primer (e) 	$0,8 + \frac{\bar{\lambda}}{10}$ ampak $\geq 0,9$ in $\leq 1,0$ na $L_2$	$0,8 + \frac{\bar{\lambda}}{10}$ ampak $\geq 0,9$ in $\leq 1,0$ na $L_1$	1,0 na $L_1$
Primer (c) 	$0,8 + \frac{\bar{\lambda}}{10}$ ampak $\geq 0,9$ in $\leq 1,0$	1,0		$0,8 + \frac{\bar{\lambda}}{10}$ ampak $\geq 0,9$ in $\leq 1,0$ na $L_2$	$0,8 + \frac{\bar{\lambda}}{10}$ ampak $\geq 0,9$ in $\leq 1,0$ na $L_1$	1,0 na $L_1$

### 3.1.2.1 Primer

Uklonska nosilnost centrično obremenjenega kotnega profila je izračunana po standardu SIST EN 1993-3-1. Primer kotnika s podanimi materialnimi karakteristikami v preglednici 3 ustreza primeru (a). Detaljni izračun je izveden v Prilogi A.2.

#### Podatki:

$$b = h = 150 \text{ mm}, \quad t = 7,5 \text{ mm}, \quad b/t = 20$$

$$L = l_u = 1500 \text{ mm}$$

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2 \quad G = 80769 \text{ N/mm}^2 \quad f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

Geometrijske karakteristike:

$$A = 2193,75 \text{ mm}^2 \quad A_{\text{eff}} = 1672,1 \text{ mm}^2$$

$$I_{\eta} = 1967945,46 \text{ mm}^4 \quad I_{\xi} = 7825517,58 \text{ mm}^4 \quad I_t = 41132,8 \text{ mm}^4$$

Kritične uklonske sile in brezdimezionalne uklonske nosilnosti:

$$N_{\text{cr},\eta} = 1812,8 \text{ kN} \quad N_{\text{cr},\xi} = 7208,6 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = 0,466 \quad k = 0,9 \quad \bar{\lambda}_{\text{eff}} = 0,419 \quad \chi = 0,918$$

$$N_{\text{b,Rd}} = \mathbf{360,7 \text{ kN}}$$

### 3.1.3 SIST EN 1999-1-1 (Uporaba principa določitve uklonske nosilnosti za jeklene elemente)

Podobno kot v krovnem standardu SIST EN 1993 je rešitev nosilnosti tlačno obremenjenih elementov v standardu SIST EN 1999 podana v obliki uklonskih krivulj. Odvisno od relativne vitkosti elementa in izbrane uklonske krivulje se odčita ali izračuna brezdimezionalno uklonsko nosilnost  $\chi$ , na podlagi katere se določi uklonsko nosilnost. Standard obravnava konstrukcije iz aluminijevih zlitin, zato so uklonske krivulje določene z drugačnimi faktorji kot tiste v SIST EN 1993, ki obravnavajo uklon jeklenih elementov. Pomembna razlika je v upoštevanju lokalne nestabilnosti pločevin kotnika. V standardu SIST EN 1999 je za upogibni uklon v primerjavi s SIST EN 1993 upoštevana višja uklonska krivulja, saj je vpliv zaostalih napetosti zanemarljivo majhen. Nevarnost torzijskega in torzijsko-upogibnega uklona je zajeta z daljšim platojem v uklonskih krivuljah za torzijski in torzijsko-upogibni uklon.

Predstavljeni postopek določitve elastičnih uklonskih sil se ne razlikuje od postopka v standardu SIST EN 1993, drugačen je le princip upoštevanja nevarnosti lokalne nestabilnosti. Vrednosti, ki v uklonskih krivuljah veljajo za elemente iz aluminijevih zlitin, so zaradi primerjav uporabljene za jeklene enojno simetrične profile.

#### 3.1.3.1 Upogibni uklon

- Za 1., 2. in 3. razred kompaktnosti:  $\frac{b}{t} \leq 15\varepsilon$  ali  $\frac{b-t-r}{t} \leq 14\varepsilon$ ,  $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{\text{cr}}}}, \quad N_{\text{cr}} = \frac{\pi^2 E I}{l_u^2} \quad \text{ali} \quad \bar{\lambda} = \frac{l_u}{i \lambda_1}, \quad \lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9\varepsilon, \quad i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (34)$$

- Za 4. razred kompaktnosti:  $\frac{b}{t} > 15\varepsilon$  ali  $\frac{b-t-r}{t} > 14\varepsilon$ ,  $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

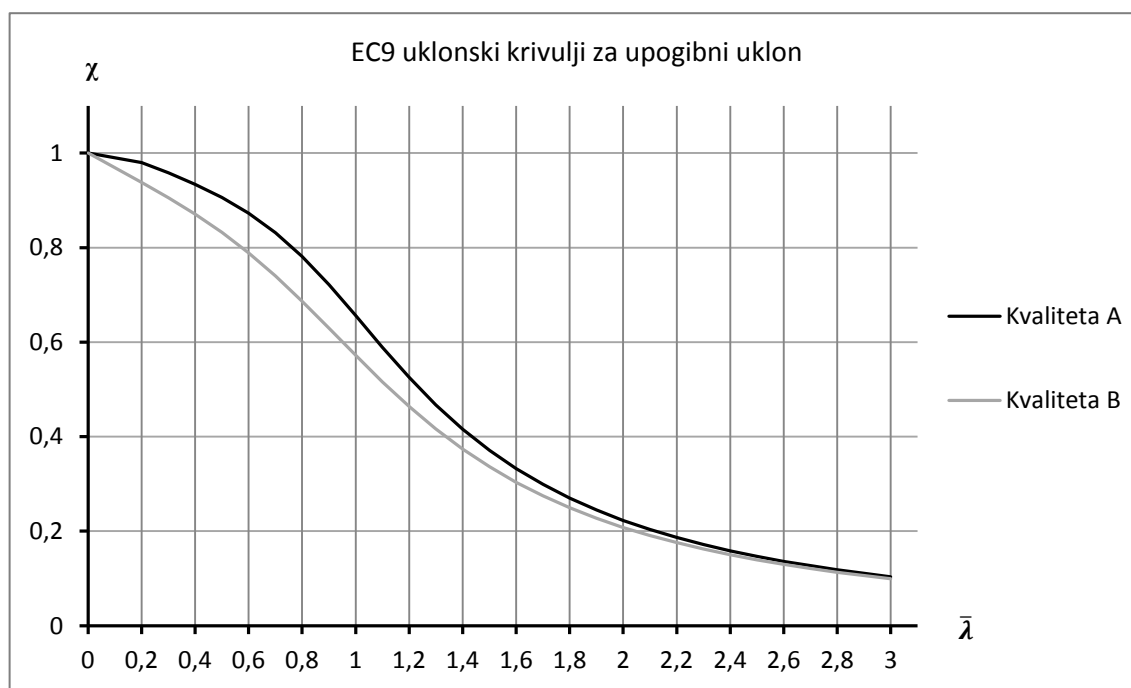
$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_y}{N_{\text{cr}}}}, \quad N_{\text{cr}} = \frac{\pi^2 E I}{l_u^2} \quad \text{ali} \quad \bar{\lambda} = \frac{l_u}{i \lambda_1}, \quad \lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9 \epsilon, \quad i = \sqrt{\frac{I}{A_{\text{eff}}}} \quad (35)$$

$$\chi = \chi_F = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}, \quad \chi \leq 1,0, \quad \phi = 0,5(1 + \eta + \bar{\lambda}^2), \quad \eta = \alpha (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) \quad (36)$$

Standard določa samo dve upogibni uklonski krivulji, ki sta odvisni od kvalitete materiala. Vrednosti so povzete v preglednici 4.

Preglednica 4: Vrednosti  $\alpha$  in  $\bar{\lambda}_0$  za upogibni ukлон (SIST EN 1999-1-1, Preglednica 6.6)

Kvaliteta materiala	$\alpha$	$\bar{\lambda}_0$
Kvaliteta A	0,2	0,1
Kvaliteta B	0,32	0



Grafikon 2: Uklonski krivulji za upogibni ukлон po SIST EN 1999

Odvisno od kompaktnosti prereza se uklonska nosilnost za upogibni ukлон določi z enačbo (37) oziroma enačbo (38).

$$N_{\text{Ed}} \leq N_{\text{b,Rd,F}} = \chi_F A f_y / \gamma_{M1} \quad (37)$$

$$N_{\text{Ed}} \leq N_{\text{b,Rd,F}} = \chi_F A_{\text{eff}} f_y / \gamma_{M1} \quad (38)$$

### 3.1.3.2 Torzijski in torzijsko-upogibni uklon

Projektna vrednost uklonske nosilnosti in relativna vitkost za torzijski in torzijsko-upogibni uklon se zaradi oblike prečnega prereza, skladno s preglednico 5, določi na bruto prerezu. Interakcija upogibnega in torzijskega uklona se določi z enačbo (40).

$$N_{cr,1} = N_{cr,\eta} \quad (39)$$

$$N_{cr,2,3} = \frac{1}{2\left(1 - \frac{\xi_s^2}{i_s^2}\right)} \left[ (N_{cr,\xi} + N_{cr,T}) \mp \sqrt{(N_{cr,\xi} + N_{cr,T})^2 - 4N_{cr,\xi}N_{cr,T} \left(1 - \frac{\xi_s^2}{i_s^2}\right)} \right] \quad (40)$$

$$N_{cr,\xi} = \frac{\pi^2 E I_\xi}{l_{u,\xi}^2} \quad (41)$$

$$N_{cr,\eta} = \frac{\pi^2 E I_\eta}{l_{u,\eta}^2} \quad (42)$$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_s^2} \left[ G I_t + \frac{\pi^2 E I_\omega}{l_{u,T}^2} \right] \quad (43)$$

Kot je opisano že pri torzijskem oziroma torzijsko-upogibnem uklonu standarda SIST EN 1993, predstavlja enačba (41) elastično kritično silo za uklon okoli močne osi, enačba (42) elastično kritično silo za uklon okoli šibke osi, enačba (43) pa elastično kritično silo za torzijski uklon.

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_{T,TF} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr,min}}} \quad (44)$$

$$N_{cr,min} = \min(N_{cr,2,3}, N_{cr,T}) \quad \text{-za enojno simetrične prereze}$$

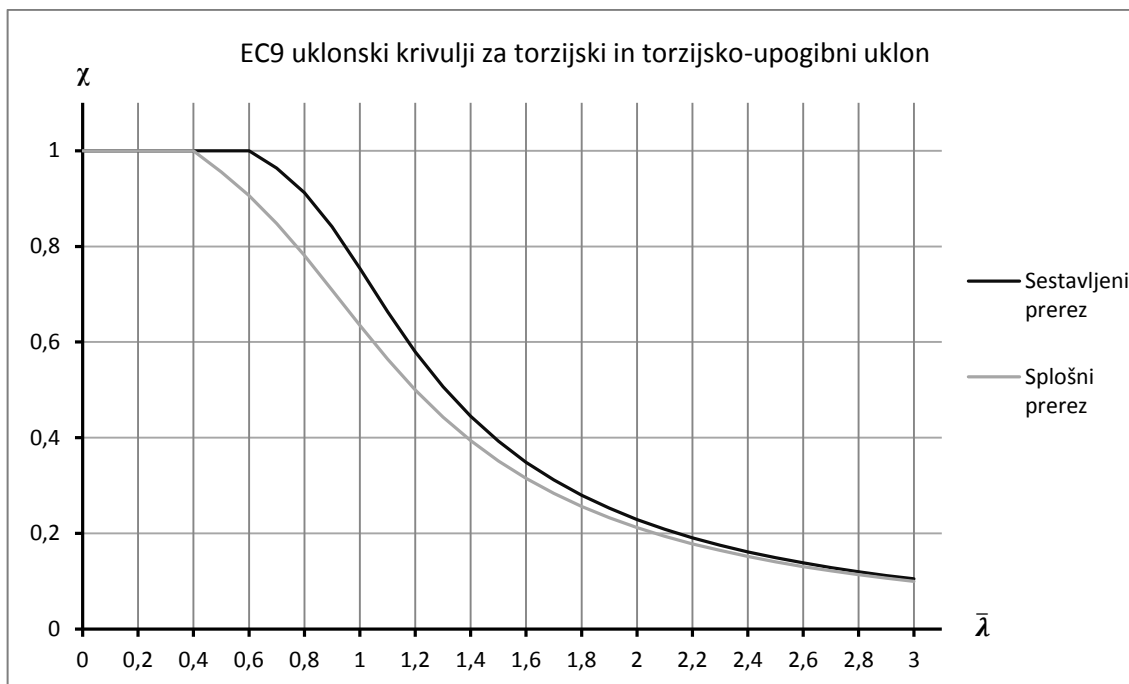
$$N_{cr,min} = \min(N_{cr,z}, N_{cr,T}) \quad \text{-za dvojno simetrične prereze}$$

$$\chi = \chi_{T,TF} = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}, \quad \chi \leq 1,0, \quad \phi = 0,5(1 + \eta + \bar{\lambda}^2), \quad \eta = \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) \quad (45)$$

Glede na obliko prereza sta podani dve torzijski oziroma torzijsko-upogibni uklonski krivulji.

Preglednica 5: Vrednosti  $\alpha$  in  $\bar{\lambda}_0$  ter izbira  $A_{eff}$  za torzijski in torzijsko-upogibni uklon (SIST EN 1999-1-1, Preglednica 6.7)

Prečni prerez	$\alpha$	$\bar{\lambda}_0$	$A/A_{eff}$
Splošni	0,35	0,4	$A_{eff}$
Prerezi z radialno potekajočimi pločevinami, L in T kotniki	0,2	0,6	A



Grafikon 3: Uklonski krivulji za torzijski in torzijsko-upogibni uklon po SIST EN 1999

Uklonska nosilnost torzijsko in torzijsko-upogibnega uklona je skladno s preglednico 5 določena na bruto prečnem prerezu.

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd,T,TF} = \chi_{T,TF} A f_y / \gamma_{M1} \quad (46)$$

Merodajna je minimalna vrednost uklonske nosilnosti  $N_{b,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} N_{b,Rd,T,TF} \\ N_{b,Rd,F} \end{array} \right.$ .

### 3.1.3.3 Primer

V predstavljenem izračunu uklonske nosilnosti obravnavanega centrično obremenjenega kotnika so upoštevane posebnosti določitve uklonske nosilnosti torzijskega, torzijsko-upogibnega in upogibnega uklona. Zaradi primerjav so uporabljene vrednosti materialnih karakteristik jekla.

#### Podatki:

$$b = h = 150 \text{ mm}, \quad t = 7,5 \text{ mm}, \quad b/t = 20$$

$$L = l_u = 1500 \text{ mm}$$

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2 \quad G = 80769 \text{ N/mm}^2 \quad f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

#### Geometrijske karakteristike:

$$A = 2193,75 \text{ mm}^2 \quad A_{eff} = 1672,1 \text{ mm}^2$$

$$I_{\eta} = 1967945,46 \text{ mm}^4 \quad I_{\xi} = 7825517,58 \text{ mm}^4 \quad I_t = 41132,8 \text{ mm}^4$$

Kritične uklonske sile in brezdimenzionalne uklonske nosilnosti:

$$N_{cr,\eta} = 1812,8 \text{ kN} \quad N_{cr,\xi} = 7208,6 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_F = 0,466 \quad \chi = \chi_F = 0,917 \quad N_{b,Rd,F} = 360,3 \text{ kN}$$

$$N_{cr,T} = 465,7 \text{ kN} \quad N_{cr,2} = 11810,1 \text{ kN} \quad N_{cr,3} = 454,2 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_{T,TF} = 1,065 \quad \chi = \chi_{T,TF} = 0,695 \quad N_{b,Rd,T,TF} = 358,3 \text{ kN}$$

Merodajna je minimalna vrednost uklonskih nosilnosti:

$$N_{b,Rd} = \min \begin{cases} 465,7 \\ 358,3 \\ 360,3 \end{cases} = \mathbf{358,3 \text{ kN}}$$

**3.1.4 AISC**

Uklonska nosilnost tlačno obremenjenih elementov se izračuna podobno kot v standardih Evrokod. S pomočjo faktorja kompaktnosti  $Q$  se določijo kritične uklonske napetosti.

**3.1.4.1 Upogibni uklon**

Odvisno od kompaktnosti prereza se z enačbo (47) določi relativna vitkost, na podlagi katere se izračuna tudi kritična napetost.

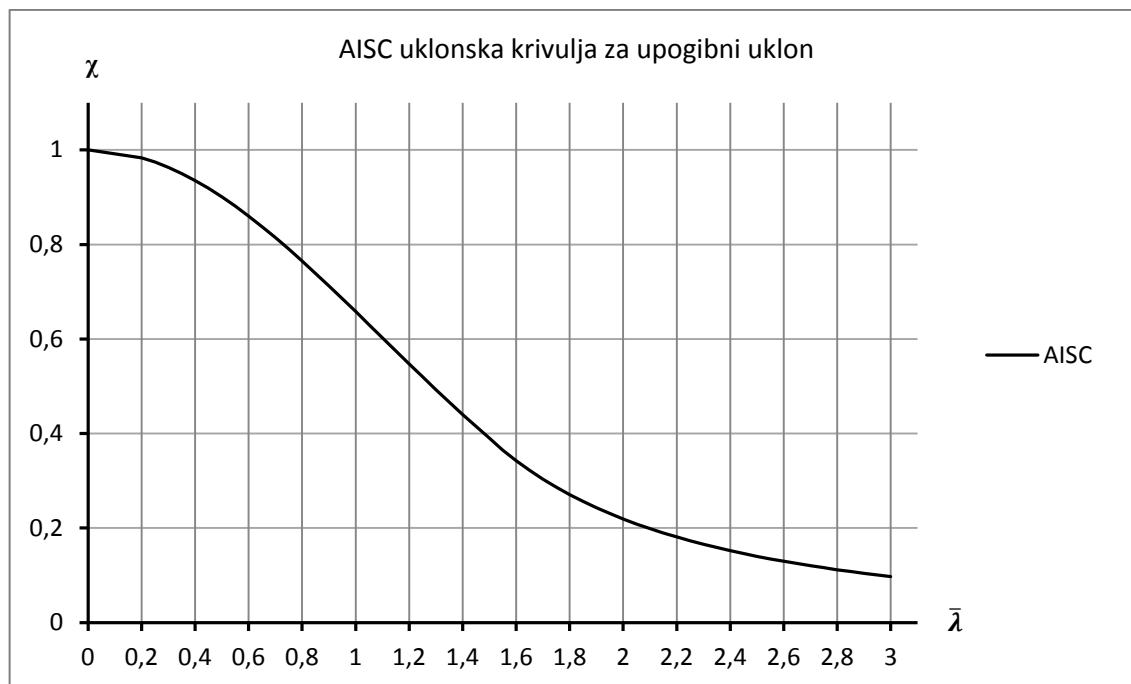
$$\lambda_c = \frac{l_u}{r} \pi \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (47)$$

- Za kompaktne prereze  $\frac{b}{t} \leq 0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

$$F_{cr} = F_{cr,F} = \begin{cases} (0,658 \lambda_c^2) f_y & \lambda_c \leq 1,5 \\ \left[ \frac{0,877}{\lambda_c^2} \right] f_y & \lambda_c > 1,5 \end{cases} \quad (48)$$

Brezdimenzijska uklonska nosilnost v odvisnosti od relativne vitkosti je za kompaktne prereze po standardu AISC prikazana na spodnjem grafikonu.





Grafikon 4: Uklonska krivulja za upogibni uklon elementov s kompaktnim prečnim prerezom po AISC

- Za nekompaktne in vitke elemente brez ojačitev je kritična uklonska napetost določena z enačbo (49).

$$F_{cr} = F_{cr,F} = \begin{cases} Q(0,658 Q \lambda_c^2) f_y & \lambda_c \sqrt{Q} \leq 1,5 \\ \left[ \frac{0,877}{\lambda_c^2} \right] f_y & \lambda_c \sqrt{Q} > 1,5 \end{cases} \quad (49)$$

Faktor kompaktnosti  $Q = Q_s$  je določen z enačbo (50) oziroma (51):

$$Q_s = 1,340 - 0,76 \left( \frac{b}{t} \right) \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad \text{za} \quad 0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 0,91 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (50)$$

$$Q_s = \frac{0,53 E}{f_y \left( \frac{b}{t} \right)^2} \quad \text{za} \quad \frac{b}{t} > 0,91 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (51)$$

Uklonska nosilnost po standardu AISC se določi na bruto prečnem prerezu  $A_g$  z enačbo (52):

$$N_{Ed} \leq P_n = \phi_c A_g F_{cr} \quad (52)$$

Vrednost varnostnega faktorja  $\phi_c$  je odvisna od kontrole mejnega stanja.

### 3.1.4.2 Torzijski in torzijsko-upogibni uklon

Račun torzijskega oziroma torzijsko-upogibnega uklona je potrebno izvesti za kotnike z razmerjem  $b/t > 20$ . Zaradi sistematičnosti je bila analiza torzijskega in torzijsko-upogibnega uklona izvedena za razmerja  $b/t = 15, 17, 20, 22, 25, 30$ . Podobno kot v standardu Evrokod je z enačbo (53) za

kompaktne in enačbo (60) za nekompaktne in vitke prereze določena interakcija torzijskega in upogibnega uklona.

- Za enojno simetrične kompaktne prereze, kjer velja  $\frac{b}{t} \leq 0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ , se kritična uklonska napetost določi z enačbo (53):

$$F_{cr} = F_{cr,T,TF} = \frac{F_{ex} + F_{ez}}{2H} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4 F_{ex} F_{ez} H}{(F_{ex} + F_{ez})^2}} \right) \quad (53)$$

Elastični kritični sili za upogibni uklon okoli močne osi in za torzijski uklon sta določeni z enačbama (54) in (55), enačba (56) pa podobno kot vztrajnostni polmer povzema geometrijske karakteristike prečnega prereza.

$$F_{ex} = \frac{\pi^2 E}{l_{u,x}^2 / r_x^2} \quad (54)$$

$$F_{ez} = G J \frac{1}{A_g \bar{r}_0^2} \quad (55)$$

$$H = 1 - \left( \frac{x_0^2 + y_0^2}{\bar{r}_0^2} \right), \quad \bar{r}_0^2 = \frac{I_x + I_y}{A_g} + x_0^2 + y_0^2 \quad (r_0^2 = i_s^2, x_0^2 = \xi_s^2, y_0^2 = \eta_s^2) \quad (56)$$

- Za nekompaktne in vitke elemente brez ojačitev je kritična uklonska napetost določena z enačbo (60):

$$F_{cr} = F_{cr,T,TF} = \begin{cases} Q(0,658 Q \lambda_e^2) f_y & \lambda_e \sqrt{Q} \leq 1,5 \\ \left[ \frac{0,877}{\lambda_e^2} \right] f_y & \lambda_e \sqrt{Q} > 1,5 \end{cases} \quad (60)$$

Faktor kompaktnosti  $Q = Q_s$  je določen z enačbo (57) oziroma (58):

$$Q_s = 1,340 - 0,76 \left( \frac{b}{t} \right) \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad \text{za} \quad 0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 0,91 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (57)$$

$$Q_s = \frac{0,53 E}{f_y \left( \frac{b}{t} \right)^2} \quad \text{za} \quad \frac{b}{t} > 0,91 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (58)$$

Vitkost je določena z enačbo (59), kritična uklonska napetost za torzijski oziroma torzijsko-upogibni uklon pa enačbo (60):

$$\lambda_e = \sqrt{\frac{f_y}{F_e}}, \quad F_e = \frac{F_{ex} + F_{ez}}{2H} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4 F_{ex} F_{ez} H}{(F_{ex} + F_{ez})^2}} \right) \quad (59)$$

Merodajna je minimalna vrednost kritične uklonske napetosti  $F_{cr} = \min \left\{ F_{cr,F}, F_{cr,T,TF} \right\}$ , s katero na podlagi bruto prečnega prereza izračunamo uklonsko nosilnost.

$$N_{Ed} \leq P_n = \phi_c A_g F_{cr} \quad (61)$$

Uklonska krivulja za torzijski in torzijsko-upogibni uklon je podobna uklonski krivulji za upogibni uklon, zaradi faktorja  $Q$ , je le izrazitejši plato pri majhnih in srednjih relativnih vitkosti.

### 3.1.4.3 Primer:

Podobno kot za standarde Evrokod, so predstavljeni vmesni rezultati izračuna uklonske nosilnosti enakokrakega centrično obremenjenega jeklenega kotnika. Celoten izračun s postopki je prikazan v Prilogi A.4.

#### Podatki:

$$b = h = 150 \text{ mm}, \quad t = 7,5 \text{ mm}, \quad b/t = 20$$

$$L = l_u = 1500 \text{ mm}$$

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2 \quad G = 80769 \text{ N/mm}^2 \quad f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

#### Geometrijske karakteristike:

$$A = 2193,75 \text{ mm}^2 \quad Q = 0,832$$

#### Kritične uklonske napetosti:

$$\lambda_c = 0,533 \quad F_{cr,F} = 177,1 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{ex} = 3285,97 \text{ N/mm}^2 \quad F_{ez} = 212,27 \text{ N/mm}^2$$

$$\lambda_e = 1,065 \quad F_{cr,T,TF} = 131,7 \text{ N/mm}^2$$

$b/t \leq 20$ , zato je merodajna vrednost kritične uklonske napetosti upogibnega uklona:

$$F_{cr} = F_{cr,F} = 177,1$$

$$P_n = \mathbf{388,5 \text{ kN}}$$

## 3.2 Primerjava standardov

Cilj magistrskega dela je primerjati rezultate za enakokrake kotnike z različno vitkimi prečnimi prerezi. Ugotoviti je potrebno ustreznost in natančnost različnih standardov glede na rezultate numeričnih analiz.

Iz primerjave uklonskih nosilnosti enakokrakega kotnika z dolžino kraka 150 milimetrov in razmerjem  $b/t=20$ , ki so izračunane v Prilogi A in predstavljene ob standardih je očitno, da se vrednosti precej

razlikujejo. V vseh primerih so bile uporabljene materialne karakteristike jekla, tudi pri izračunu uklonske nosilnosti po SIST EN 1999, ki je v osnovi namenjen kontroli elementov iz aluminijevih zlitin.

Najnižjo vrednost uklonske nosilnosti za izbrani primer elementa s prečnim prerezem kotnika izračunamo po standardu SIST EN 1993-1-1, največjo pa po standardu AISC. Standard SIST EN 1993-1-1 je z izračunom uklonske nosilnosti ob upoštevanju torzijsko-upogibnega uklona izrazito konservativen, medtem ko je uklonska nosilnost, izračunana po ameriškem standardu, določena samo ob upoštevanju upogibnega uklona. Vrednosti uklonskih nosilnosti, ki so bile izračunane ob predstavljenih postopkih izračuna po posameznih standardih, so zbrane v spodnji preglednici. Večinoma se izračunane vrednosti uklonske nosilnosti bistveno ne razlikujejo. Izjema je zelo konservativen izračun po SIST EN 1993-1-1.

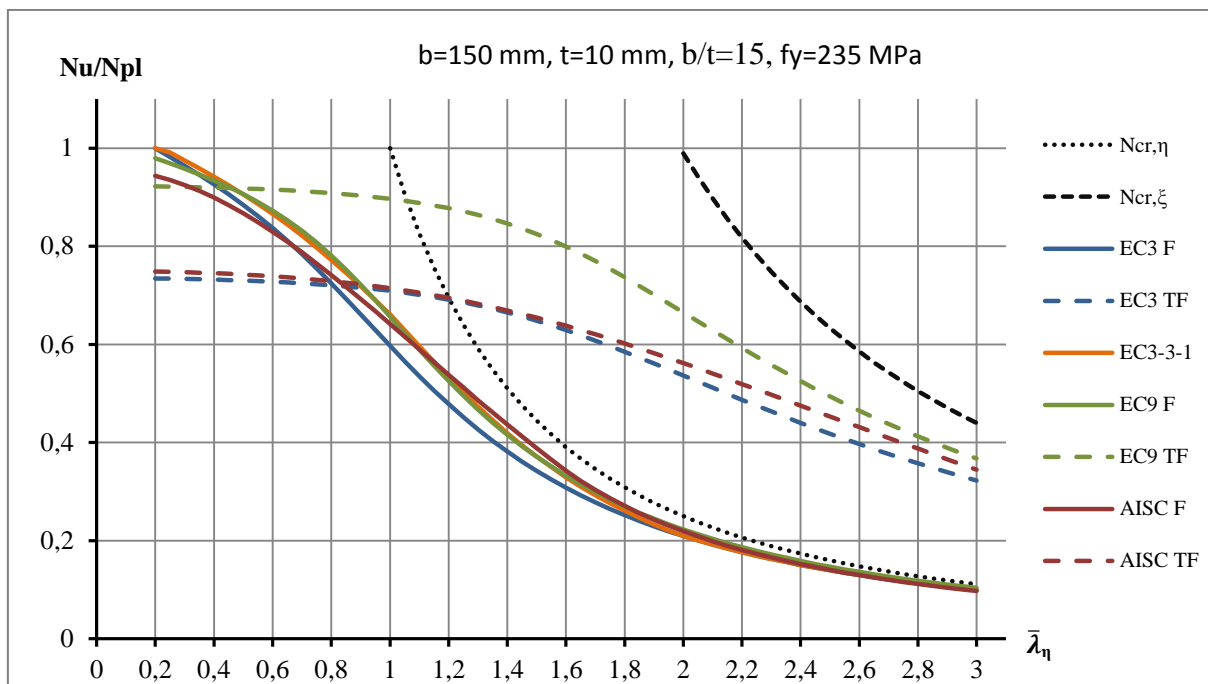
Za kotnik z dolžino kraka  $b = 150$  mm in debelino kraka  $t = 7,5$  mm, ter dolžino  $L = 1500$  mm so bile po predstavljenih standardih izračunane uklonske nosilnosti. Rezultati so zbrani v preglednici 6.

Preglednica 6: Rezultati izračuna uklonske nosilnosti centrično obremenjenega enakokrakega kotnika

Standard	EC3-1-1	EC3-3-1	EC9-1-1	AISC
Uklonska nosilnost [kN]	252,3	360,7	358,3	388,5

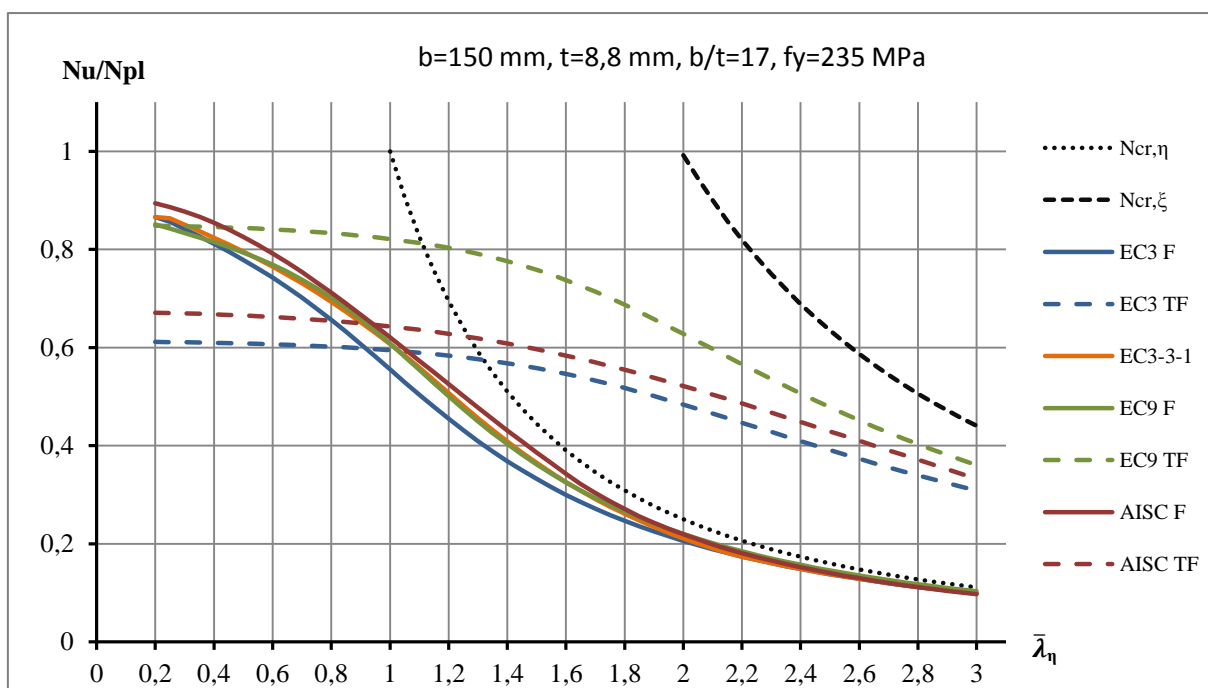
Po opisanih postopkih so bile izdelane krivulje normirane uklonske nosilnosti  $N_u/N_{pl}$  v odvisnosti od relativne vitkosti  $\bar{\lambda}_\eta$  (relativna vitkost glede na šibko os  $\eta$  in ob upoštevanju bruto prečnega prereza A), s pomočjo katerih bo nazorneje predstavljena uklonska nosilnost v odvisnosti od relativne vitkosti elementa. Za primerjavo sta prikazani tudi normirani vrednosti kritičnih uklonskih sil okoli šibke in močne osi. Za majhne in srednje relativne vitkosti elementov je pričakovan merodajen rezultat torzijskega oziroma torzijsko-upogibnega uklona, ki se, glede na rezultate izpeljave torzijsko-upogibnega uklona, pri večjih relativnih vitkosti približa upogibnemu uklonu okoli močne osi. Rezultat stabilnostne analize je minimalna vrednost uklonske nosilnosti, zato je v območju večjih relativnih vitkosti pričakovan čisti upogibni uklon okoli šibke osi.

Za kotnik z razmerjem  $b/t=15$ , ki ima ob uporabi jekla kvalitete S235 glede na standard Evrokod še kompakten prerez, je zaradi oblike prečnega prereza na grafikonu 5 prikazana tudi normirana uklonska nosilnosti za torzijski oziroma torzijsko-upogibni uklon. Zaradi preglednosti je prikazana tudi torzijsko-upogibna uklonska nosilnost po standardu AISC.

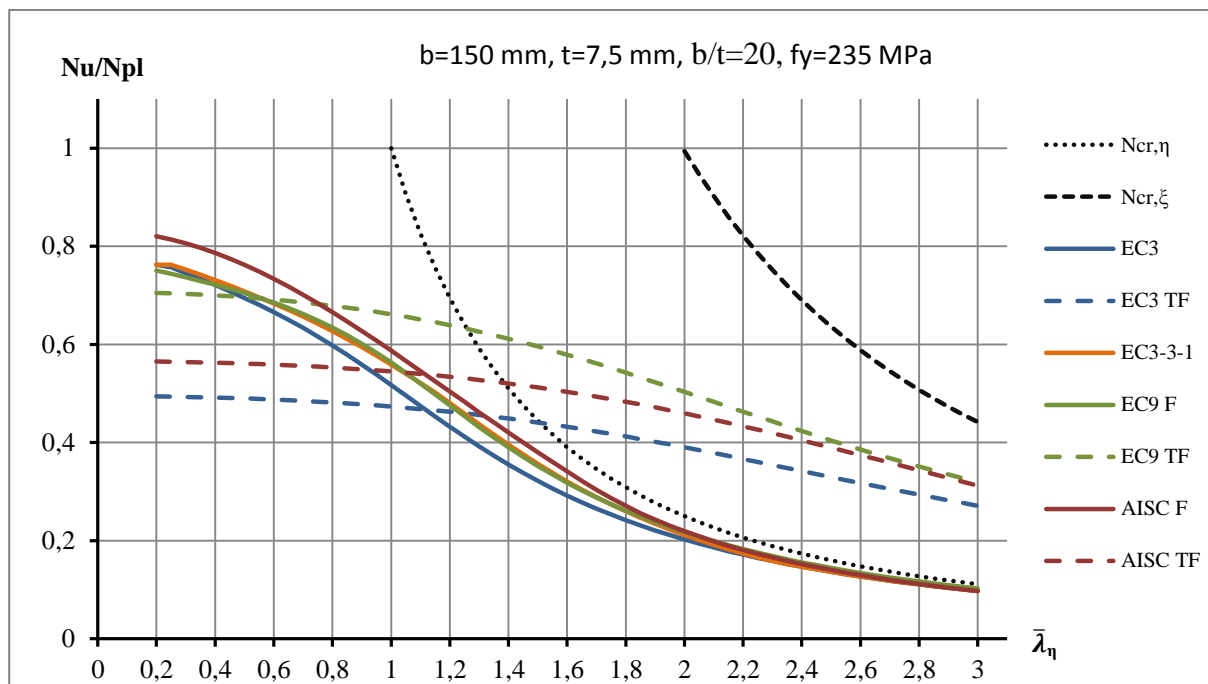


Grafikon 5: Primerjava standardov pri  $b/t=15$ , centrična obremenitev

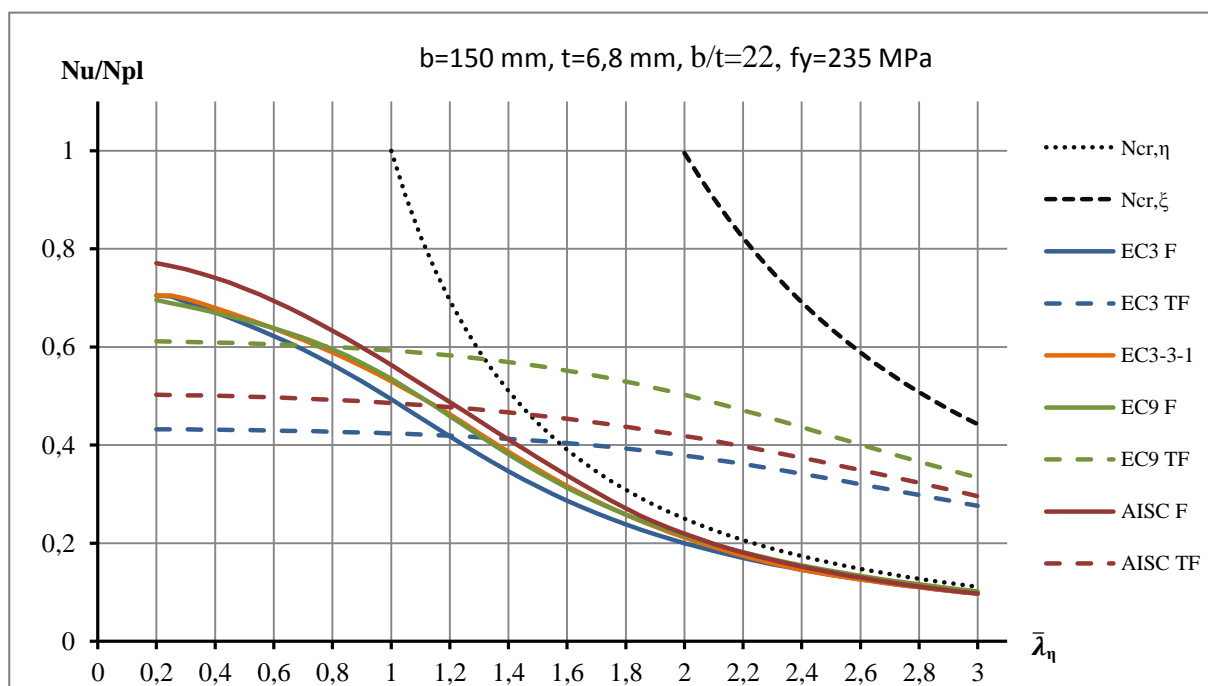
V primerjavi z ostalimi rezultati sta omenjena standarda v območju majhne relativne vitkosti zelo konservativna. Razlog je v nevarnosti torzijskega oziroma torzijsko-upogibnega uklona v standardu SIST EN 1993 in redukcijskega faktorja  $Q$  v standardu AISC. Ameriški standard torzijski in torzijsko-upogibni uklon upošteva šele pri kotnikih z razmerjem  $b/t > 20$ , kar je glede na rezultate ostalih standardov manj konservativna rešitev. Pri upogibnem uklonu so razlike med standardi bistveno manjše. Na grafikonih v nadaljevanju so prikazani rezultati za elemente z vitkimi prečnimi prerezi.



Grafikon 6: Primerjava standardov pri  $b/t=17$ , centrična obremenitev

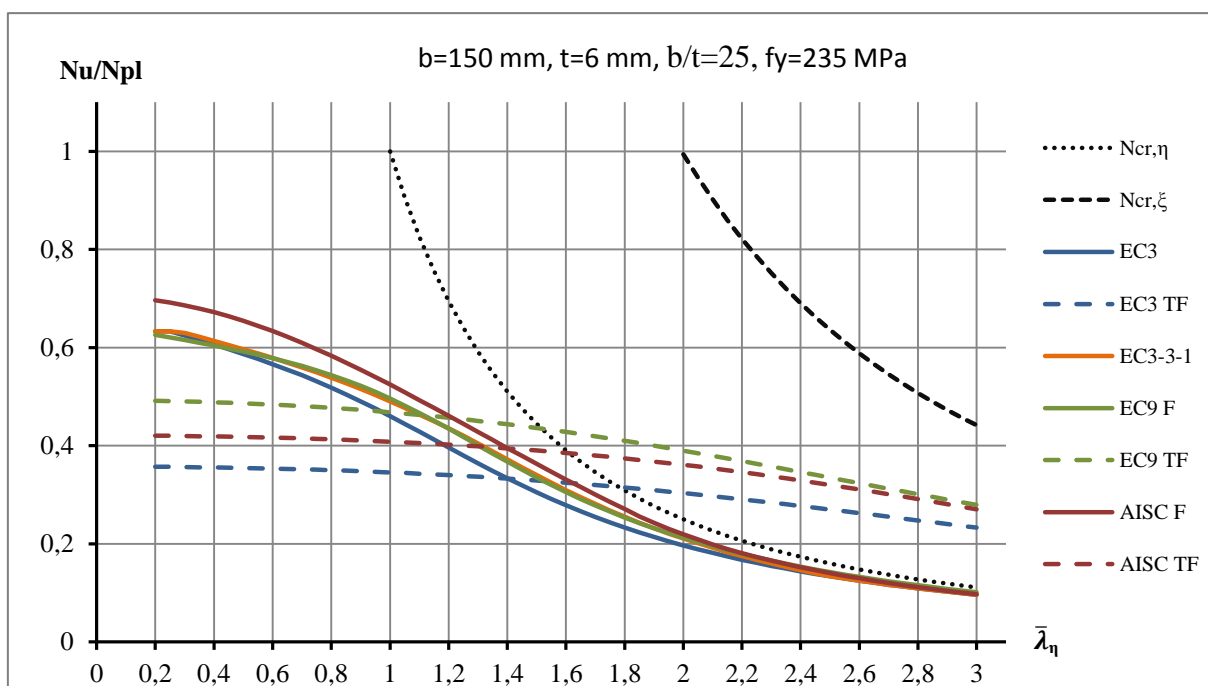
Grafikon 7: Primerjava standardov pri  $b/t=20$ , centrična obremenitev

Z večanjem vitkosti se zmanjšuje predvsem vrednost torzijsko-upogibne uklonske nosilnosti, ki je merodajna pri manjših relativnih vitkosti.

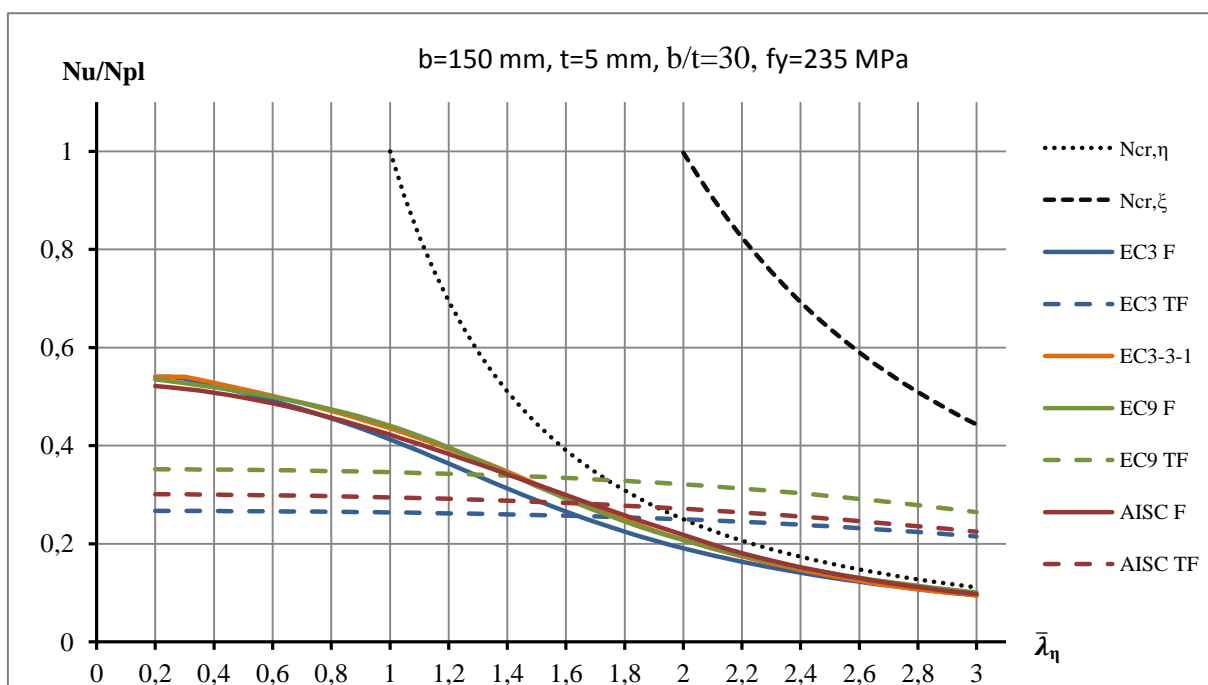
Grafikon 8: Primerjava standardov pri  $b/t=22$ , centrična obremenitev

V praksi se elementi z zelo vitkimi prečnimi prerezi  $b/t > 22$  praktično ne uporabljajo (slika 7), zaradi celovitega pregleda pa so prikazani tudi rezultati za elemente z razmerjem  $b/t=25$  in  $b/t=30$ . Vidimo, da se vrednosti uklonske nosilnosti z večanjem vitkosti prereza zmanjšujejo, kar je posledica uporabe

efektivnega prečnega prereza in faktorja vitkosti  $Q$ . Hkrati se zmanjšujejo tudi razlike med standardi, kar je razvidno iz primerjave grafikonov 6 in 10.



Grafikon 9: Primerjava standardov pri  $b/t=25$ , centrična obremenitev



Grafikon 10: Primerjava standardov pri  $b/t=30$ , centrična obremenitev

Očitno je, da se analitične rešitve uklonske nosilnosti elementov s prečnim prerezom v 4. razredu kompaktnosti v območju majhnih in srednjih relativnih vitkosti, kjer je merodajen rezultat torzijske oziroma torzijsko-upogibne uklonske nosilnosti, med seboj precej razlikujejo. Vidimo, da sta

standarda SIST EN 1993 del 1-1 in AISC v tem območju zelo konservativna, medtem ko standarda SIST EN 1993 del 3-1 in SIST EN 1999 določata očitno večjo nosilnost. Za večje relativne vitkosti elementov je glede na analitične rezultate merodajen upogibni uklon okoli šibke osi, kjer tudi za različna razmerja  $b/t$  med standardi ni bistvenih razlik.

Poleg razlik v uklonski nosilnosti med posameznimi standardi je pomembna tudi ugotovitev, da interakcija torzije in upogibnega uklona okoli močne osi ne pride do izraza. Pogoj torzijsko-upogibnega uklona zaradi interakcije z upogibnim uklonom okoli močne osi ni izkoriščen, saj pride pri iskanju minimalne uklonske nosilnosti do prehoda iz torzijskega v upogibni uklon okoli šibke osi v eni točki. Pogoj prehoda med obema vrstama uklona pa se z večanjem vitkosti prečnega prereza premika proti večji relativni vitkosti. Upogibni uklon postaja torej z večanjem vitkosti prereza merodajen pri vse večjih dolžinah elementa.

### 3.3 Numerične simulacije obnašanja centrično obremenjenih vitkih kotnikov

Eksperimentalne analize so drage, zahtevajo veliko časa, rezultati pa so zaradi različnih meritev podvrženi večjim napakam. Numerične simulacije obnašanja realnih elementov zato predstavljajo cenejšo in hitrejšo analizo obnašanja jeklenih elementov. Ob uporabi ustreznih numeričnih modelov, v katerih so upoštewane vse ali pa vsaj bistvene lastnosti realnih elementov, lahko v analizi obnašanja spreminjamo določene parametre, tako da je njihov odziv primerljiv z odzivom realnih elementov. Zaradi kompleksnosti odziva vitkih kotnikov, je torej potrebno zagotoviti natančne numerične modele. Glede na znane geometrijske in materialne lastnosti obravnavanih elementov so Sinur in sod. (2013) v raziskavah uklonske nosilnosti vitkih kotnikov uporabili programsko okolje Abaqus, v katerem so izvedli numerične simulacije odziva tlačno obremenjenih jeklenih kotnih profilov. Avtorji so pri izdelavi numeričnega modela sledili predpisom in priporočilom, ki jih podajajo standardi Evrokod.

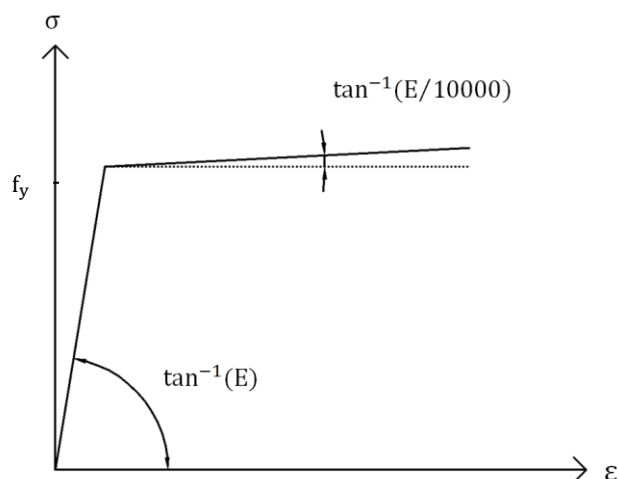
Numerični modeli kotnikov so bili sestavljeni iz 4 vozliščnih lupinastih končnih elementov, ki imajo v programskem okolju Abaqus oznako S4R. Upoštewane so bile splošne vrednosti materialnih in geometrijskih karakteristik, ki so zbrane v preglednici 7.

Preglednica 7: Materialne karakteristike

Elastični modul $E$	210000 MPa
Koeficient prečne kontrakcije $\nu$	0,3
Napetost tečenja $f_y$	235 MPa

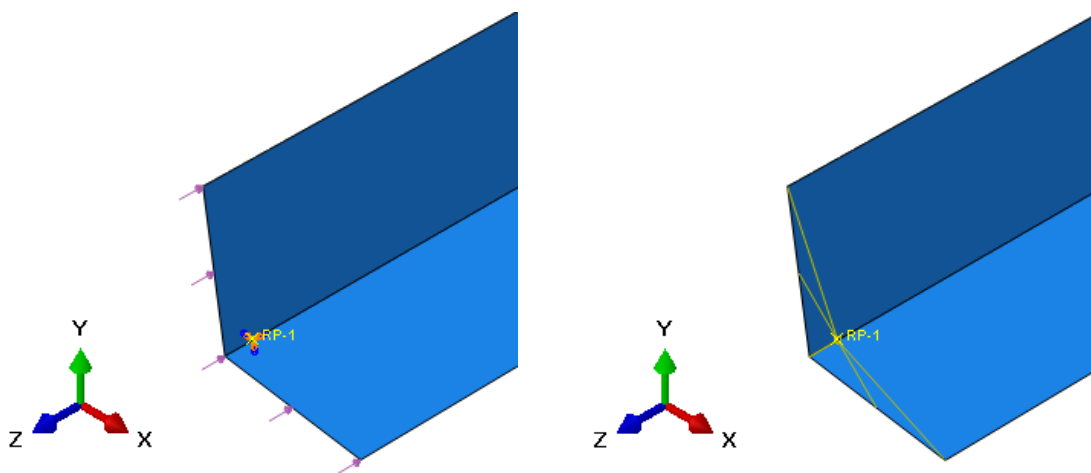
V plastičnem področju je bila zaradi numerične stabilnosti upoštevana nominalna utrditev materiala v velikosti  $E/10000$ .





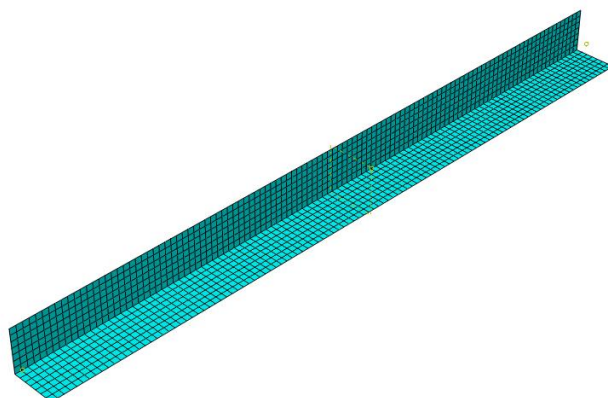
Grafikon 11: Grafikon  $\sigma$ - $\epsilon$  za idealen elasto-plastičen material z utrditvijo  $E/10000$

V težišču elementov so bile podane nepomične podpore s preprečenimi zasuki. Pomik vzdolž osi kotnika in zasuki so bili sproščeni z uporabo vezi (couplings), ki so dodatno preprečevale deformacije v ravnini prereza. Globalno so vezi v povezavi s podporami delovale kot členkaste podpore na začetku in koncu elementa. Drсна členkasta podpora, ki je preprečevala pomike vzdolž osi elementa, je bila definirana na sredini razpona. Tlačna obremenitev je bila določena kot enakomerna tlačna napetost na nedeformiranem prerezu na obeh koncih elementa.



Slika 13: Slika podpore in obtežbe (levo) in vezi (desno)

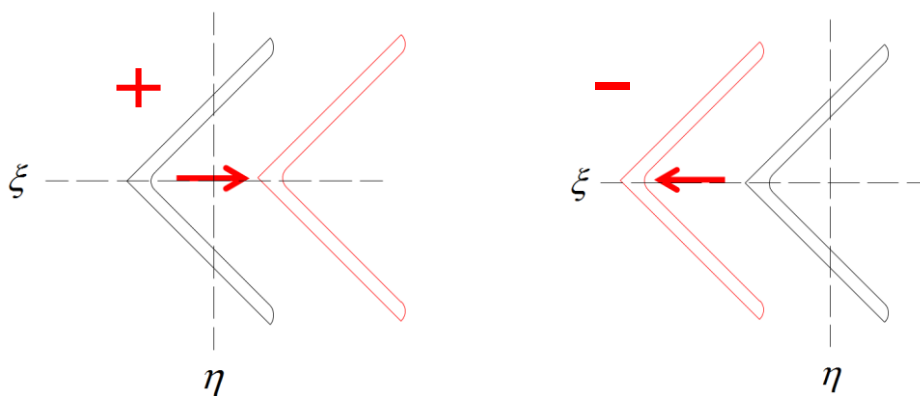
Mreža končnih elementov je bila zaradi zagotavljanja natančnosti rezultatov zgoščena, tako da je velikost najdaljše stranice končnega elementa samo nekaj milimetrov.



Slika 14: Shematičen prikaz mreže končnih elementov

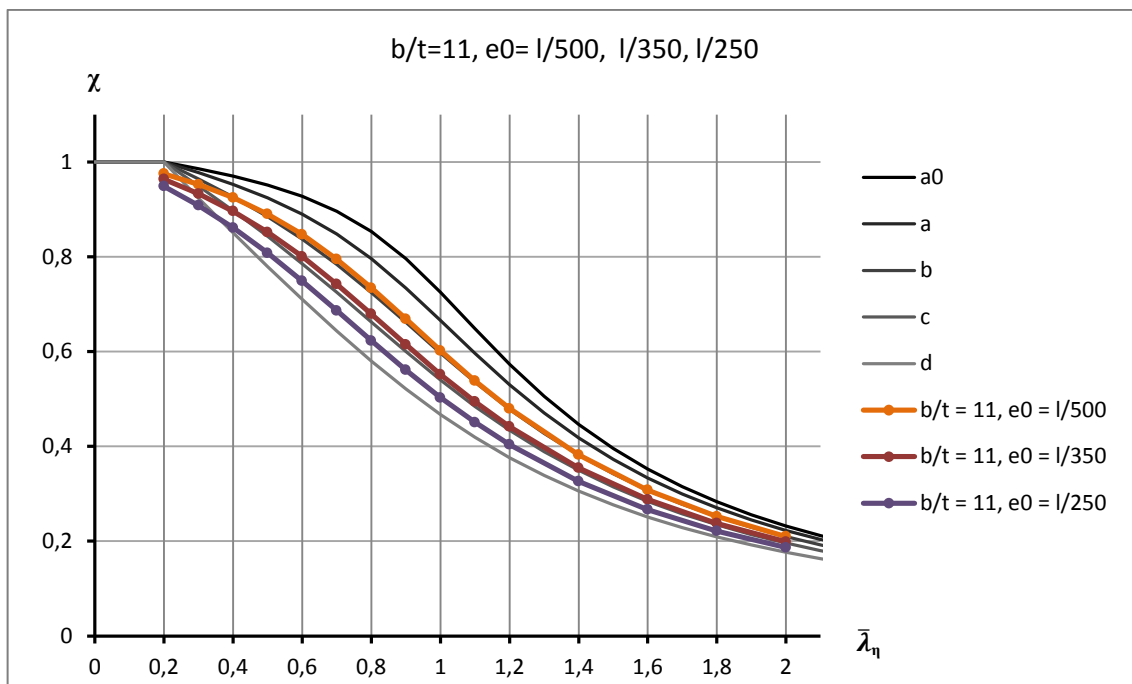
Zaradi poenostavitve modeliranja elementov v programskem okolju Abaqus, so bile začetne nepopolnosti in zaostale napetosti združene v ekvivalentne geometrijske nepopolnosti.

Ekvivalentne nepopolnosti za upogibni uklon so bile privzete v obliki sinusoide z enim valom z amplitudo  $L/500$ . Standard Evrokod sicer navaja velikost ekvivalentnih nepopolnosti  $L/250$ , vendar se rezultati numerične analize niso ujemale z ustrezno uklonsko krivuljo. Na spodnjih grafikonih je prikazan vpliv velikosti ekvivalentnih nepopolnosti in njihovega predznaka, saj se v primeru pozitivnega premika v krakih kotnika pojavijo natezne napetosti, ki ugodno vplivajo na stabilnost elementa. Bolj neugoden je negativni premik, ki v krakih kotnika povzroči tlačne napetosti.

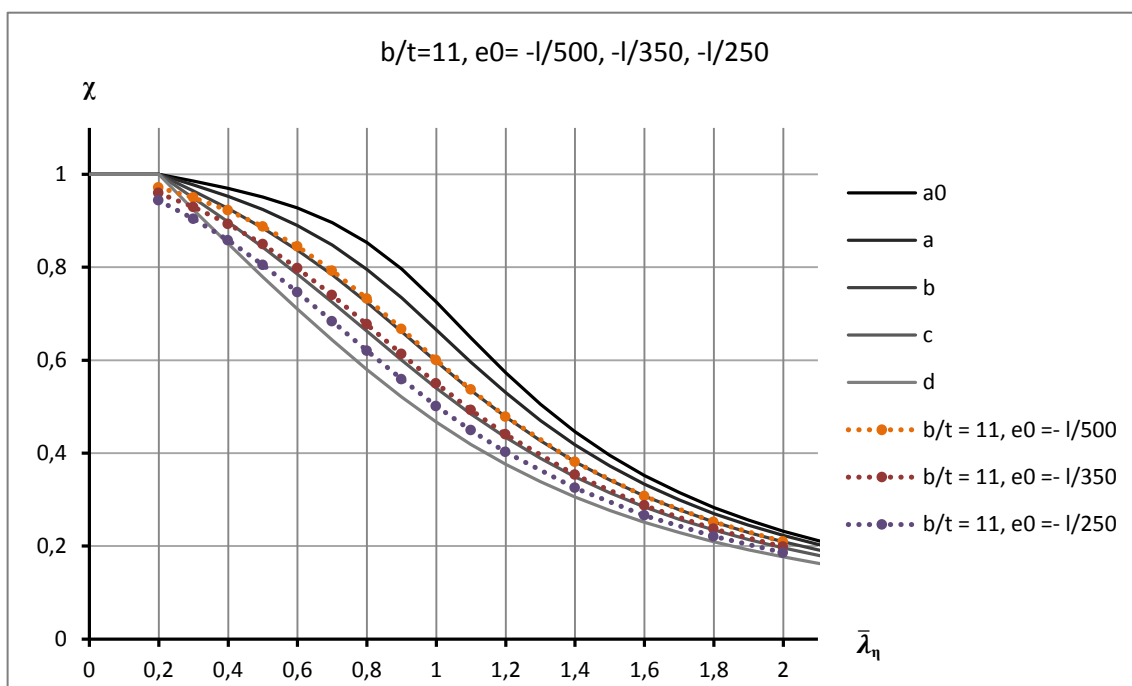


Slika 15: Predznak ekvivalentnih nepopolnosti glede na smer pomika (Sinur, 2015)

Na grafikonih 12 in 13 so prikazani rezultati ob upoštevanju pozitivne in negativne smeri ekvivalentnih nepopolnosti za upogibni uklon.



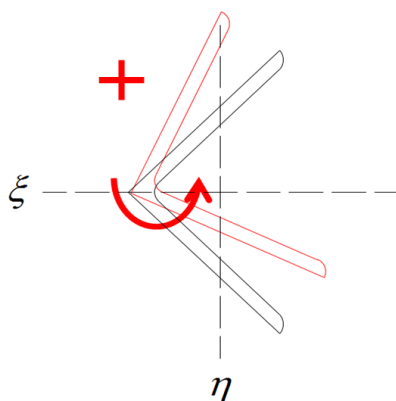
Grafikon 12: Vpliv velikosti upogibnih ekvivalentnih nepopolnosti s pozitivnim predznakom na uklonsko nosilnost (Sinur in sod., 2013)



Grafikon 13: Vpliv velikosti upogibnih ekvivalentnih nepopolnosti z negativnim predznakom na uklonsko nosilnost (Sinur in sod., 2013)

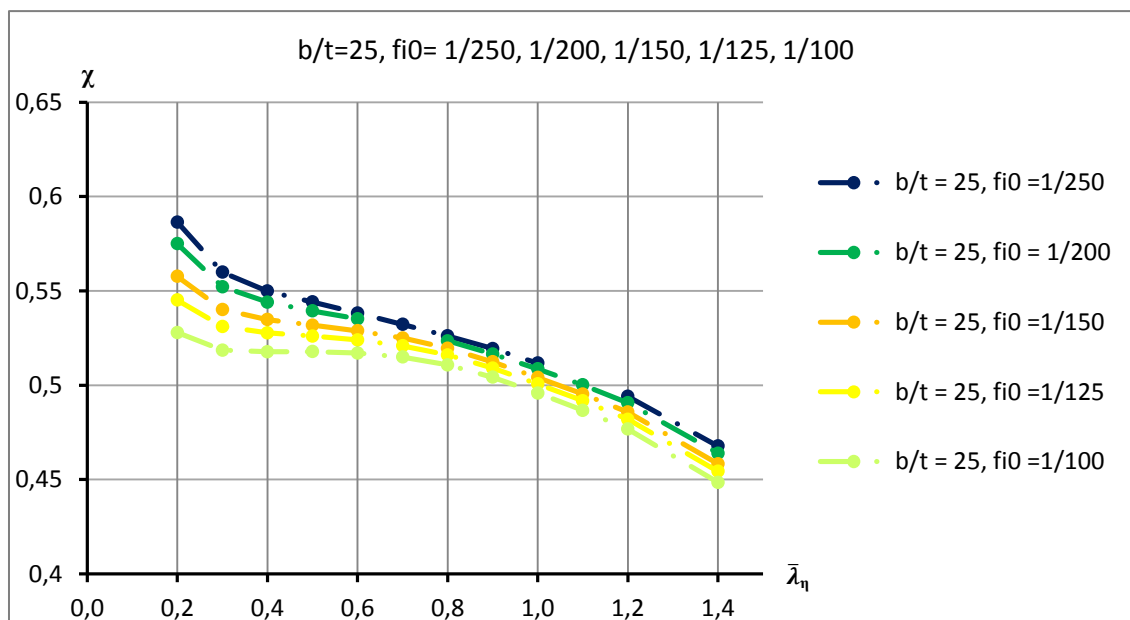
Razlike niso velike, zaradi natančnosti pa so bile v analizah uporabljene ekvivalentne nepopolnosti z negativnim predznakom, kot je določeno na sliki 15.

Na sliki 16 je določena smer pozitivnega torzijskega zasuka, ker pa so kotniki simetrični glede na močno os, smer zasuka ne vpliva na odziv elementa.



Slika 16: Zasuk kotnika (Sinur, 2015)



Amplituda ekvivalentne nepopolnosti za torzijski uklon bistveno ne vpliva na odziv, kar je razvidno iz grafikona 14. V numeričnih simulacijah je zato bila izbrana konservativna vrednost torzijskega zasuka  $\phi_0 = 1/100$  radiana.



Grafikon 14: Vpliv velikosti torzijskih ekvivalentnih nepopolnosti na uklonsko nosilnost (Sinur in sod., 2013)

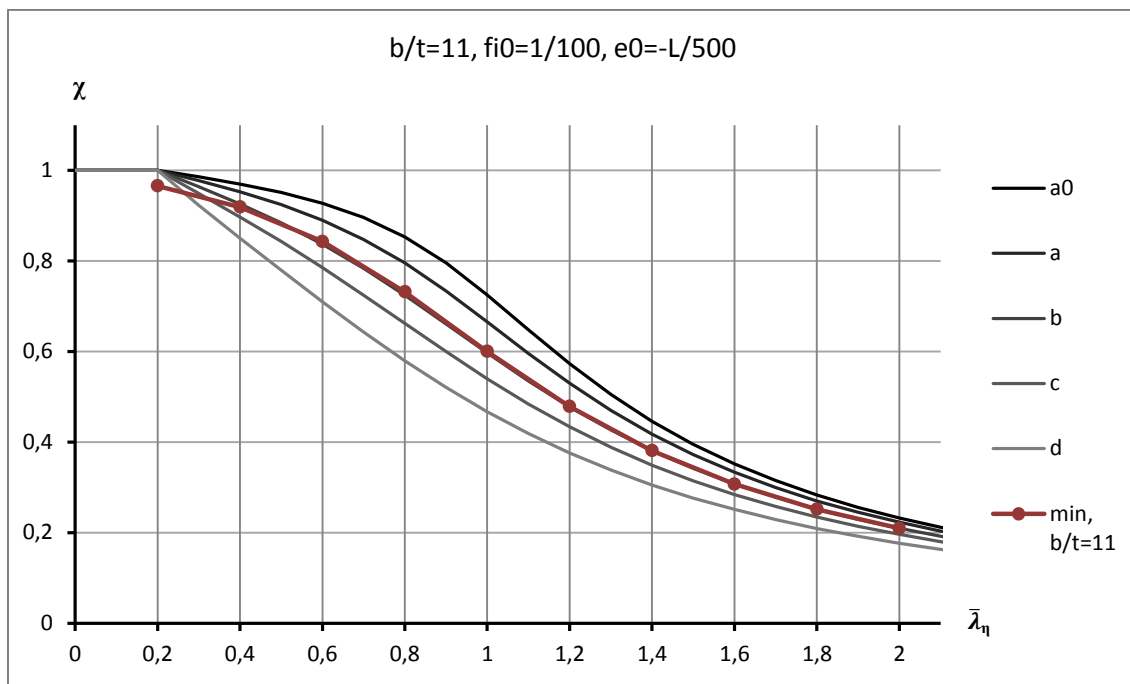
Skladno s priporočili standarda SIST EN 1993-1-5 so bile v analizah uporabljene kombinacije upogibnih in torzijskih ekvivalentnih nepopolnosti. Vrednosti ekvivalentnih nepopolnosti in kombinacije so povzete v preglednici 8.

Preglednica 8: Kombinacija ekvivalentnih nepopolnosti (Sinur in sod., 2013)

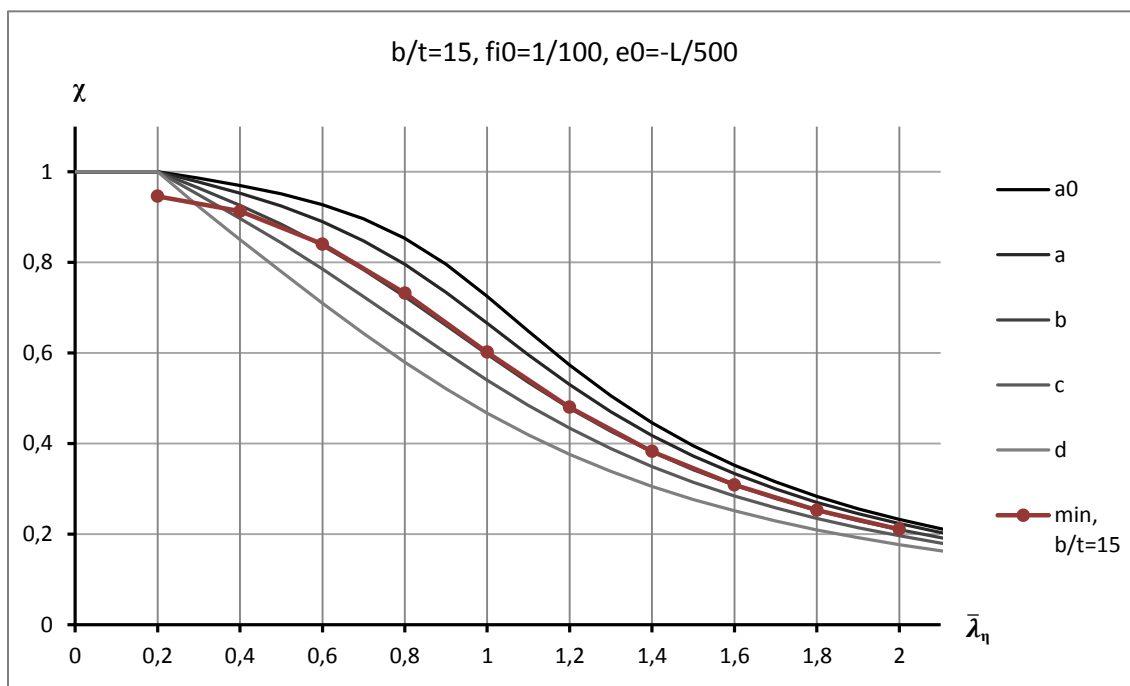
DEFORMACIJSKA OBLIKA		KOMBINACIJA	AMPLITUDE
Upogib: 	Torzija: 	Šibka os: $\pm F + 0,7 T$ $T \pm 0,7 F$	$e_0 = L/500$ $\phi_0 = 1/100$
		Močna os: $F \pm 0,7 T$ $\pm T + 0,7 F$	

Z izbranimi amplitudami in kombinacijo nepopolnosti, se je odziv elementov s kompaktnim prečnim prerezom praktično ujel z uklonsko krivuljo b, ki jo za kotne profile podaja standard SIST EN 1993. Manjše odstopanje se pojavi pri vrednosti  $\bar{\lambda}_\eta = 0,2$ . »Zaradi konstantne začetne nepopolnosti, ki jo upoštevamo v nelinearni analizi, ne dosežemo polne nosilnosti pri vitkosti 0,2, saj so uklonske krivulje določene z amplitudo nepopolnosti  $\alpha(\bar{\lambda}-0,2)$ .« (Sinur in sod., 2013, str. 8).

Primerjava rezultatov uklonske nosilnosti (uklonske krivulje) in rezultatov numeričnih simulacij obnašanja elementov s kompaktnim prečnim prerezom je prikazana na grafikonih 15 in 16.



Grafikon 15: Numerični rezultati za kompakten prečni prerez in uklonske krivulje (Sinur in sod., 2013)



Grafikon 16: Numerični rezultati za kompakten prečni prerez in uklonske krivulje (Sinur in sod., 2013)

Zgoraj prikazani primerjavi rezultatov numerične simulacije odziva kompaktnih kotnikov in uklonskih krivulj potrjujeta ustreznost uporabljenega modela, saj se rezultati numeričnih simulacij ujamejo z uklonsko krivuljo b, ki jo za kotnike navaja standard SIST EN 1993-1-1.

Numerične analize uklonskih nosilnosti in uklonskih oblik so bile izvedene za razmerja  $b/t$ , ki so podana v spodnji preglednici.

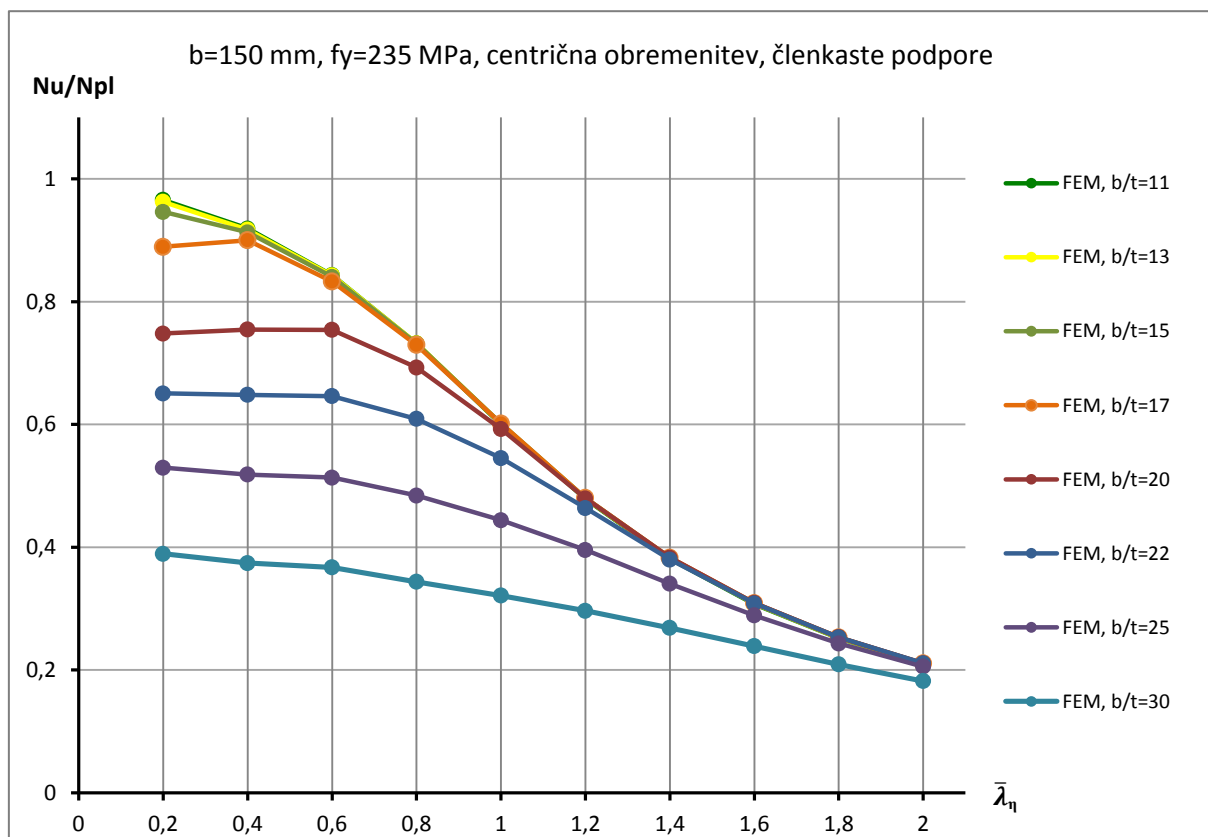
Preglednica 9: Razmerja  $b/t$  uporabljena v numerični analizi

b/t							
11	13	15	17	20	22	25	30

Za osnovo pri primerjanju uklonskih nosilnosti je bila, podobno kot pri primerjavi analitičnih rezultatov, izbrana relativna vitkost okoli šibke osi pri bruto prečnem prerezu.  $\bar{\lambda}_\eta = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}}$ ,

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E I_\eta}{l_{u,\eta}^2}$$

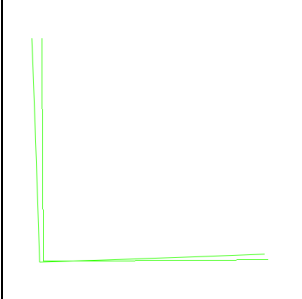
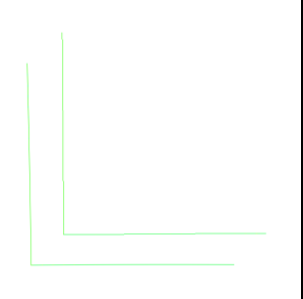
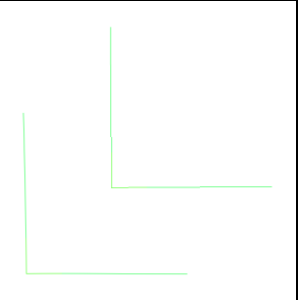
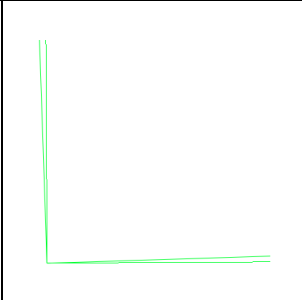
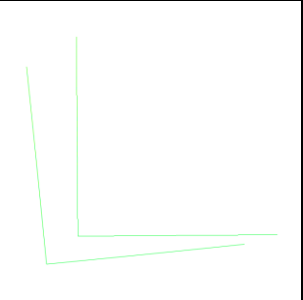
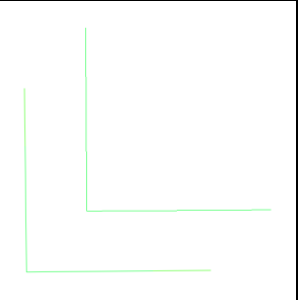
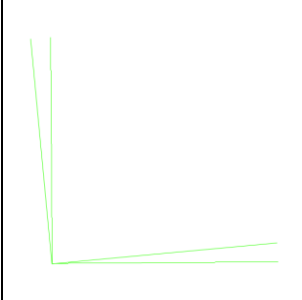
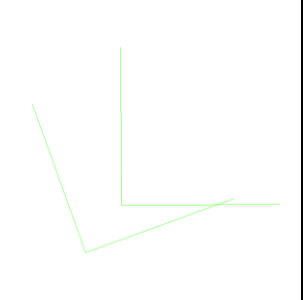
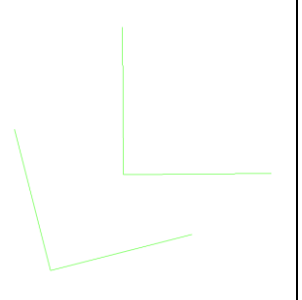
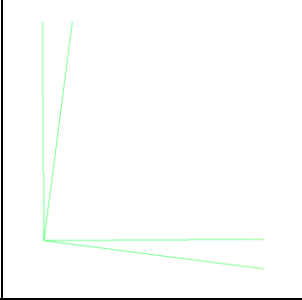
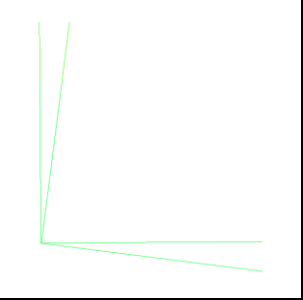
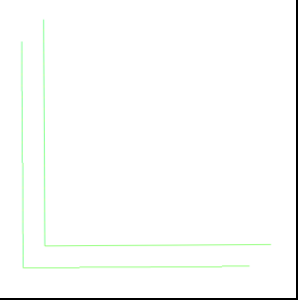
Na spodnjem grafikonu so prikazani rezultati numeričnih simulacij za enakokrake kotnike z različnim razmerjem  $b/t$ . Rezultati se ujemajo s teoretičnimi ugotovitvami o torzijskem, torzijsko-upogibnem in upogibnem uklonu. Vidimo, da se z večanjem vitkosti prereza zmanjšuje uklonska nosilnost in da se povečuje območje torzijskega oziroma torzijsko-upogibnega uklona. Ne glede na vitkost prereza, se elementi pri zelo veliki relativni vitkosti uklonijo upogibno. Vrednosti numeričnih rezultatov se približajo elastični uklonski nosilnosti okoli šibke osi.



Grafikon 17: Rezultati numeričnih simulacij (Sinur in sod., 2013)

Priporočila za izdelavo numeričnega modela v programskem okolju Abaqus, rezultati in podane ugotovitve obnašanja tlačno obremenjenih jeklenih kotnih profilov, so bili uporabljeni pri izdelavi tega magistrskega dela. Podrobneje je bilo raziskano področje torzijsko-upogibnega uklona. Spodnja preglednica prikazuje deformacije izbranih elementov na sredini razpona pri mejni obremenitvi, to je pri obremenitvi, tik pred uklonom.

Preglednica 10: Pomik in zasuk prečnega prereza centrično podprtega elementa

$\bar{\lambda}_\eta$ b/t	0,2	1,0	2,0
13			
17			
22			
25			

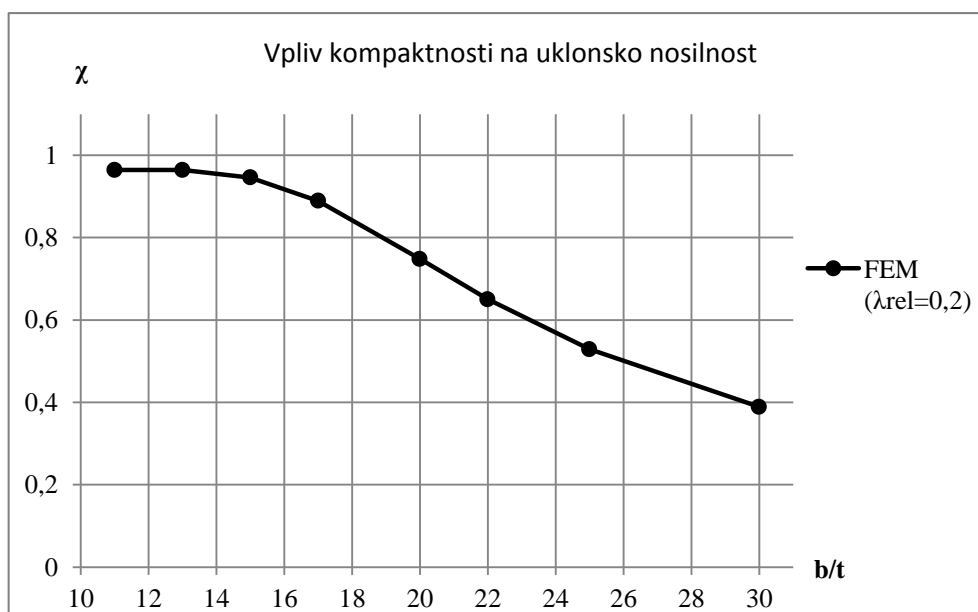
Torzijski zasuk in pomik prečnega prereza sta odvisna od kompaktnosti prereza in dolžine elementa. Rezultati numeričnih simulacij in v zgornji preglednici zbrane slike pomikov in zasukov prečnega



prereza potrjujejo do sedaj našeta predvidevanja o obnašanju tlačno obremenjenih jeklenih elementov z enojno simetričnim prečnim prerezom v obliki enakokrakega kotnika. Kratki elementi se uklonijo torzijsko, dolgi pa upogibno. Področje torzijsko-upogibnega uklona je poleg dolžine elementa odvisno tudi od vitkosti prečnega prereza. Z večanjem vitkosti prečnega prereza se območje torzijskega oziroma torzijsko-upogibnega uklona povečuje, kar je razvidno tudi na grafikonu 17. Z večanjem dolžine elementov oziroma relativne vitkosti, se uklon elementov približa upogibnemu uklonu okoli šibke osi, kar je razvidno tudi iz primerjave numeričnih rezultatov z analitičnimi rezultati uklonske nosilnosti, ki jih podajajo standardi na spodnjih grafikonih.

### 3.4 Primerjava rezultatov numeričnih simulacij z rezultati standardov

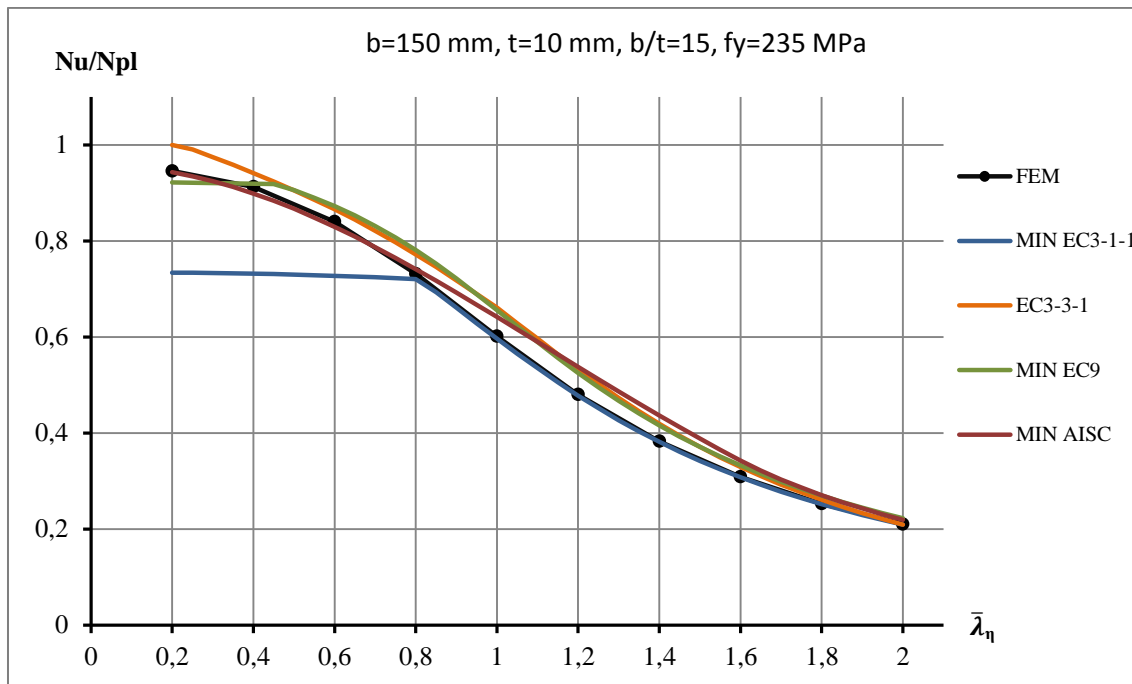
Na grafikonu 18 je prikazan vpliv vitkosti prečnega prereza na uklonsko nosilnost. Pri kotnikih s kompaktnim prečnim prerezom  $b/t \leq 15\epsilon$  po SIST EN 1993-1-5, je vrednost uklonske nosilnosti pri  $\bar{\lambda}_\eta = 0,2$  konstantna, pri vitkih prečnih prerezih pa je očitno njeno zmanjšanje.



Grafikon 18: Vpliv vitkosti na uklonsko nosilnost

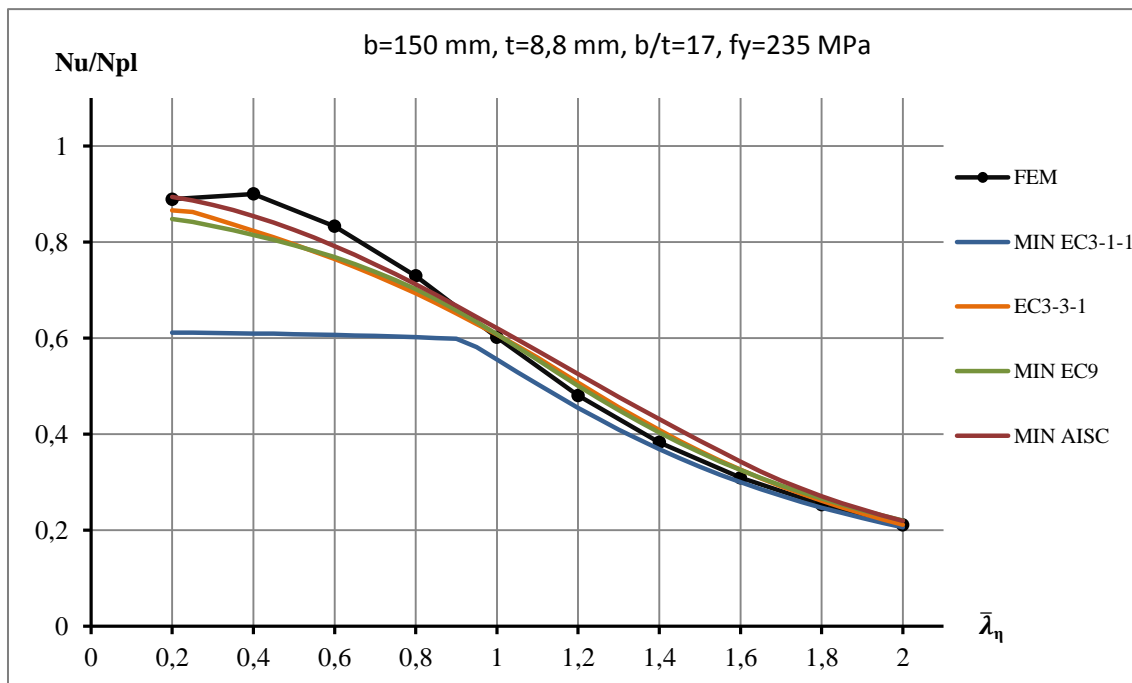
Glede na rezultate, ki so prikazani na grafikonu 18 je v standardih Evrokod meja kompaktnosti za kotnike postavljena ustrezno. Sinur in Može (2015) v predlogu ustrežnejšega izračuna uklonske nosilnosti, ki je predstavljen v nadaljevanju, predlagata konservativnejšo mejo kompaktnosti  $b/t = 14\epsilon$ , saj je že pri vrednosti  $b/t \geq 15\epsilon$  tudi na grafikonu 18 zaznati padec uklonske nosilnosti.

Na grafikonih v nadaljevanju so primerjani rezultati numeričnih simulacij z rešitvami po različnih standardih. Predstavljene so minimalne vrednosti uklonske nosilnosti, ki so merodajne pri stabilnostni analizi elementov. Za standard AISC je upoštevan pogoj, da se torzijski oziroma torzijsko-upogibni uklon preverja pri kotnikih z razmerjem  $b/t > 20$ .

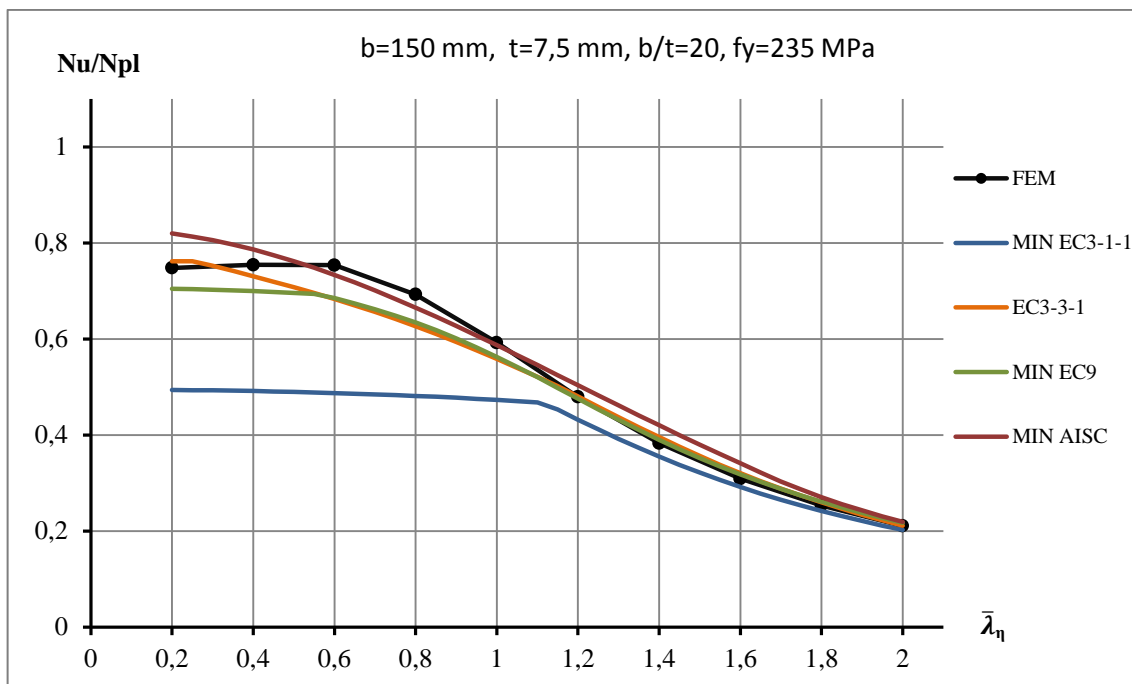


Grafikon 19: Primerjava rezultatov pri  $b/t=15$ , centrična obremenitev

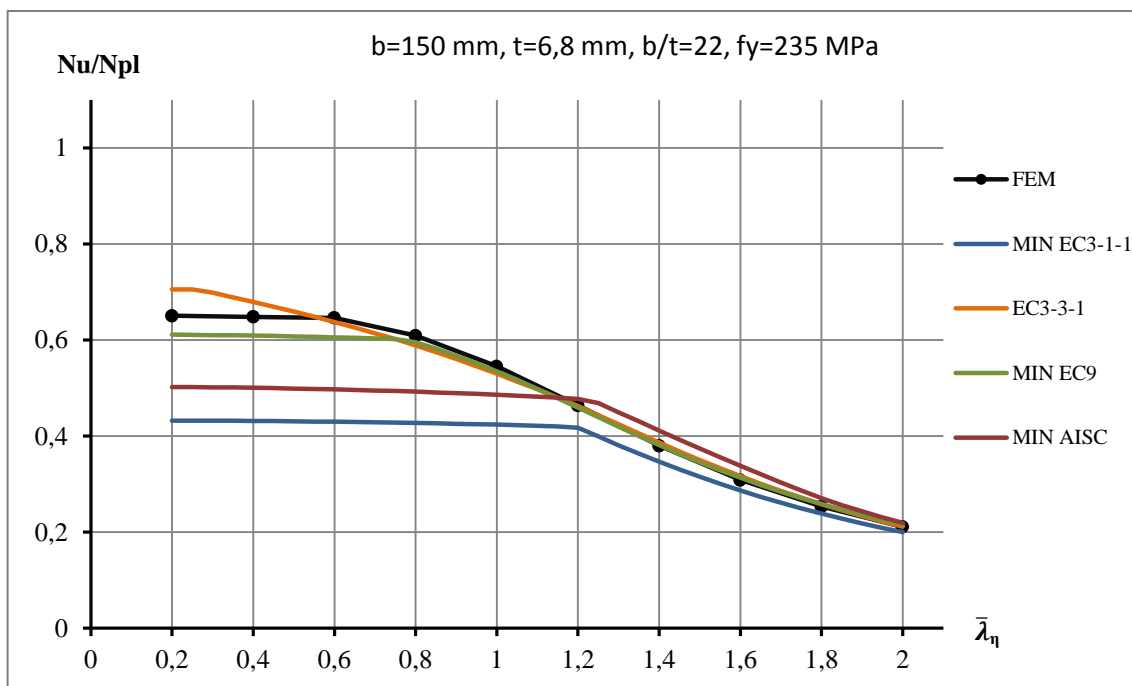
Kotnik z vitkostjo prereza  $b/t = 15$  pri kvaliteti jekla S235 ima glede na določila standarda SIST EN 1993-1-1 kompakten prečni prerez, vendar je zaradi oblike prečnega prereza potrebno preveriti tudi nevarnost torzijskega oziroma torzijsko-upogibnega uklona.



Grafikon 20: Primerjava rezultatov pri  $b/t=17$ , centrična obremenitev



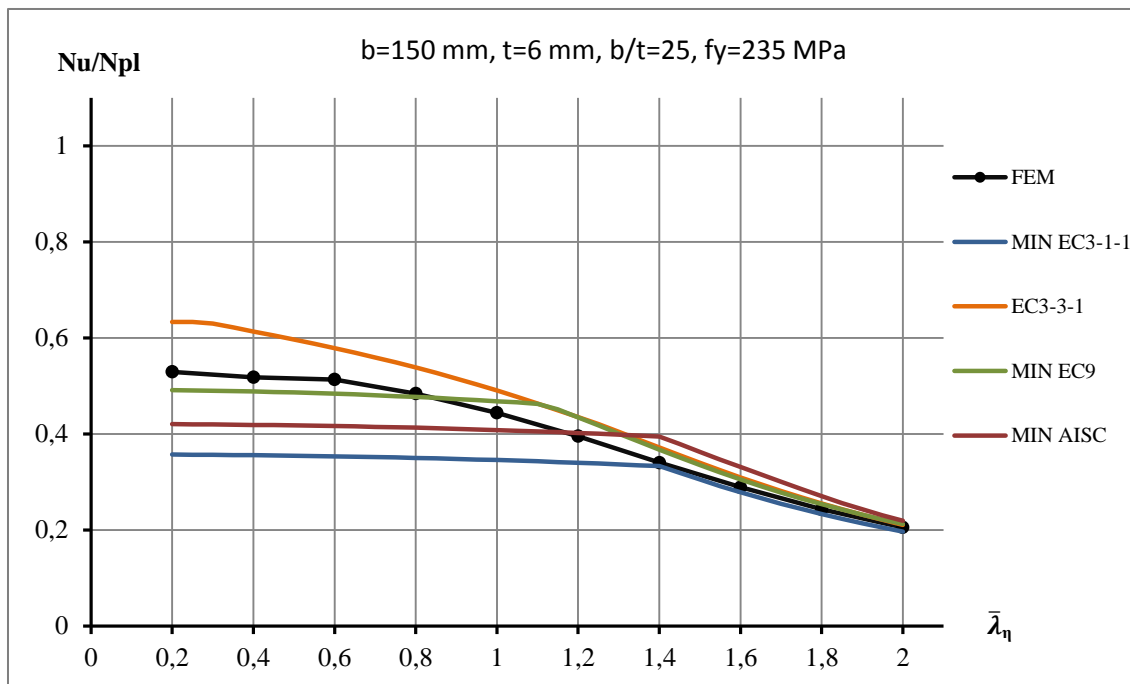
Grafikon 21: Primerjava rezultatov pri  $b/t=20$ , centrična obremenitev



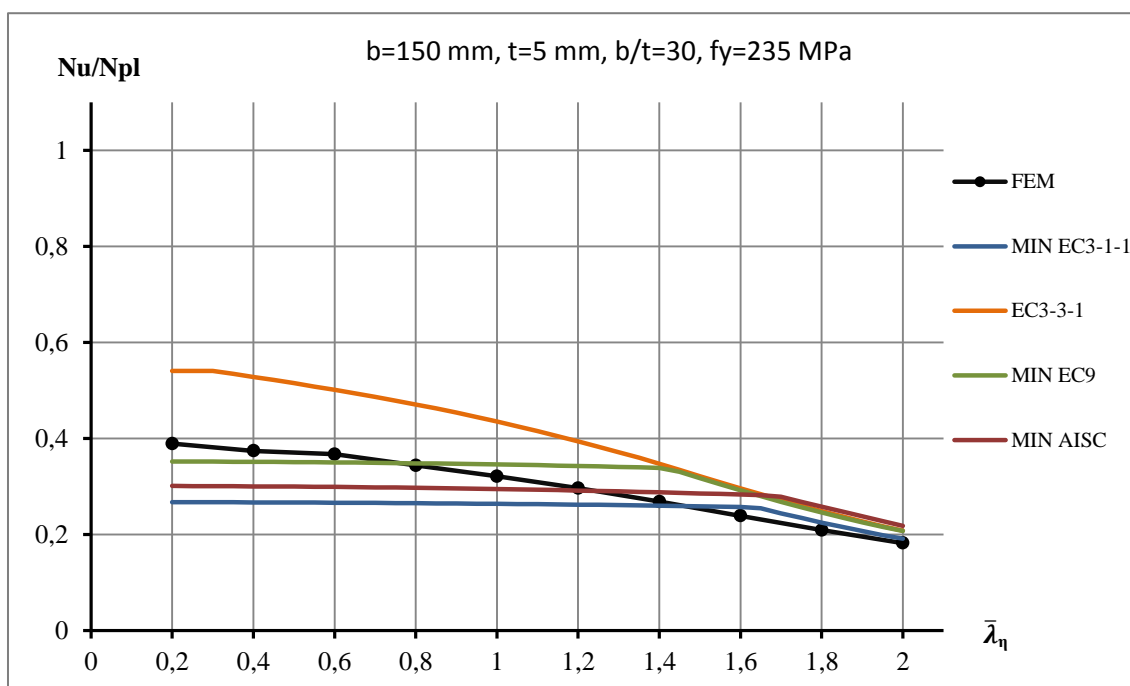
Grafikon 22: Primerjava rezultatov pri  $b/t=22$ , centrična obremenitev

Analitične rešitve so v primerjavi z rezultati numeričnih simulacij na grafikonih 19-22 večinoma na varni strani. Največjo konservativnost kaže standard SIST EN 1993-1-1, medtem ko se krivulje uklonske nosilnosti ostalih standardov zelo dobro ujemajo z numeričnimi rezultati. Ob upoštevanju samo upogibnega uklona, dobro ujemanje z numeričnimi rezultati kaže tudi standard AISC.

Pogoj torzijskega uklona je pri večini standardov precej konservativen, najmanjše razlike pa so v območju, kjer je merodajen upogibni uklon. Težave predstavlja območje torzijsko-upogibnega uklona, kjer se zaradi neustrezne interakcije obeh vrst uklona pojavi večje odstopanje, ki z večanjem vitkosti prereza narašča. Analitične rešitve za zelo vitke prereze, ki so prikazane na grafikonih v nadaljevanju, se zato med seboj precej razlikujejo.



Grafikon 23: Primerjava rezultatov pri b/t=25, centrična obremenitev



Grafikon 24: Primerjava rezultatov pri b/t=30, centrična obremenitev

Elementi z zelo vitkim prečnim prerezom ( $b/t > 22$ ) so praviloma izpostavljeni torzijskemu uklonu, upogibni uklon se kot merodajen pojavi pri zelo velikih relativnih vitkosti. Ker standardi ne zajemajo interakcije torzijskega in upogibnega uklona okoli šibke osi, se z večanjem vitkosti prerezov samo znižuje plato torzijskega uklona. Ker ni ustrezne interakcije med torzijskim in upogibnim uklonom okoli šibke osi, prehod med obema uklonoma ostane nad krivuljo numeričnih rezultatov, kar pomeni, da so analitični rezultati na nevarni strani.

### 3.5 Predlogi za ustrežnejši izračun uklonske nosilnosti

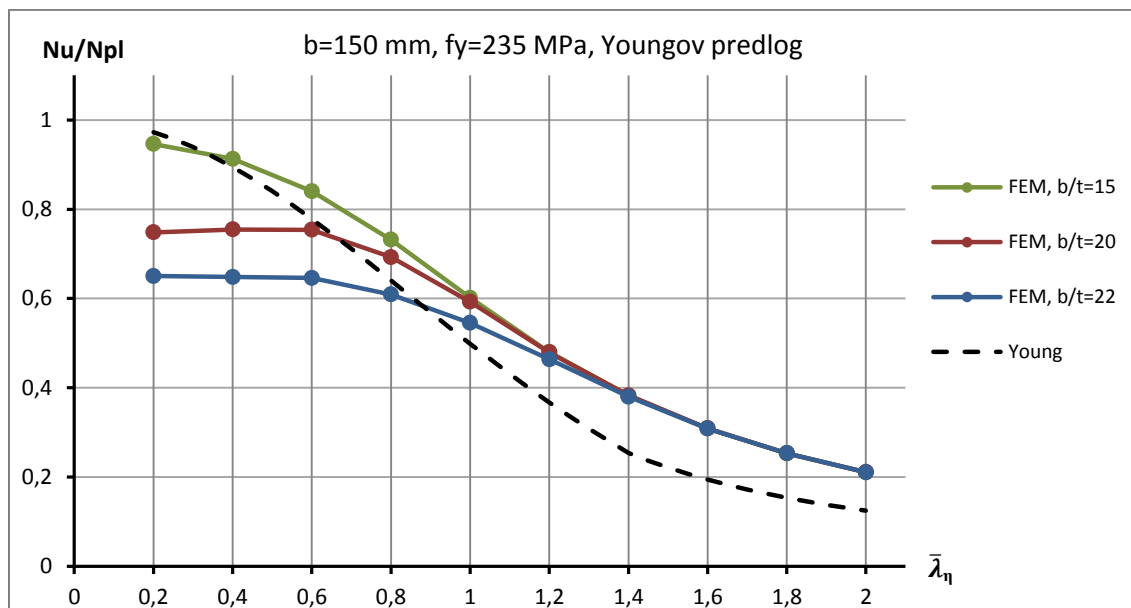
Zaradi velike konservativnosti standardov, so v nadaljevanju podani predlogi za natančnejši, predvsem pa enostavnejši izračun uklonske nosilnosti. Standarda SIST EN 1993-1-1 in AISC, ki sta glede na zgoraj prikazane rezultate zelo konservativna, v nadaljevanju nista več obravnavana.

#### 3.5.1 Youngov predlog o spremembi enačbe standarda AISC za upogibni uklon

Preverjen je bil tudi Youngov (2004) predlog o modifikaciji enačbe upogibnega uklona standarda AISC:

$$F_n = \begin{cases} (0,658 \lambda_c^2) F_y & \lambda_c \leq 1,5 \\ \left[ \frac{0,8777}{\lambda_c^2} \right] F_y & \lambda_c > 1,5 \end{cases} \quad F_{n,Young} = \begin{cases} (0,5 \lambda_c^2) F_y & \lambda_c \leq 1,4 \\ \left[ \frac{0,5}{\lambda_c^2} \right] F_y & \lambda_c > 1,4 \end{cases} \quad (62)$$

Izračun uklonske nosilnosti po modificirani Youngovi enačbi bistveno ne izboljša ujemanja rezultatov. Ellobody in Young (2005) sta primerjala modificirano enačbo z eksperimentalno dobljenimi rezultati uklonske nosilnosti hladno oblikovanih elementov. V primerjavi z rezultati numeričnih simulacij obnašanja vroče valjanih kotnih profilov Sinurja in sod. (2013), so vidna večja odstopanja. Enačba ne zajema vpliva zmanjševanja uklonske nosilnosti zaradi torzijskega uklona v območju majhnih relativnih vitkosti, za relativno vitke elemente pa podaja konservativne vrednosti uklonske nosilnosti, zato njena uporaba za obravnavano vrsto jeklenih elementov ni primerna. Na grafikonu spodaj je prikazana primerjava Youngovega predloga z rezultati numeričnih simulacij za nekatera razmerja  $b/t$ .



Grafikon 25: Primerjava numeričnih rezultatov z Youngovim predlogom

### 3.5.2 Uklonska krivulja za torzijski in torzijsko-upogibni uklon v SIST EN 1993-1-1

Sinur in Može (2015) predlagata novo uklonsko krivuljo za torzijski in torzijsko-upogibni uklon v SIST EN 1993-1-1. Pri tem ostane izračun upogibne uklonske nosilnosti za kompaktno prečne preze nespremenjen. Izračun relativne vitkosti za vitke preze se za upogibni uklon določi na podlagi efektivnega prečnega prereza  $A_{eff}$ , za torzijsko-upogibni uklon pa z uporabo bruto prečnega prereza  $A$ , kot je določeno z enačbama (65) in (67). Za uklonsko krivuljo torzijsko-upogibnega uklona je izbran faktor nepopolnosti  $\alpha = 0,21$ . Lokalno izbočenje pločevin je tesno povezano s torzijskim uklonom, zato je z vrednostjo  $\bar{\lambda}_0 = 0,748$  določen daljši torzijski plato.

- Za 1., 2. in 3. razred kompaktnosti:  $\frac{c}{t} = \frac{b-t-r}{t} \approx \frac{b-2t}{t} \leq 14\varepsilon$ ,  $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}}, \quad N_{cr} = \frac{\pi^2 E I_\eta}{l_u^2}, \text{ uklonska krivulja b in izračun } \chi_F, \quad (63)$$

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd,F} = \chi_F A f_y / \gamma_{M1} \quad (64)$$

- Za 4. razred kompaktnosti:  $\frac{c}{t} = \frac{b-t-r}{t} \approx \frac{b-2t}{t} > 14\varepsilon$ ,  $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}}, \quad N_{cr} = \frac{\pi^2 E I_\eta}{l_u^2}, \text{ izbira uklonske krivulje b in izračun } \chi, \quad (65)$$

$$A_{eff} = 2(\bar{b} t), \quad \bar{b} = b - 2t, \text{ kjer je } \bar{b} \text{ dolžina in } t \text{ debelina kraka kotnika} \quad (66)$$

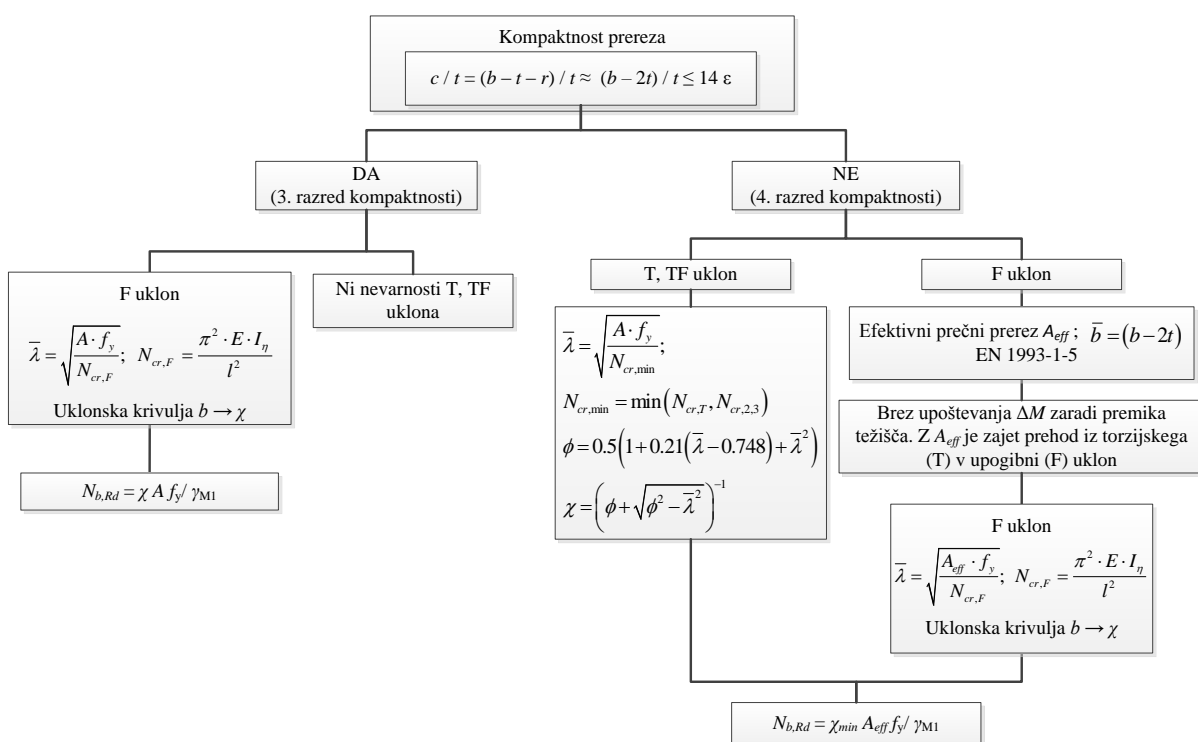
$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_{T,TF} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr,min}}}, \quad N_{cr,min} = \min(N_{cr,2,3}, N_{cr,T}) \quad (67)$$

$$\chi = \begin{cases} 1,0 & \bar{\lambda} \leq 0,748 \\ \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} & \bar{\lambda} > 0,748 \end{cases} \quad \phi = 0,5(1 + 0,21(\bar{\lambda} - 0,748) + \bar{\lambda}^2) \quad (68)$$

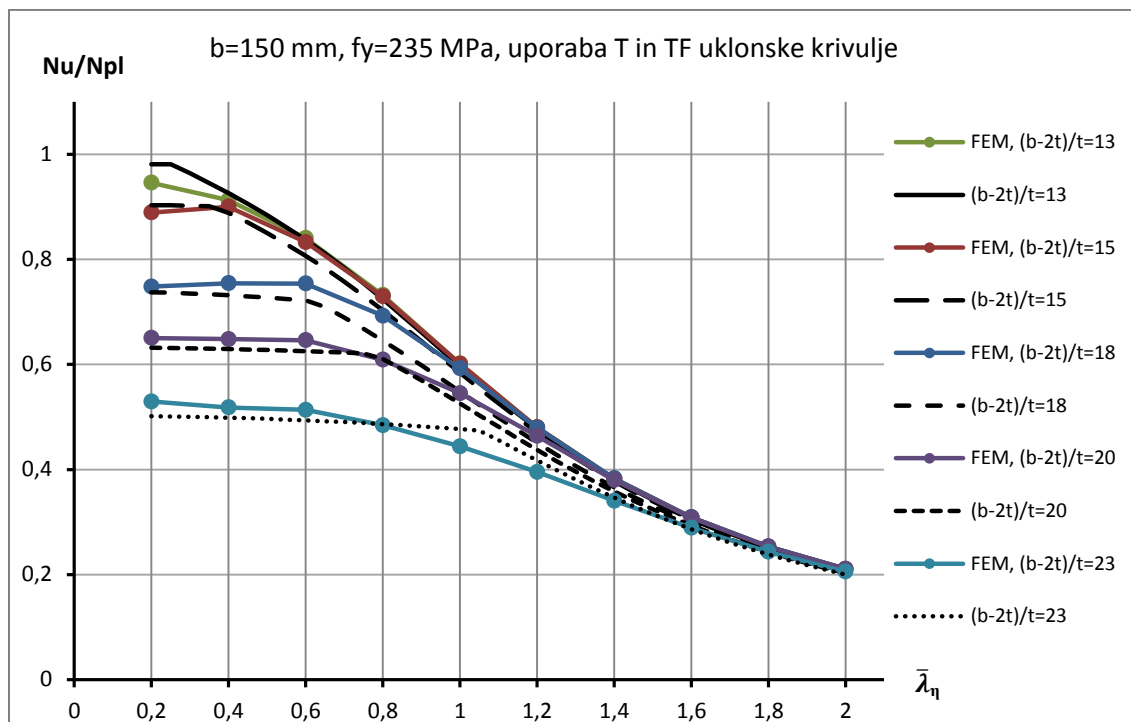
Merodajna minimalna vrednost brezdimenzijske uklonske nosilnosti je določena z enačbama (65) in (68). Uklonska nosilnost vitkih kotnikov je po predlogu Sinurja in Možeta (2015) določena z enačbo (69).

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} = \chi A_{eff} f_y / \gamma_{M1} \quad (69)$$

Predlog predstavlja elegantno rešitev velike konservativnosti standarda v območju torzijskega in torzijsko-upogibnega uklona, hkrati pa se dosednji postopek bistveno ne spremeni. Postopek je pregledno predstavljen na sliki 17.



Slika 17: Predlagani postopek izračuna uklonske nosilnosti (Sinur in Može, 2015)



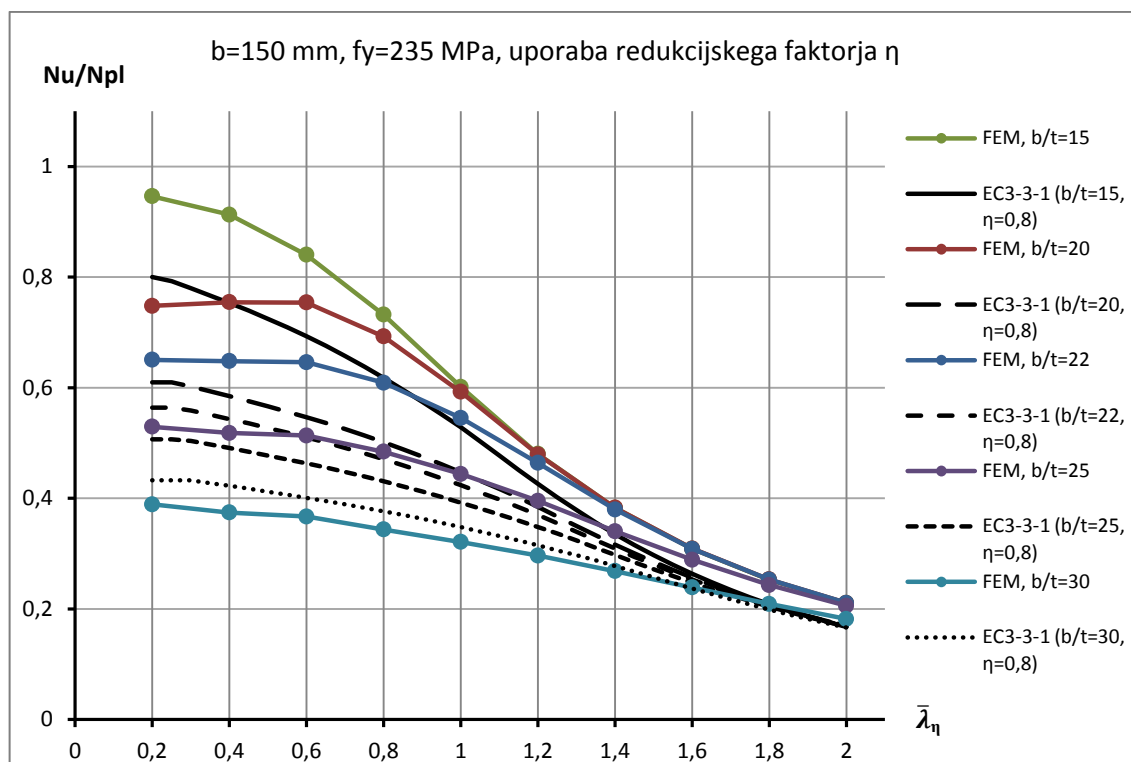
Grafikon 26: Ujemanje rezultatov z uporabo T in TF uklonske krivulje (Sinur in Može, 2015)

Z uporabo uklonske krivulje za torzijski in torzijsko-upogibni uklon se na novo določene analitične vrednosti po standardu SIST EN 1993-1-1 in rezultati numeričnih simulacij skoraj povsem ujamejo. Predlagani postopek zajema tudi poenotenje definicije kompaktnosti prečnega prereza kotnikov znotraj standarda SIST EN 1993.

### 3.5.3 Uporaba redukcijskega faktorja $\eta$ v SIST EN 1993-3-1

Standard podaja redukcijski faktor glede na robne pogoje. V primerjavi standardov je bila uporabljena sistemska dolžina elementov, redukcijski faktor pa je bil izbran  $\eta=1$ , kar bi pomenilo togo povezavo elementov. Numerične simulacije odziva tlačno obremenjenih kotnikov so bile izvedene s členkastimi podporami, kar pomeni, da je za primerjavo potrebno izbrati ustrezno vrednost faktorja  $\eta$ . Za kotnike, ki so z ostalimi elementi povezani členkasto, standard priporoča uporabo redukcijskega faktorja  $\eta=0,8$ . Na grafikonu spodaj so prikazane primerjave med rezultati numeričnih simulacij in rezultati, ki jih ob upoštevanju redukcijskega faktorja  $\eta=0,8$  podaja standard. Rezultati so za majhna razmerja  $b/t$  zelo konservativni, pri zelo vitkih prerezih pa so lahko celo na nevarni strani.





Grafikon 27: Primerjava numeričnih rezultatov z analitičnimi rezultati z upoštevanim faktorjem  $\eta$

Ne glede na vrsto podpiranja oziroma povezovanja elementov je očitno, da je izbira redukcijskega faktorja  $\eta=0,8$  zelo konservativna možnost. Standard dovoljuje uporabo redukcijskega faktorja, določenega z nacionalnim dodatkom. Pri primerjavah rezultatov členkasto podprtih elementov v okviru magistrskega dela, je bila kot manj konservativna, a kljub temu varna, preverjena tudi vrednost  $\eta=0,9$ , ki je sicer predvidena za elemente, ki so na eni strani podprti členkasto, na drugi pa so vpeti. Smiselno bi bilo izvesti dodatne raziskave obnašanja različno podprtih centrično obremenjenih elementov, s katerimi bi lahko določili natančnejšo vrednost redukcijskega faktorja v nacionalnem dodatku.

### 3.5.4 Sprememba uklonske krivulje SIST EN 1999

Standard SIST EN 1999, ki sicer obravnava konstrukcijske elemente iz aluminijevih zlitin, se z upoštevanjem torzijsko-upogibnega in upogibnega uklona najbolj približa rezultatom numeričnih simulacij uklona vitkih kotnikov. Za elemente z zelo vitkim prečnim prerezom je za nekatere vrednosti relativne vitkosti uklonska krivulja na nevarni strani. S spreminjanjem ali izbiro drugačne vrednosti faktorja nepopolnosti za upogibni uklon bi zmanjšali vrednosti brezdimenzijske uklonske nosilnosti. S spremembo uklonskih krivulj za enojno simetrične jeklene profile, bi rezultati prešli na varno stran za poljubno vrednost relativne vitkosti elementa.

- ZVIŠEVANJE FAKTORJA NEPOPOLNOSTI  $\alpha$  SKUPAJ Z VEČANJEM VITKOSTI:

Od vitkosti prereza odvisen faktor nepopolnosti, ki se za zelo vitke prereze ( $b/t > 22$ ) ustrezno povečuje in tako vpliva na uklonsko nosilnost upogibnega uklona, lahko zapišemo v obliki:

$$\alpha = 0,005 e^{0,17(b/t)} \quad (70)$$

Vrednost začetne nepopolnosti pa ostane enaka  $\bar{\lambda}_0 = 0$ .

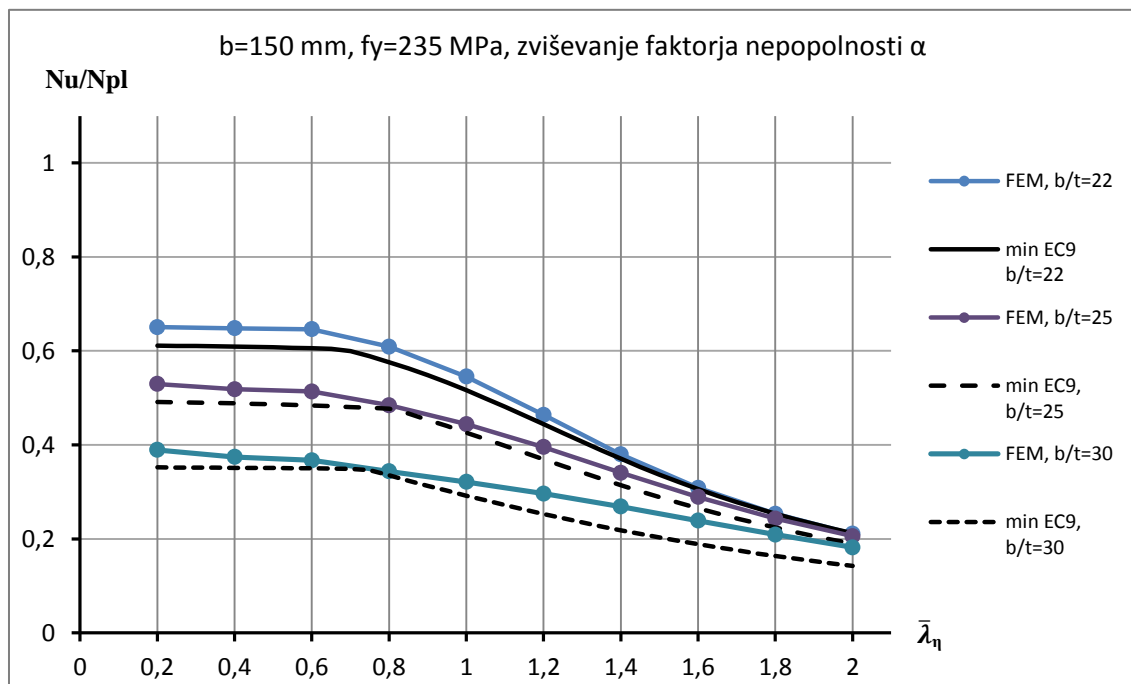
Preglednica 11: Sprememba faktorjev

Vitkost prereza	$\alpha$
$b/t = 22$	0,21
$b/t = 25$	0,35
$b/t = 30$	0,82

Uklonska nosilnost za upogibni uklon:

$$\chi = \chi_F = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad \chi \leq 1,0 \quad (71)$$

$$\phi = 0,5(1 + \eta + \bar{\lambda}^2), \quad \eta = 0,005 e^{0,17(b/t)} \bar{\lambda} \quad (72)$$



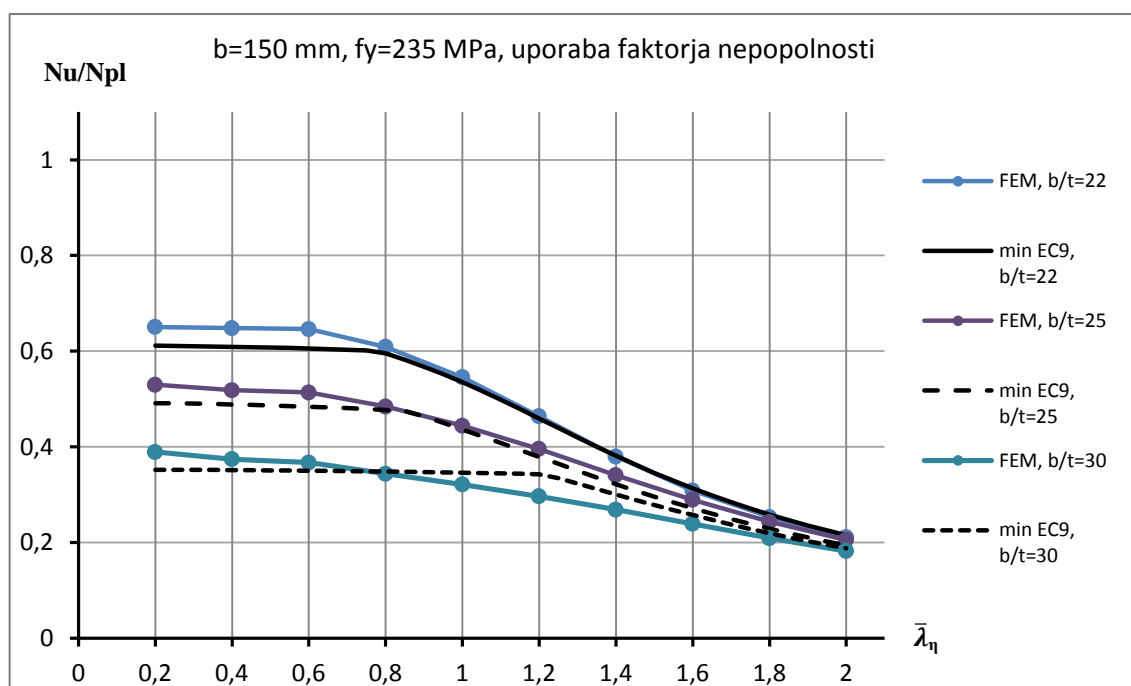
Grafikon 28: Primerjava numeričnih rezultatov s predlogom spremembe uklonske krivulje

S spremembo uklonske krivulje za upogibni uklon, se analitični rezultati v primerjavi z rezultati numerične analize premaknejo na varno stran. Ta rešitev je z vidika enostavnosti nesprejemljiva, saj se

z vpeljavo novega koeficienta ravnosti postopek določitve uklonske krivulje dodatno razdeli na dva dela in predstavlja komplikacijo že tako zahtevnega postopka izračuna uklonske nosilnosti. Enostavnejša je izbira konstantne vrednosti omenjenega faktorja, ki je predstavljena v nadaljevanju.

- IZBIRA FAKTORJA NEPOPOLNOSTI  $\alpha$ :

Z izbiro vrednosti  $\alpha = 0,32$  in  $\bar{\lambda}_0 = 0$  ostanemo znotraj omejitev standarda, hkrati pa se analitični rezultati bolje ujamejo z rezultati numeričnih simulacij. Na spodnjih grafikonih je za razmerja  $b/t=22$ , 25 in 30 prikazano ujemanje rezultatov. Pri manjših vitkosti prečnega prereza so rezultati še vedno na varni strani.



Grafikon 29: Primerjava numeričnih rezultatov s predlogom uporabe drugega faktorja nepopolnosti

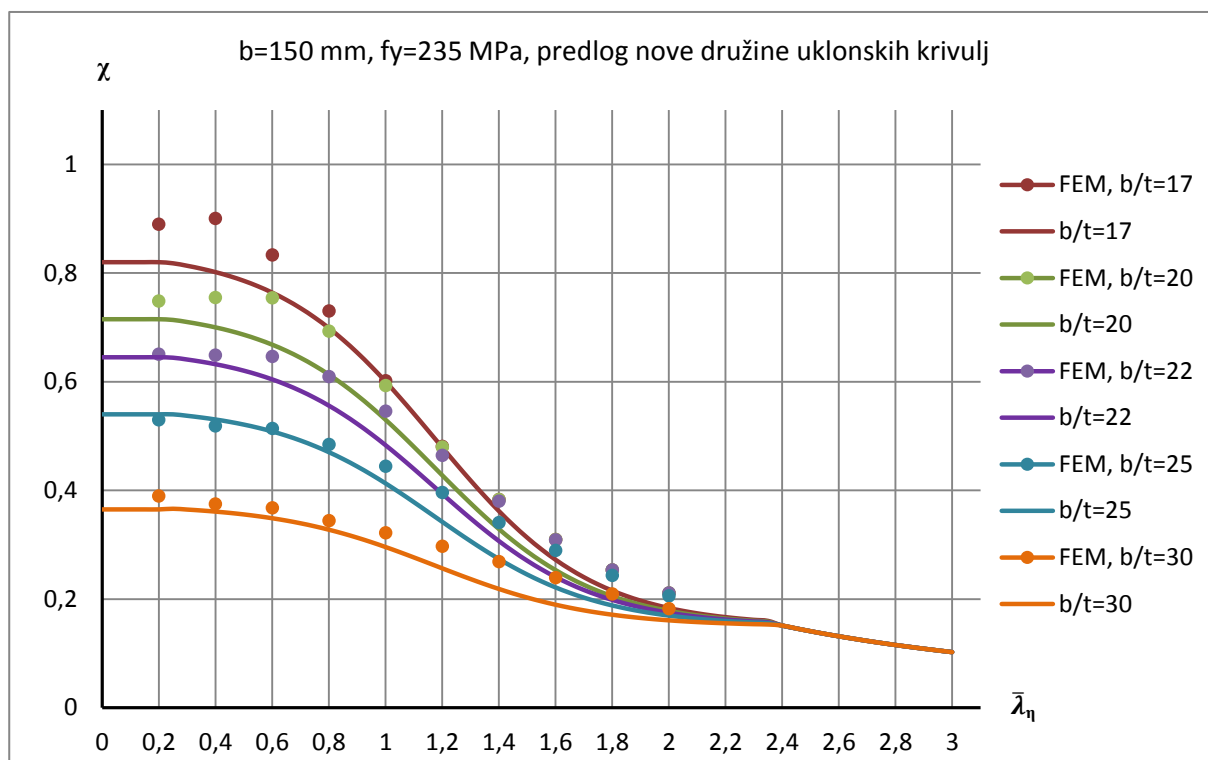
Z izbiro predlaganega faktorja nepopolnosti se analitični rezultati za razmerji  $b/t=22$  in  $b/t=25$ , glede na rezultate numeričnih simulacij, premaknejo na varno stran. Za razmerje  $b/t=30$  pa je uklonska krivulja še vedno na nevarni strani. Ker gre za zelo vitke prereze vroče valjanih elementov, ki se v praksi praktično ne pojavljajo, je nadaljnje spreminjanje uklonskih krivulj nesmiselno in nepotrebno. Kotniki z razmerjem  $b/t = 25\epsilon$  se za kvaliteto jekla S235, glede na ponudbo proizvajalca ArcelorMittal, ne pojavljajo na tržišču.

### 3.5.5 Določitev nove družine uklonskih krivulj

Kot poskus rešitve problema torzijsko-upogibnega uklona je na podlagi rezultatov numeričnih simulacij uklona kotnikov nastala enačba za izračun uklonske nosilnosti. Spodaj predstavljena enačba je bila določena empirično, tako da so se rezultati kar najbolje ujeli z rezultati numeričnih simulacij. Glede na geometrijske karakteristike elementov se uklonsko nosilnost določi na podlagi relativne vitkosti elementa okoli šibke osi.

$$\chi = \begin{cases} 1,415 - 0,035 (b/t) & \bar{\lambda}_{\eta} \leq 0,2 \\ 0,15 + \frac{1,63 - 0,045 (b/t)}{1,25 + e^{3,6 \bar{\lambda}_{\eta} - 4}} & 0,2 < \bar{\lambda}_{\eta} < 2,4 \\ \frac{0,7}{\bar{\lambda}_{\eta}^{1,75}} & \bar{\lambda}_{\eta} \geq 2,4 \end{cases} \quad (73)$$

$$N_{b,Rd} = \chi A \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (74)$$



Grafikon 30: Primerjava numeričnih rezultatov s predlogom nove družine uklonskih krivulj

Enačba nove družine krivulj je glede na relativno vitkost sestavljena iz treh delov. Začetni del pokriva torzijski uklon in je za izbrano vitkost prereza konstanten. Drugi del je empirično določena enačba, ki poskuša zajeti interakcijo torzijskega in upogibnega uklona. Tretji del enačbe, ki velja za velike relativne vitkosti, pa je modificirana enačba upogibnega uklona po ameriškem standardu AISC, ki se tako kot krivulja standarda Evrokod, približa Eulerjevi kritični uklonski sili okoli šibke osi. Krivulje določene po novi enačbi sledijo rezultatom numeričnih simulacij in so za predstavljena razmerja  $b/t$  na varni strani.

Prednost predstavljene enačbe je v enostavnosti izračuna, saj je za izračun uklonske nosilnosti potrebno poznati le razmerje  $b/t$  in geometrijske karakteristike za izračun kritične uklonske sile okoli šibke osi, s pomočjo katere določimo tudi potrebno relativno vitkost. Posledica poenostavitvev pa je konservativnost izračuna brezdimenzijske uklonske nosilnosti.

## 4 EKSCENTRIČNO OBREMENJENI ENAKOKRAKI KOTNI PROFILI

Ekscentrično obremenjeni kotniki nastopajo praktično v vseh konstrukcijah, saj je priključevanje elementov preko enega kraka najenostavnejše in najcenejše. Zaradi enostavnosti izvedbe, so spoji danes večinoma vijačeni in varjeni, v preteklosti pa so bili tudi kovičeni. Obravnavana tema nadgrajuje področje centrično obremenjenih enakokrakih kotnih profilov. V kotnikih, ki so z drugimi elementi povezani preko enega kraka, nastopa ekscentrična obremenitev. Ker težišče in strižno središče zaradi oblike prečnega prereza nista v isti točki, obremenitev pa nastopa ekscentrično, imamo v elementu, pri katerem je nevarnost torzijskega uklona, dodatno tudi upogibni moment. V preteklosti so standardi ekscentričnost obremenitve zanemarili, ali pa so jo upoštevali s pomočjo redukcijskih faktorjev. Takšen pristop predstavlja zelo konservativno vrednotenje nosilnosti, zaradi enostavnosti izračuna pa je priljubljen med inženirji. V nadaljevanju so predstavljeni postopki izračuna uklonske nosilnosti enakokrakih kotnih profilov s kompaktnimi in vitkimi prečnimi prerezi po evropskih in ameriških standardih. Izvedena je bila numerična simulacija obnašanja tlačno obremenjenih elementov, rezultati pa so primerjani z rezultati standardov. Preverjen je bil vpliv različnega načina podpiranja elementov na velikost uklonske nosilnosti in na obliko izgube stabilnosti. Na podlagi primerjav so podani komentarji in predlogi za enostavnejši, a kljub temu dovolj natančen izračun uklonske nosilnosti preko enega kraka obremenjenih kotnih profilov.

### 4.1 Uklonska nosilnost kotnih profilov

Problem stabilnosti tlačno obremenjenih kotnih elementov postane v prisotnosti upogibnega momenta kompleksnejši. Kot je ugotovil že Sakla (1997), problem uklona preide v problem bočnih deformacij, ki se pojavijo v vseh fazah obtežbe. Standardi na različne načine upoštevajo vpliv upogibnega momenta, ki dodatno zmanjšuje nosilnost obremenjenih elementov.

#### 4.1.1 SIST EN 1993-1-1

Vpliv sočasnega delovanja tlačne sile in upogibnega momenta standard zajema z interakcijskimi enačbami, ki pa so namenjene preverjanju dvojno simetričnih prerezov. Glede enojno simetričnih prerezov, ki so izpostavljeni delovanju obravnavane obtežbe, standard podaja postopek izračuna uklonske nosilnosti po teoriji drugega reda z upoštevanjem nepopolnosti. Z namenom primerjave rezultatov uklonske nosilnosti so bili izračuni narejeni na podlagi spodaj predstavljenih interakcijskih enačb in poenostavitev.

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y A_i f_y / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} W_y f_y / \gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{W_z f_y / \gamma_{M1}} \leq 1 \quad (75)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z A_i f_y / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} W_y f_y / \gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{W_z f_y / \gamma_{M1}} \leq 1 \quad (76)$$

Vrednosti  $k_{yy} = k_{yz} = k_{zy} = k_{zz}$  so lahko večje od 1, ker pri izračunu kritične uklonske sile delujejo ugodno, lahko poenostavljeno privzamemo vrednost 1. Za elemente obremenjene samo z osno silo, ki deluje ekscentrično, velja  $M_{y,Ed} = e_{N,z} N_{Ed}$   $M_{z,Ed} = e_{N,y} N_{Ed}$ . Dodatnih momentov zaradi upoštevanja nevarnosti lokalnega izbočenja pločevin z uporabo  $A_{eff}$  ni potrebno upoštevati ( $\Delta M_{y,Ed} = \Delta M_{z,Ed} = 0$ ). Ker je upogibni uklon okoli geometrijskih osi enak za obe smeri, se enačbi poenostavita v eno samo enačbo:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y A_i f_y / \gamma_{M1}} + \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} W_y f_y / \gamma_{M1}} + \frac{M_{z,Ed}}{W_z f_y / \gamma_{M1}} \leq 1 \quad (77)$$

Glede na razred kompaktnosti je potrebno upoštevati geometrijske karakteristike prereza in uporabiti ustrezno vrednost prečnega prereza in odpornostnega momenta. Vrednosti so prikazane v spodnji preglednici. Interakcijo osne sile in upogibnih uklonov je potrebno preveriti tako za geometrijske kot glavne osi. V interakcijo obeh obremenitev je vključena kontrola bočne zvrnitve, kot je predstavljeno z enačbama (78) in (79) in uklona, kot je predstavljeno v poglavju 3.1. Zaradi različnih vrednosti ekscentričnosti delovanja obtežbe je potrebno preveriti kombinacijo bočne zvrnitve in uklona okoli obeh osi. Merodajna je kombinacija z minimalno vrednostjo uklonske nosilnosti.

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L} \sqrt{E I_z G I_t + \frac{\pi^2 E I_z E I_\omega}{L^2}} \quad \bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \quad (78)$$

$$\chi_{LT} = \begin{cases} 1,0 & \bar{\lambda}_{LT} \leq 0,4 \\ \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - 0,75 \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} & \bar{\lambda}_{LT} > 0,4 \end{cases} \quad (79)$$

$$\phi_{LT} = 0,5(1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0})) + 0,75 \bar{\lambda}_{LT}^2 \quad (80)$$

Vrednost  $\alpha_{LT}$  je odvisna od uklonske krivulje upogibnega uklona, izbrana je bila vrednost  $\alpha_{LT} = 0,76$ , ki pripada uklonski krivulji d.

Preglednica 12: Izbira geometrijskih karakteristik (SIST EN 1991-1-1, Preglednica 6.7)

Razred	1	2	3	4
$A_i$	A	A	A	$A_{eff}$
$W_{j,i}$	$W_{pl,y}$	$W_{pl,y}$	$W_{el,y}$	$W_{eff,y}$
$W_{j,i}$	$W_{pl,z}$	$W_{pl,z}$	$W_{el,z}$	$W_{eff,z}$
$M_{i,Ed}$	0	0	0	$e_{N,j} N_{Ed}$
$M_{j,Ed}$	0	0	0	$e_{N,i} N_{Ed}$

#### 4.1.1.1 Primer

Predstavljeni so vmesni rezultati določitve uklonske nosilnosti ekscentrično obremenjenega jeklenega kotnika izbranih dimenzij. Kotnik predstavlja diagonalo daljnovodnega stolpa. Standard SIST EN 1993-1-1 ne podaja posebnih postopkov izračuna uklonske nosilnosti za različne načine povezovanja med elementi. Zaradi kontrole nevarnosti bočne zvrnitve, ki je namenjena dvojno simetričnim prerezom izrazi ne predstavljajo natančnega izračuna uklonske nosilnosti.

#### Spoj preko enega vijaka (členkasta povezava) in dveh vijakov (toga povezava):

Podatki:

$$b = h = 150 \text{ mm}, \quad t = 7,5 \text{ mm}, \quad b/t = 20$$

$$L = l_u = 1500 \text{ mm}$$

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2 \quad G = 80769 \text{ N/mm}^2 \quad f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

Geometrijske karakteristike:

$$A = 2193,75 \text{ mm}^2 \quad A_{\text{eff}} = 1672,1 \text{ mm}^2$$

$$W_{y,\text{eff}} = W_{z,\text{eff}} = 25956 \text{ mm}^3 \quad W_{\eta,\text{eff}} = 7402,2 \text{ mm}^3 \quad W_{\xi,\text{eff}} = 42551,3 \text{ mm}^3$$

$$I_{\eta} = 1967945,46 \text{ mm}^4 \quad I_{\xi} = 7825517,58 \text{ mm}^4 \quad I_t = 41132,8 \text{ mm}^4$$

$$\xi_s = 51,673 \text{ mm} \quad \eta_s = 0 \text{ mm} \quad i_s^2 = 7134,375 \text{ mm}^2$$

$$e_{N_y} = 36,54 \text{ mm} \quad e_{N_z} = 34,71 \text{ mm} \quad e_{N_{\eta}} \approx 0 \text{ mm} \quad e_{N_{\xi}} = 50,38 \text{ mm}$$

Kritične uklonske sile in brezdimenzionalne uklonske nosilnosti:

$$N_{\text{cr},y} = N_{\text{cr},z} = 4510,7 \text{ kN} \quad N_{\text{cr},\eta} = 1812,8 \text{ kN} \quad N_{\text{cr},\xi} = 7208,6 \text{ kN}$$

$$N_{\text{cr},T} = 465,7 \text{ kN} \quad N_{\text{cr},2} = 11810,1 \text{ N} \quad N_{\text{cr},3} = 454,2 \text{ kN}$$

$$M_{\text{cr},z} = 122415,9 \text{ kNmm} \quad M_{\text{cr},\eta} = 77605,3 \text{ kNmm}$$

Upogibni uklon:

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_F = 0,466 \quad \chi_F = 0,899$$

Torzijski in torzijsko-upogibni uklon:

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_{T,TF} = 0,930 \quad \chi_{T,TF} = 0,642$$

$$\chi = \min \begin{cases} 0,899 \\ 0,642 \end{cases} = 0,642$$

Bočna zvrnitev okoli geometrijske osi:

$$\bar{\lambda}_{LT,y} = 0,223 \quad \chi_{LT} = 1 \quad N_{\text{Ed},y} \leq 63,9 \text{ N}$$

Bočna zvrnitev okoli glavne osi:

$$\bar{\lambda}_{LT,\xi} = 0,359 \quad \chi_{LT} = 1 \quad N_{Ed,\xi} \leq 82,7 \text{ N}$$

$$N_{Ed} \leq \min \begin{cases} 63,9 \\ 82,7 \end{cases} = \mathbf{63,9 \text{ kN}}$$

#### 4.1.2 SIST EN 1993-3-1

Standard 1993, del 3-1, ki obravnava področje stolpov, jamborov in dimnikov, obravnava uklonsko nosilnost ekscentrično obremenjenih kotnikov zelo poenostavljeno. Podobno kot pri centrični obremenitvi, je odvisno od načina pritrdjevanja oziroma podpiranja kotnih elementov, določen faktor efektivne vitkosti  $k$ , ki je podan v preglednici 13. Pri izračunu vitkosti je predpostavljen uklon okoli geometrijske osi kotnika, ki je vzporedna s pritrdjenim krakom kotnika ter okoli šibke osi. Odvisno od faktorja efektivne vitkosti je lahko merodajen uklon okoli geometrijske ali šibke osi.

$$\bar{\lambda}_{\text{eff}} = k \bar{\lambda} \quad \bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} \quad \lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9\varepsilon \quad (81)$$

$$\lambda = \frac{L_1}{i_{yy}} \quad \text{ali} \quad \lambda = \frac{L_2}{i_{vv}} \quad (82)$$

$$\chi = \begin{cases} 1,0 & \bar{\lambda} \leq 0,2 \\ \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_{\text{eff}}^2}} & \bar{\lambda} > 0,2 \end{cases} \quad (83)$$

$$\phi = 0,5(1 + \eta + \bar{\lambda}_{\text{eff}}^2) \quad \eta = \alpha (\bar{\lambda}_{\text{eff}} - \bar{\lambda}_0) \quad (84)$$

Enačbe za izračun ravnosti elementa so enake kot v SIST EN 1993-1-1.

Uklonska nosilnost je, odvisno od robnih pogojev, dodatno reducirana s faktorjem  $\eta$ , ki je podan v enačbi (85). Projektna vrednost uklonske nosilnosti pa je za elemente s kompaktnim prečnim prerezom določena z enačbo (86), ter za elemente z vitkim prečnim prerezom z enačbo (87).

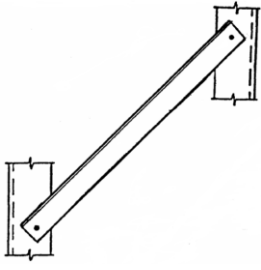
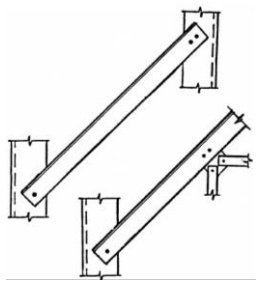
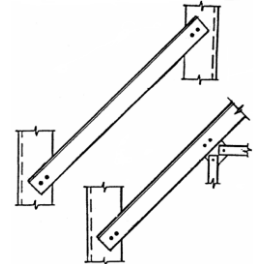
$$\eta = \begin{cases} 1,0 & \text{2 vijaka na obeh koncih ali oba konca neprekinjena} \\ 0,9 & \text{1 vijak na enem koncu, 2 vijaka na drugem koncu ali neprekinjen konec} \\ 0,8 & \text{1 vijak na obeh koncih} \end{cases} \quad (85)$$

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} = \eta \chi A f_y / \gamma_{M1} \quad (86)$$

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} = \eta \chi A_{\text{eff}} f_y / \gamma_{M1} \quad (87)$$



Preglednica 13: Izbira faktorja efektivne vitkosti  $k$  (SIST EN 1993-3-1, Preglednica G.2)

Način pritrditve	Primeri	Osi	$k$
Oba konca prekinjena (pritrditev z enim vijakom na obeh koncih)		v-v	$0,7 + \frac{0,35}{\bar{\lambda}_v}$
		y-y	$0,7 + \frac{0,58}{\bar{\lambda}_y}$
		z-z	$0,7 + \frac{0,58}{\bar{\lambda}_z}$
En konec neprekinjen (en konec pritrjen z enim vijakom, drugi konec pritrjen z dvema vijakoma ali neprekinjen)		v-v	$0,7 + \frac{0,35}{\bar{\lambda}_v}$
		y-y	$0,7 + \frac{0,40}{\bar{\lambda}_y}$
		z-z	$0,7 + \frac{0,40}{\bar{\lambda}_z}$
Oba konca neprekinjena (oba konca pritrjena z dvema vijakoma, en konec pritrjen z dvema vijakoma, drugi konec neprekinjen, oba konca neprekinjena)		v-v	$0,7 + \frac{0,35}{\bar{\lambda}_v}$
		y-y	$0,7 + \frac{0,40}{\bar{\lambda}_y}$
		z-z	$0,7 + \frac{0,40}{\bar{\lambda}_z}$

#### 4.1.2.1 Primer

Uklonska nosilnost ekscentrično obremenjenega jeklenega kotnika je po standardu SIST EN 1993-3-1 odvisna od načina povezovanja jeklenih elementov. Diagonale daljnovodnih stolpov so lahko s sosednjimi elementi povezane na različne načine. Razen izračuna faktorja efektivne vitkosti  $k$  in vrednosti redukcijskega faktorja  $\eta$  je postopek enak za vse vrste povezovanja. Predstavljeni so vmesni rezultati izračuna uklonske nosilnosti kotnikov, ki so s sosednjimi elementi povezani preko spoja z enim ali dvema vijakoma.

#### Podatki:

$$b = h = 150 \text{ mm}, \quad t = 7,5 \text{ mm}, \quad b/t = 20$$

$$L = l_u = 1500 \text{ mm}$$

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2$$

$$G = 80769 \text{ N/mm}^2$$

$$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

Geometrijske karakteristike:

$$A = 2193,75 \text{ mm}^2 \quad A_{\text{eff}} = 1672,1 \text{ mm}^2$$

$$I_{\eta} = 1967945,46 \text{ mm}^4 \quad I_{\xi} = 7825517,58 \text{ mm}^4 \quad I_t = 41132,8 \text{ mm}^4$$

Kritične uklonske sile in brezdimezionalne uklonske nosilnosti:

$$N_{\text{cr},\eta} = 1812,8 \text{ kN} \quad N_{\text{cr},\xi} = 7208,6 \text{ kN} \quad N_{\text{cr},y} = N_{\text{cr},z} = 4510,7 \text{ kN}$$

**Spoj preko enega vijaka (členkasta povezava,  $\eta=0,8$ ):**

$$\bar{\lambda}_{\eta} = 0,466 \quad k = 1,45 \quad \bar{\lambda}_{\text{eff},\eta} = 0,676 \quad \chi = 0,798 \quad N_{\text{b,Rd},\eta} = 250,9 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_z = 0,295 \quad k = 2,666 \quad \bar{\lambda}_{\text{eff},z} = 0,787 \quad \chi = 0,733 \quad N_{\text{b,Rd},z} = 230,4 \text{ kN}$$

$$N_{\text{b,Rd}} = \min \begin{cases} 250,9 \\ 230,4 \end{cases} = \mathbf{230,4 \text{ kN}}$$

**Spoj preko dveh vijakov (toga povezava,  $\eta=1,0$ ):**

$$\bar{\lambda}_{\eta} = 0,466 \quad k = 1,45 \quad \bar{\lambda}_{\text{eff},\eta} = 0,676 \quad \chi = 0,798 \quad N_{\text{b,Rd},\eta} = 313,6 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_z = 0,295 \quad k = 2,056 \quad \bar{\lambda}_{\text{eff},z} = 0,606 \quad \chi = 0,833 \quad N_{\text{b,Rd},z} = 327,3 \text{ kN}$$

$$N_{\text{b,Rd}} = \min \begin{cases} 313,6 \\ 327,3 \end{cases} = \mathbf{313,6 \text{ kN}}$$

**4.1.3 SIST EN 1999-1-1 (Uporaba principa določitve uklonske nosilnosti za jeklene elemente)**

Standard podaja zelo poenostavljeno alternativno metodo izračuna uklonske nosilnosti ekscentrično obremenjenih kotnikov. Uklonska nosilnost je enaka 40 % vrednosti uklonske nosilnosti okoli osi, ki je vzporedna s pritrjenim krakom enačba (88). Glede torzijskega in torzijsko-upogibnega uklona pa spremembe uklonske nosilnosti niso potrebne. Postopek, je enak kot pri centrično obremenjenih elementih in je predstavljen z enačbami (39) - (45).

$$N_{\text{Ed}} \leq 0,4 N_{\text{b,Rd},F} \quad (88)$$

$$N_{\text{Ed}} \leq N_{\text{b,Rd},T,TF} \quad (89)$$

#### 4.1.3.1 Primer

Poenostavljen postopek, ki ga podaja standard za konstrukcijske elemente iz aluminijevih zlitin, je predstavljen z rezultati izračuna uklonske nosilnosti obravnavane diagonale, ki je s sosednjimi elementi lahko povezana s spoji z enim ali dvema vijakoma. Zaradi primerjave so uporabljene materialne karakteristike jekla.

#### **Spoj preko enega vijaka (členkasta povezava) in dveh vijakov (toga povezava):**

##### Podatki:

$$b = h = 150 \text{ mm}, \quad t = 7,5 \text{ mm}, \quad b/t = 20$$

$$L = l_u = 1500 \text{ mm}$$

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2 \quad G = 80769 \text{ N/mm}^2 \quad f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

##### Geometrijske karakteristike:

$$A = 2193,75 \text{ mm}^2 \quad A_{\text{eff}} = 1672,1 \text{ mm}^2$$

$$I_\eta = 1967945,46 \text{ mm}^4 \quad I_\xi = 7825517,58 \text{ mm}^4 \quad I_t = 41132,8 \text{ mm}^4$$

##### Kritične uklonske sile in brezdimezionalne uklonske nosilnosti:

$$N_{\text{cr},y} = N_{\text{cr},z} = 4510,7 \text{ kN} \quad N_{\text{cr},\eta} = 1812,8 \text{ kN} \quad N_{\text{cr},\xi} = 7208,6 \text{ kN}$$

$$N_{\text{cr},T} = 465,7 \text{ kN} \quad N_{\text{cr},2} = 11810,1 \text{ kN} \quad N_{\text{cr},3} = 454,2 \text{ kN}$$

##### Upogibni uklon:

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_F = 0,466 \quad \chi = \chi_F = 0,917 \quad N_{\text{b,Rd},F} = 360,3 \text{ kN}$$

##### Torzijski in torzijsko-upogibni uklon:

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_{T,TF} = 1,065 \quad \chi = \chi_{T,TF} = 0,695 \quad N_{\text{b,Rd},T,TF} = 358,3 \text{ kN}$$

$$N_{\text{b,Rd}} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,4 * 360,3 \\ 358,3 \end{array} \right\} = \mathbf{144,1 \text{ kN}}$$

#### 4.1.4 AISC

Nosilnost ekscentrično obremenjenih kotnikov se izračuna odvisno od načina podpiranja elementa. V primeru, da je element na obeh straneh podprt členkasto, je potrebno upoštevati interakcijo osne sile in upogibnih momentov, ki delujeta zaradi ekscentričnosti podpor. Princip preverjanja je podoben kot v standardu Evrokod. Interakcijska enačba zajema uklonsko nosilnost okoli glavnih osi in upogibno nosilnost v kateri je preverjen pogoj plastifikacije prereza, nevarnost bočne zvrnitve in lokalnega uklona obremenjenega kraka kotnika okoli geometrijskih oziroma glavnih osi. Pri izračunu uklonske nosilnosti  $P_n$  se standard sklicuje na postopek, ki je predstavljen v poglavju o centrično obremenjenih

elementih. Upoštevana je redukcija nosilnosti zaradi vitkosti prereza, pogoj torzijskega oziroma torzijsko-upogibnega uklona pa se upošteva pri zelo vitkih kotnikih, kjer je  $b/t > 20$ . Moment zaradi ekscentričnosti obtežbe je označen z  $M_u$ , upogibno nosilnost pa predstavlja plastični upogibni moment  $M_n$ . V interakcijskih enačbah (90) in (91) je merodajna minimalna vrednost upogibnega momenta  $M_n$  določena pri kontroli plastifikacije prereza, kontroli bočne zvrnitve in kontroli lokalnega uklona.

$$\frac{P_u}{P_n} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_u}{M_n} + \frac{M_u}{M_n} \right) \leq 1,0 \quad \text{za } \frac{P_u}{P_n} \geq 0,2 \quad (90)$$

$$\frac{P_u}{2 P_n} + \left( \frac{M_u}{M_n} + \frac{M_u}{M_n} \right) \leq 1,0 \quad \text{za } \frac{P_u}{P_n} < 0,2 \quad (91)$$

V enačbah v nadaljevanju je prikazana določitev plastičnega upogibnega momenta  $M_n$ . Uporabljene so vrednosti elastičnega upogibnega momenta  $M_y$ , in kritičnega momenta bočne zvrnitve  $M_e$ .

Kontrola plastifikacije prereza:

$$M_n = 1,5 M_y \quad (92)$$

Kontrola bočne zvrnitve:

$$M_e = \frac{0,46 E b^2 t^2}{L} \quad (93)$$

$$M_n = \left( 0,92 - \frac{0,17 M_e}{M_y} \right) M_e \quad \text{za } M_e \leq M_y \quad (94)$$

$$M_n = \left( 1,92 - 1,17 \sqrt{\frac{M_y}{M_e}} \right) M_y \leq 1,5 M_y \quad \text{za } M_e > M_y \quad (95)$$

Kontrola lokalnega uklona:

Kontrola lokalnega uklona ni potrebna za kompaktne prereze. Za nekompaktne in vitke prereze pa je kontrola lokalnega izbočenja pločevin določena z enačbama (96) in (97), kjer je plastični upogibni moment  $M_n$  določen z uporabo plastičnega odpornostnega momenta  $S_c$ .

$$M_n = F_y S_c \left( 2,43 - 1,72 \left( \frac{b}{t} \right) \sqrt{\frac{F_y}{E}} \right) \quad (96)$$

$$M_n = F_{cr} S_c \quad (97)$$

Podobno kot SIST EN 1993-3-1 tudi ameriški standardi, ob pogoju, da se uklonska nosilnost računa z uporabo učinkovite vitkosti, zanemarijo vpliv ekscentričnosti. Ta princip velja samo za osno obremenjene kotnike, ki so obremenjeni preko istega kraka. Stiki morajo biti varjeni, ali vijučeni z vsaj dvema vijakoma, tako da je zagotovljena toga povezava. Glede na dolžino elementa in karakteristike prereza, določa standard učinkovito vitkost glede na geometrijsko os, ki je vzporedna z osjo pritrjenega kraka. Pri kontroli je relativna vitkost elementa določena z enačbo (98) oziroma (99). Odvisna je od uklonske dolžine in je določena kot  $\frac{KL}{r} = \frac{L}{r_n} = \frac{l_u}{r}$ .

$$\frac{L}{r_x} \leq 80 \quad \frac{KL}{r} = 72 + 0,75 \frac{L}{r_x} \quad (98)$$

$$\frac{L}{r_x} > 80 \qquad \frac{KL}{r} = 32 + 1,25 \frac{L}{r_x} \leq 200 \qquad (99)$$

Nadalje je izračun uklonske nosilnosti za upogibni uklon enak postopku, ki je predstavljen pri centrično obremenjenih kotnikih z enačbami (47)-(52), uporabljena je le zgoraj določena efektivna vitkost.

#### 4.1.4.1 Primer

Izračun uklonske nosilnosti ekscentrično obremenjenih jeklenih kotnikov-diagonal je v standardu AISC, podobno kot v standardu SIST EN 1993-3-1, odvisen od načina povezovanja. Pri izračunih je uporabljena sistemska dolžina kotnika.

Podatki:

$$b = h = 150 \text{ mm}, \quad t = 7,5 \text{ mm}, \quad b/t = 20$$

$$L = l_u = 1500 \text{ mm}$$

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2 \qquad G = 80769 \text{ N/mm}^2 \qquad f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

Geometrijske karakteristike:

$$A = 2193,75 \text{ mm}^2 \qquad Q = 0,832$$

$$I_y = I_z = 4896731,52 \text{ mm}^4 \quad I_\eta = 1967945,46 \text{ mm}^4 \quad I_\xi = 7825517,58 \text{ mm}^4$$

$$I_t = 41132,8 \text{ mm}^4$$

$$W_{y,\text{eff}} = W_{z,\text{eff}} = 25956 \text{ mm}^3 \qquad W_{\eta,\text{eff}} = 7402,2 \text{ mm}^3 \qquad W_{\xi,\text{eff}} = 42551,3 \text{ mm}^3$$

$$W_{\xi,\text{el}} = 73776,9 \text{ mm}^3 \qquad e_{N\xi} = 50,38 \text{ mm}$$

#### Spoj preko enega vijaka (členkasta povezava):

Za členkasto povezane kotnike (spoji izvedeni z enim vijakom) je potrebno uporabiti interakcijsko enačbo. Preverjena je nevarnost uklona in porušitve zaradi delovanja upogibnega momenta.

Upogibni uklon:

$$\lambda_c = 0,533 \quad F_{cr,F} = 177,1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Torzijski in torzijsko-upogibni uklon

$$\lambda_e = 1,065 \quad F_{cr,T,TF} = 131,7 \text{ N/mm}^2$$

Za razmerja  $b/t \leq 20$  se upošteva samo upogibni uklon, zato je:

$$F_{cr} = F_{cr,F} = 177,1 \text{ in } P_n = 388,5 \text{ kN}$$

Kontrola interakcije:

$$\frac{P_u}{P_n} + \frac{8}{9} \frac{M_{u\xi}}{M_{n\xi}} \leq 1,0$$

Kontrola plastifikacije prereza:

$$M_n = 26006,4 \text{ kNmm}$$

Kontrola bočne zvrnitve:

$$M_e = 81506,3 \text{ kNmm} \quad M_n = 23932,5 \text{ kNmm}$$

Kontrola lokalnega uklona:

$$M_n = 22179 \text{ kNmm}$$

$$M_n = \min \begin{cases} 26006357,3 \\ 23932512,3 \text{ Nmm} \\ 22179008,3 \end{cases} \quad M_n = 22179 \text{ kNmm}$$

$$P_u \leq \frac{1}{\frac{1}{388,5} + \frac{8}{9} * \frac{50,38}{22179}} = 217,7 \text{ kN}$$

**Spoj preko dveh vijakov (toga povezava):**

Pri kotnikih, ki se v spoju kontinuirno nadaljujejo ali je spoj izveden z vsaj dvema vijakoma, je uklonska nosilnost določena podobno kot v standardu SIST EN 1993-3-1. Relativna vitkost je določena na podlagi sistemske dolžine, kot je predstavljeno z enačbo (98) oziroma (99). Geometrijske in materialne karakteristike ostajajo nespremenjene.

Upogibni uklon

$$\frac{KL}{r} = 95,81 \quad \lambda_c = 1,02 \quad F_{cr,F} = 136,1 \text{ N/mm}^2$$

Torzijski in torzijsko-upogibni uklon

$$r_x = 59,726 \text{ mm} \quad F_{ex} = 3285,97 \text{ N/mm}^2 \quad F_{ez} = 212,27 \text{ N/mm}^2$$

$$F_e = 207,06 \text{ N/mm}^2 \quad \lambda_e = 1,065 \quad F_{cr,T,TF} = 131,7 \text{ N/mm}^2$$

Za razmerja  $b/t \leq 20$  se upošteva samo upogibni uklon, zato je:

$$F_{cr} = 136,1 \text{ N/mm}^2$$

$$P_u = 298,6 \text{ kN}$$

## 4.2 Primerjava standardov

Na podlagi primerjav rezultatov v spodnjih preglednicah lahko za ekscentrično obremenjen in podprt kotnik z razmerjem  $b/t = 20$ , sklepamo o velikem odstopanju uklonske nosilnosti po posameznih standardih. Vrednosti izračunane po standardu SIST EN 1993-1-1 so primerjane z namenom prikaza odstopanja, ki je posledica neustreznega postopka z uporabo interakcijske enačbe.

Preglednica 14: Primerjava rezultatov za kotnik z razmerjem  $b/t=20$  pri povezavi z enim vijakom

Standard	EC3-1-1*	EC3-3-1	EC9-1-1	AISC
Uklonska nosilnost [kN]	63,9	230,4	144,1	217,7

\*Pri izračunu je uporabljena interakcijska enačba, ki ne velja za enojno simetrične profile.

Preglednica 15: Primerjava rezultatov za kotnik z razmerjem  $b/t=20$  pri povezavi z dvema vijakoma

Standard	EC3-1-1*	EC3-3-1	EC9-1-1	AISC
Uklonska nosilnost [kN]	63,9	313,6	144,1	298,6

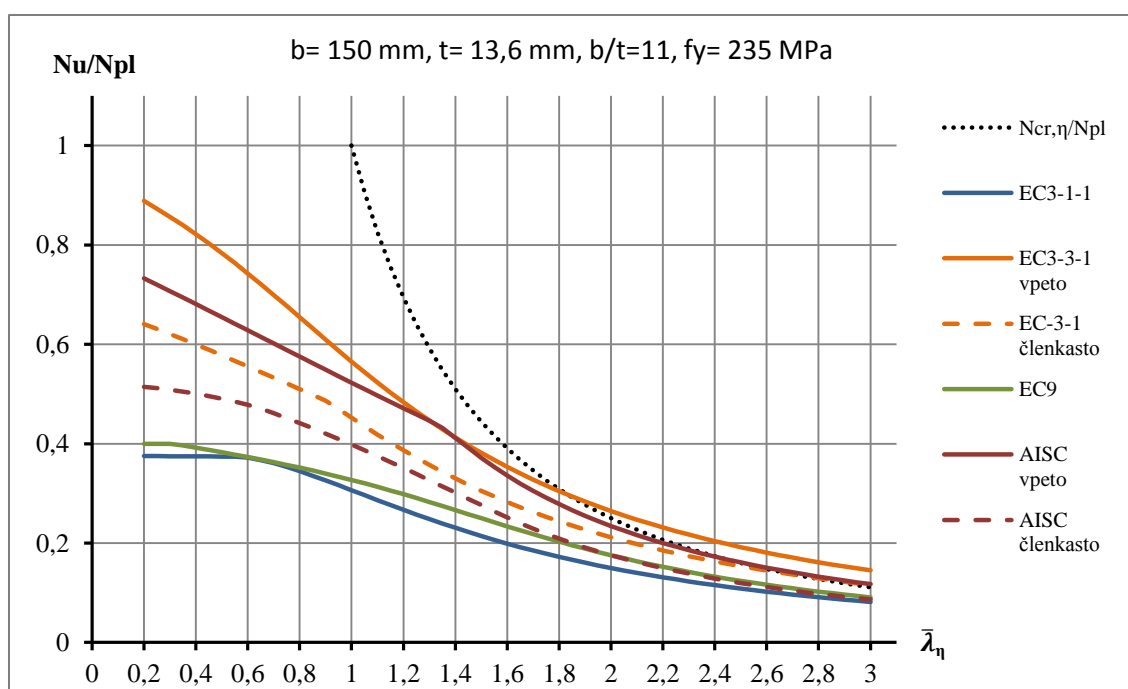
\*Pri izračunu je uporabljena interakcijska enačba, ki ne velja za enojno simetrične profile.

Na grafikonih 31-36 so predstavljeni rezultati analitičnih izračunov po standardih SIST EN in AISC. Glede na poenostavitve pri izračunu uklonske nosilnosti ekscentrično obremenjenih kotnih profilov, ki jih podajajo posamezni standardi in zgoraj prikazane primerjave, je pričakovati večja odstopanja. Pri tem je potrebno poudariti, da je izračun po SIST EN 1993, del 1-1, samo informativen, saj je kontrola interakcije dvoosnega upogiba z osno silo v osnovi namenjena preverjanju dvojno simetričnih prerezov. Ameriški standard za kotnike, ki so povezani preko spoja z dvema vijakoma predvideva upogibni uklon okoli šibke osi, standard SIST EN 1993-3-1 pa minimalno vrednost upogibnega uklona okoli geometrijskih in glavnih osi, kar je še eden od razlogov za precejšnje razlike med rezultati.

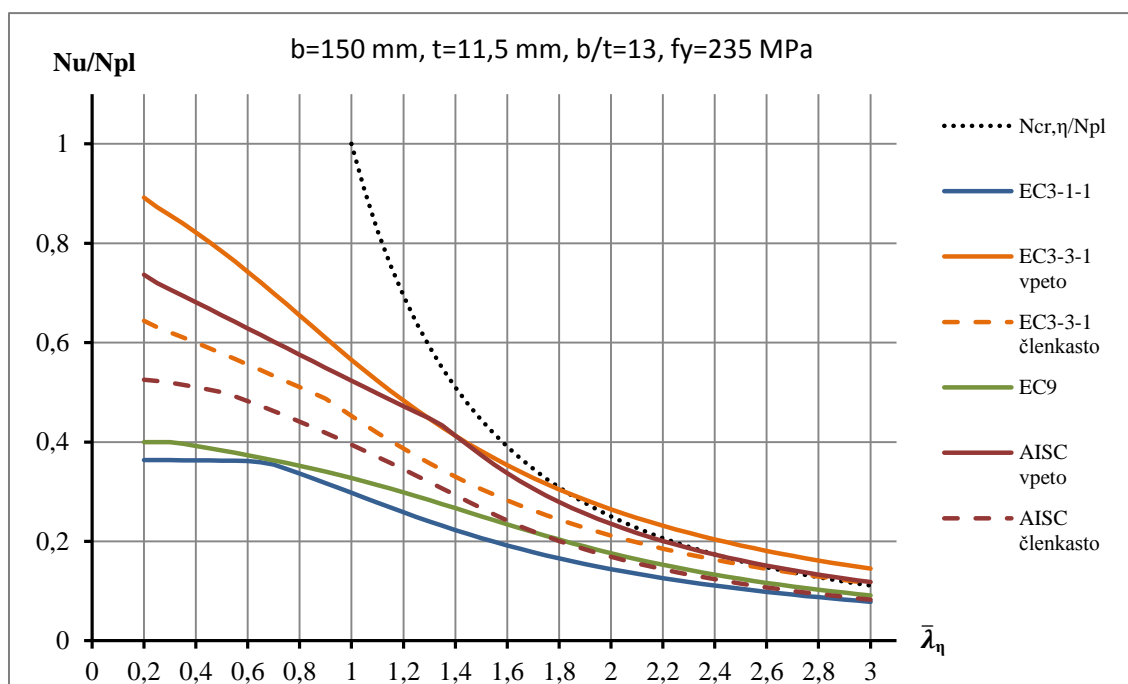
Če v primerjavo ni zajet standard SIST EN 1993 del 1-1, je očitno, da je standard SIST EN 1999 v primerjavi z ostalima dvema zelo konservativen. Kljub velikim razlikam v območju togih elementov, so razlike za zelo vitke elemente med standardi bistveno manjše, vsi pa se približajo upogibu okoli šibke osi prereza. Izjema je standard SIST EN 1999, ki za obojestransko vpete zelo vitke elemente z vitkim prečnim prerezom podaja zelo konservativne rezultate. Standarda SIST EN 1993-3-1 in AISC podajata podobne rezultate, ki v območju majhnih relativnih vitkosti zelo odstopajo od rezultatov ostalih standardov. Razlog je v odsotnosti torzijskega in torzijsko-upogibnega uklona. Pri standardu AISC se za elemente z razmerjem  $b/t = 22$  kaže vpliv upoštevanja torzijskega in torzijsko upogibnega uklona, ki zniža uklonsko nosilnost v območju majhne relativne vitkosti. V primerjavi z

rezultati numeričnih simulacij, ki so predstavljeni v nadaljevanju, je razvidno, kateri standard najbolj sledi numeričnemu izračunu odziva ekscentrično obremenjenih kotnih profilov.

Tako kot pri centrično obremenjenih elementih, so primerjane vrednosti uklonske nosilnosti glede na relativno vitkost okoli šibke osi preseza.

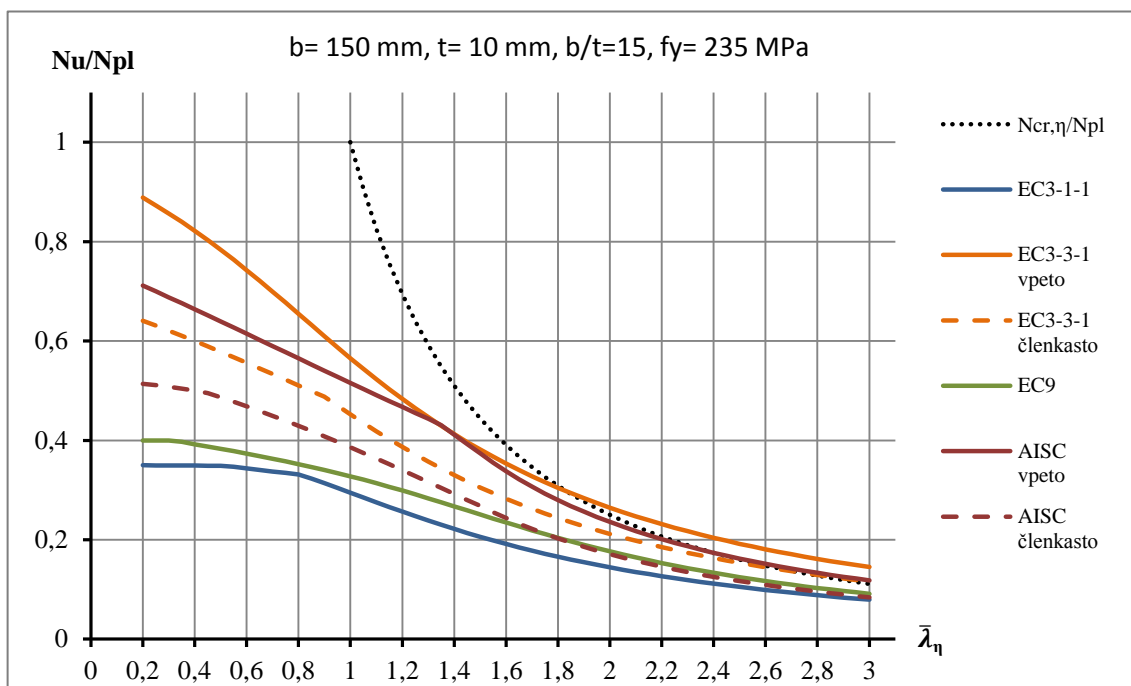


Grafikon 31: Primerjava standardov pri b/t=11, ekscentrična obremenitev

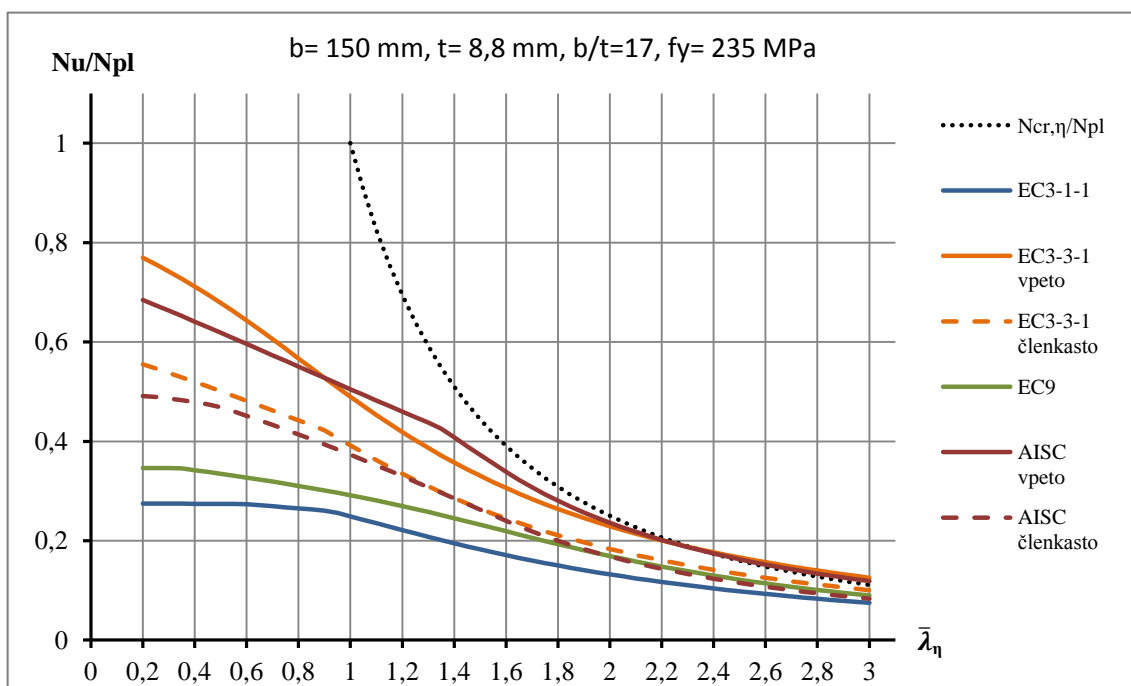


Grafikon 32: Primerjava standardov pri b/t=13, ekscentrična obremenitev

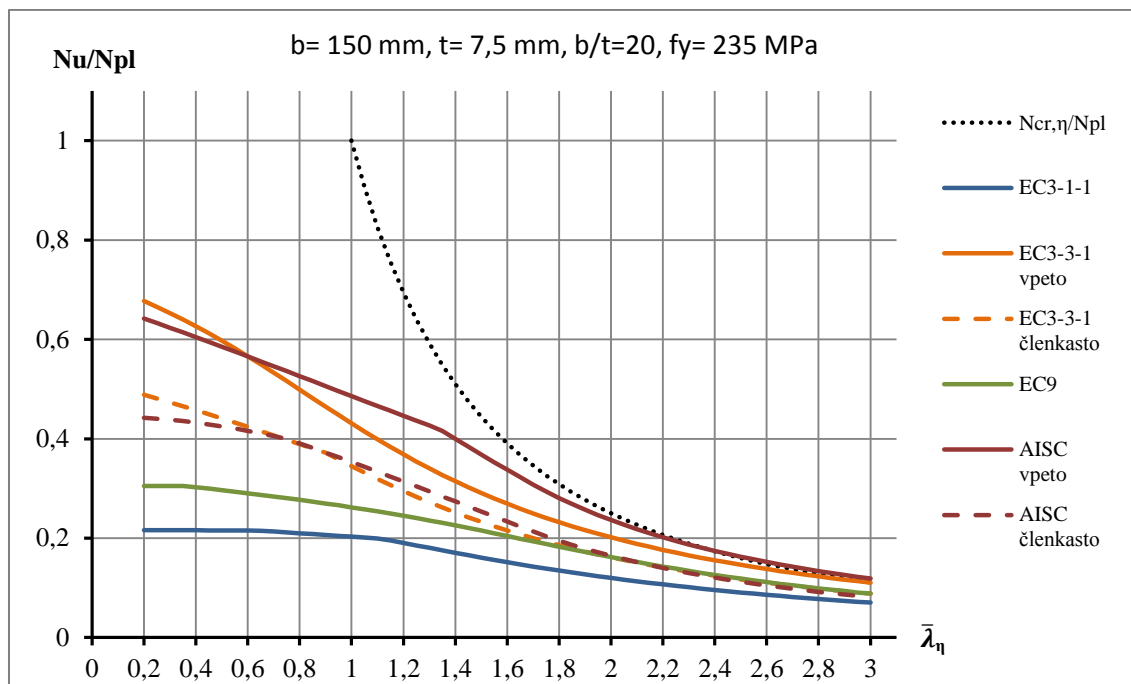
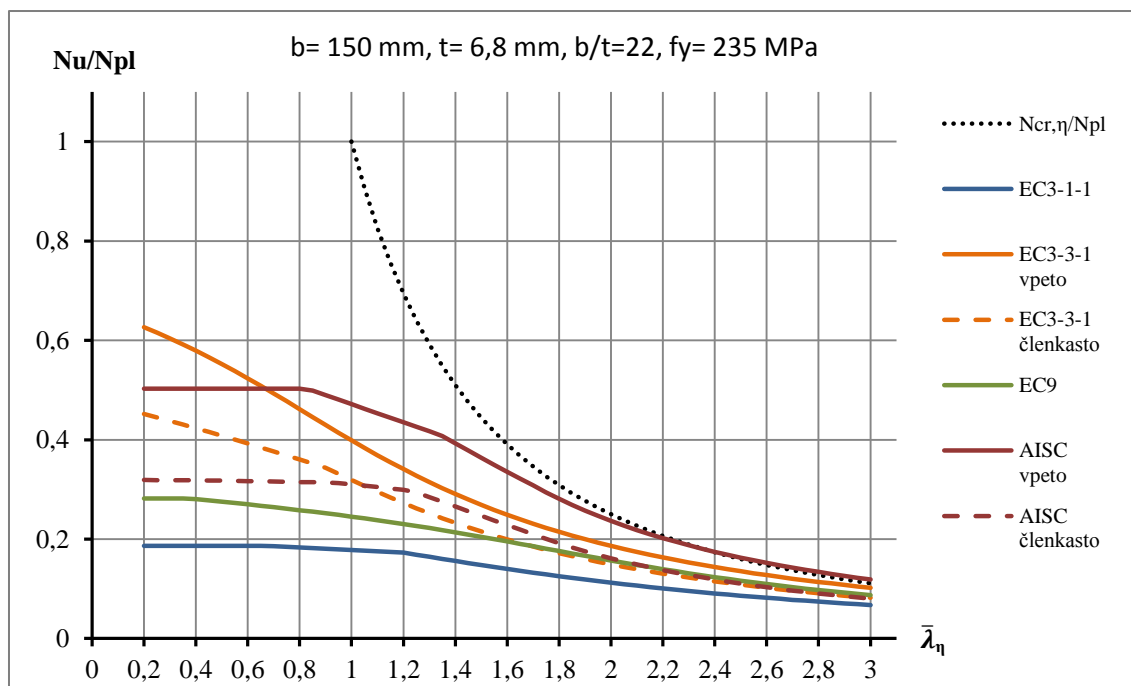




Grafikon 33: Primerjava standardov pri  $b/t=15$ , ekscentrična obremenitev



Grafikon 34: Primerjava standardov pri  $b/t=17$ , ekscentrična obremenitev

Grafikon 35: Primerjava standardov pri  $b/t=20$ , ekscentrična obremenitevGrafikon 36: Primerjava standardov pri  $b/t=22$ , ekscentrična obremenitev

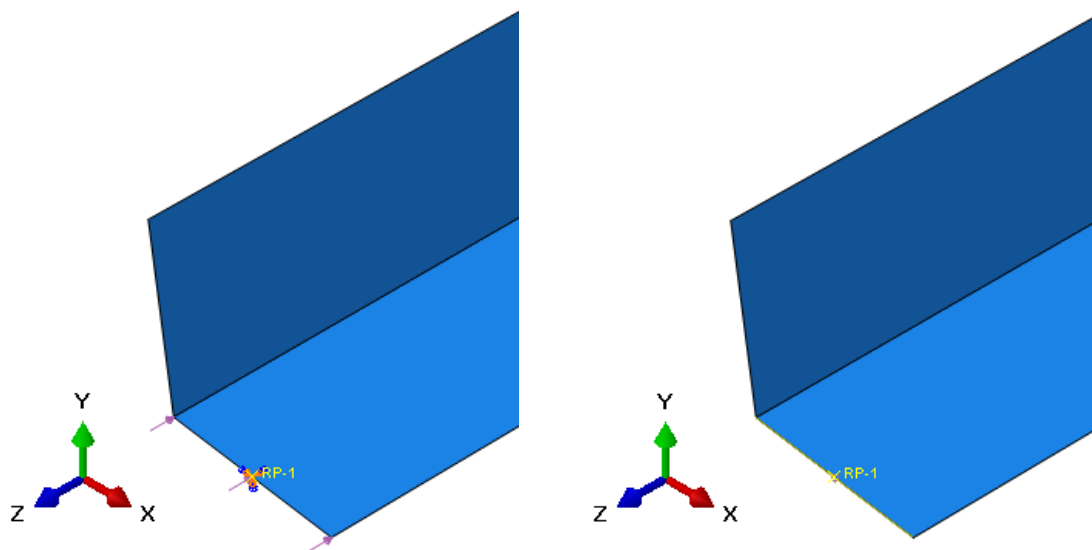
Iz primerjave rezultatov na zgornjih grafikonih je razvidna manjša nosilnost kotnikov, pri katerih je spoj izveden členkasto s samo enim vijakom. Razlog je v načinu določitve relativne vitkosti pri vpetih kotnikih, kjer je spoj izveden z vsaj dvema vijakoma. Ne glede na način povezovanja, ostaja uklonska dolžina nespremenjena. Zelo velika konservativnost standarda SIST EN 1993-1-1 je posledica

neustrezne interakcije osne sile in upogibnega momenta. Izrazit je vpliv torzijskega in torzijsko-upogibnega uklona, ki se kaže v velikem torzijskem platoju. Kljub večanju vitkosti prereza se pri velikih relativnih vitkosti uklonske nosilnosti postopoma približujejo Eulerjevi kritični uklonski sili, zato bi lahko ob ustrezni kontroli bočne zvrnitve enojno simetričnih jeklenih profilov standard podajal ustrezne rezultate. Uklonska nosilnost po standardu SIST EN 1999, ki prav tako ne razlikuje med različno povezanimi elementi, je v primerjavi s standardom SIST EN 1993-3-1 in AISC precej konservativna. Razlog je v konservativni redukciji celotne upogibne uklonske nosilnosti centrično obremenjenih kotnikov in dejstvu, da standard obravnava konstrukcije iz aluminijevih zlitin za katere so v osnovi predvidene drugačne uklonske krivulje.

#### **4.3 Numerične simulacije obnašanja ekscentrično obremenjenih vitkih kotnikov**

Podobno kot pri centrično obremenjenih kotnikih, je bilo za numerično simulacijo obnašanja ekscentrično obremenjenih enakokrakih kotnikov z dolžino kraka 150 milimetrov uporabljeno programsko okolje Abaqus. Pričakovan je drugačen odziv ekscentrično obremenjenih kotnikov, zato je bil v skladu z raziskavami tujih avtorjev izdelan nov numerični model. Pri izbiri vrste končnih elementov in postopka modeliranja numeričnih modelov so bila upoštevana spoznanja Sinurja in sod. (2013) ter Suna in Butterwortha (2013). Uporabljene so bile enake materialne lastnosti kot pri centrično obremenjenih kotnikih, prav tako tudi način podpiranja, le da je bil v tem primeru podprt le en krak kotnika.

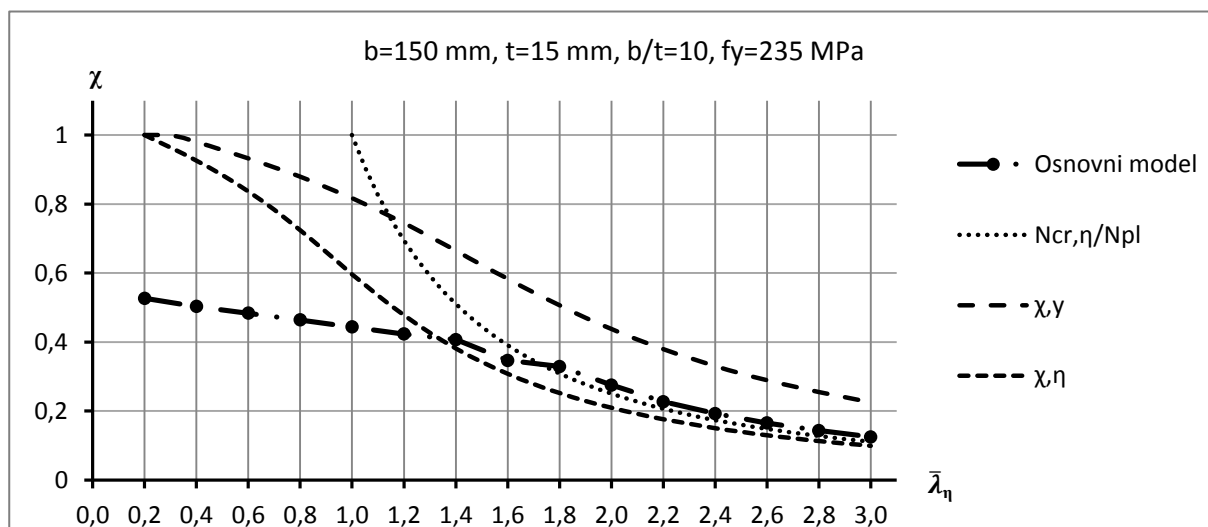
Nepomične in toge podpore so bile postavljene v težišču obremenjenega kraka, zaradi zagotavljanja ravnotežja, pa je bila na sredini razpona elementa postavljena podpora, ki je preprečevala samo pomike vzdolž osi elementa. Podobno kot pri centrično obremenjenih elementih, so bile podpore z obremenjenim krakom povezane preko vezi. Preprečevale so deformacije v ravnini obremenjenega kraka, globalno pa so delovale kot členkaste podpore. V drugem primeru so bile vezi definirane tako, da so preprečevale rotacije okoli osi pravokotno na obremenjen krak. Dopusčale so pomike v smeri osi kotnika, s čimer so zajeti robni pogoji pri spojih z dvema vijakoma. Linijska obtežba je bila določena na nedeformiranem robu kraka. Sun in Butterworth (2013) sta v svojih numeričnih modelih namesto vezi uporabila togi linijski element, preko katerega je delovala točkovna sila. V obeh primerih gre za poenostavitev robnega pogoja, kjer se točkovno silo, ki deluje v realnosti, v numeričnem modelu predstavi kot linijsko obtežbo, ali pa se s pomožnimi elementi njen vpliv razširi na celotno širino obremenjenega kraka. Na sliki 18 je prikazan način podpiranja in obremenjevanja posameznih krakov kotnika.



Slika 18: Slika podpore in obtežbe (levo) in vezi (desno)

Podobno kot pri centrično obremenjenih elementih imajo začetne nepopolnosti velik vpliv na uklonsko nosilnost. Raziskan je bil vpliv velikosti, oblike in smeri začetnih nepopolnosti na elementu s kompaktnim prečnim prerezom ( $b/t=10$ ). Sun in Butterworth (2013) sta ugotovila očitne razlike v postkritičnem obnašanju kratkih elementov, medtem ko se pri daljših elementih vpliv začetnih nepopolnosti zmanjšuje. Vpliv zaostalih napetosti na uklonsko nosilnost je glede na ugotovitve Elgaalya in sod. (1991) zanemarljivo majhen, zato le te niso bile upoštevane v analizi.

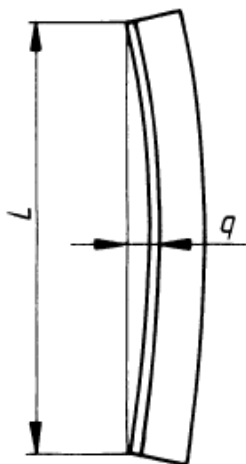
Na tako imenovanem osnovnem modelu, pri katere so vezi delovale kot členkaste podpore, je bila izvedena analiza uklonske nosilnosti brez začetnih nepopolnosti in zaostalih napetosti ( $\phi_0=0$  in  $e_0=0$ ). Rezultati so služili za primerjavo vplivov različnih začetnih nepopolnosti in določanju razlik v uklonski nosilnosti zaradi različno velikih posameznih začetnih nepopolnosti.



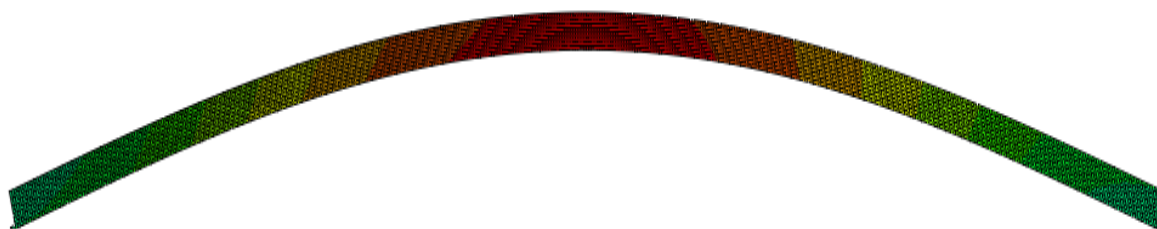
Grafikon 37: Odziv osnovnega modela v primerjavi z različnimi uklonskimi nosilnostmi

#### 4.3.1 Začetne nepopolnosti v obliki sinusoide z enim polvalom

Pri dolgih elementih je bila izvedena analiza vpliva velikosti začetnih nepopolnosti v obliki sinusoide z enim polvalom. Skladno s standardom EN 10056-2 o tolerancah pri obliki in dimenzijah, ki za kotnike z dolžino kraka 150 milimetrov globalno odstopanje od ravnosti elementa omejuje z vrednostjo  $L/250$ , so bile izbrane tipične vrednosti začetne upogibne nepopolnosti.

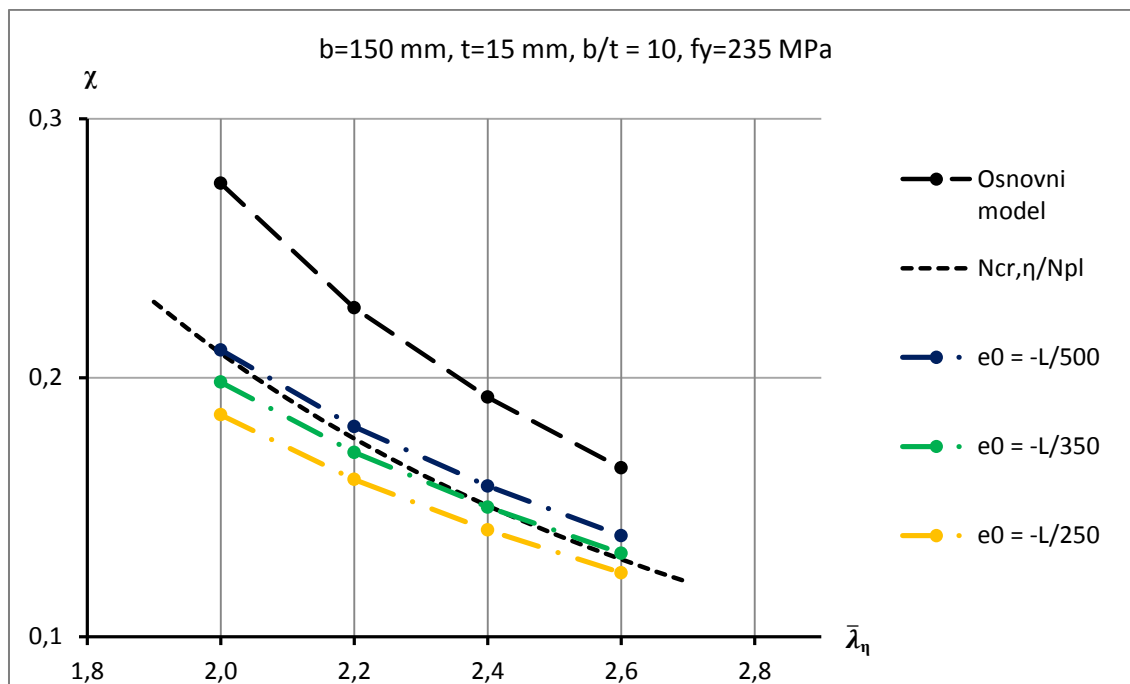


Slika 19: Tolerance pri izdelavi (EN 10056-2, Preglednica 1)



Slika 20: Uklonska oblika v obliki sinusoide z enim polvalom

Oblika sinusoide z enim polvalom je bila določena s pomočjo uklonske analize elementov. Podobno kot pri centrično obremenjenih elementih je pomembna smer pomika prečnega prereza. Vpliv velikosti začetne nepopolnosti v obliki sinusoide z enim polvalom je bil preverjen za pozitivno in negativno smer pomika prečnega prereza, kot je določeno na sliki 15. Izkazalo se je, da so merodajne uklonske nosilnosti, pri katerih je bila upoštevana negativna smer začetnih nepopolnosti. Na grafikonu 38 je prikazan vpliv velikosti začetnih nepopolnosti na vrednosti uklonske nosilnosti. Skladno s standardom o tolerancah pri obliki in dimenzijah je kot največja izbrana vrednost odstopanja od ravnosti elementa v velikosti  $L/250$ .

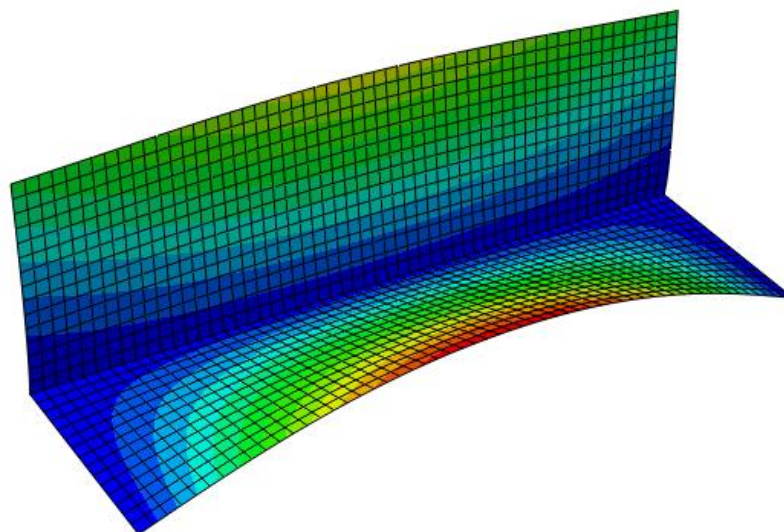


Grafikon 38: Vpliv nepopolnosti v obliki sinusoide z enim polvalom na uklonsko nosilnost

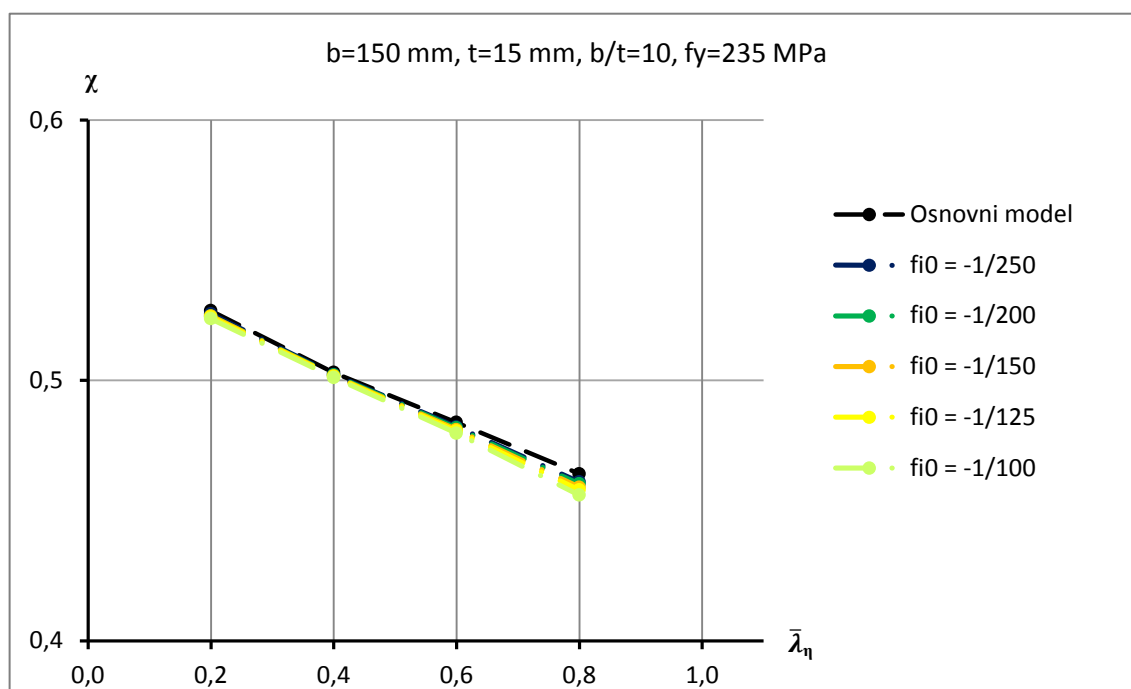
Začetne nepopolnosti v obliki sinusoide z enim polvalom imajo glede na osnovni model precejšen vpliv na uklonsko nosilnost, zato jih je potrebno upoštevati v parametrični študiji odziva. Razlike v uklonski nosilnosti elementa se z večanjem relativne vitkosti, kljub različnim vrednostim začetnih nepopolnosti, zmanjšujejo in se približajo vrednostim uklonske nosilnosti okoli šibke osi elementa. Rezultat je skladen s predhodnimi ugotovitvami o obnašanju členkasto podprtih elementov.

#### 4.3.2 Začetne nepopolnosti v obliki torzijskega zasuka

Vpliv začetne nepopolnosti v obliki torzijskega zasuka, ki je pri kratkih elementih tudi glavna komponenta prve uklonske oblike, je bil določen pri različnih vrednostih zasuka. Standard EN 10056-2:1993 o tolerancah pri obliki in dimenzijah, omejuje odstopanje od pravokotnosti krakov. Podano toleranco lahko uporabimo kot omejitev velikosti začetnih torzijskih nepopolnosti. Omejitev je določena z velikostjo pomika kraka, zasuk  $\phi_0=1/100$  pa glede na karakteristike izbranega prereza kotnika predstavlja največjo dovoljeno toleranco. Preverjene so bile tudi ostale vrednosti torzijskega zasuka, rezultati so prikazani na spodnjem grafikonu.



Slika 21: Torzijska uklonska oblika kotnika

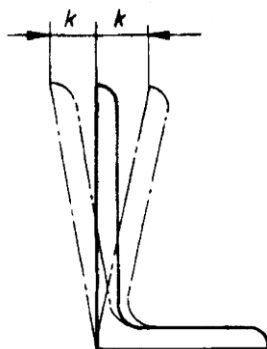


Grafikon 39: Vpliv torzijske nepopolnosti na uklonsko nosilnost

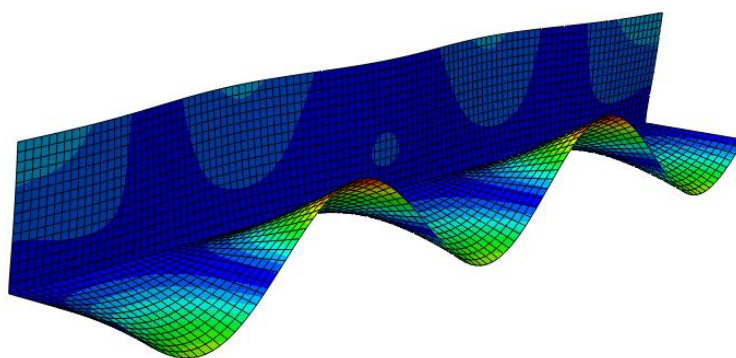
Zaradi ekscentričnosti obtežbe in podpor je bila izvedena analiza za pozitivno in negativno smer torzijskega zasuka. Glede na sliko 16 ima negativni predznak zasuk v nasprotni smeri urinega kazalca. Iz grafikona 39, na katerem so prikazane vrednosti uklonske nosilnosti ob upoštevanju negativne smeri zasuka, je razvidno, da začetne torzijske nepopolnosti praktično ne vplivajo na uklonsko nosilnost kratkih elementov. Vpliv velikost začetne torzijske nepopolnosti se prav tako ne spreminja v odvisnosti od dolžine elementa, saj za obravnavano območje razlika uklonskih nosilnosti glede na osnovni model nikoli ne preseže 2%.

### 4.3.3 Začetne nepopolnosti v obliki lokalnih nepopolnosti

Vpliv lokalnih nepopolnosti v obliki polvalov na obremenjenem kraku je bil analiziran na podlagi ugotovitev Suna in Butterwortha (2013), ki sta jih v svojem numeričnem modelu uporabila kot edine začetne nepopolnosti. Pri kratkih elementih se lokalne nepopolnosti pri povečevanju obtežbe povečujejo, dokler predvsem zaradi globalnega torzijskega uklona ne pride do izgube nosilnosti elementa. Zaradi primerjave z rezultati Suna in Butterwortha (2013) je bila izbrana sinusoidna oblika s petimi polvali na obremenjenem kraku. Preverjene so bile lokalne nepopolnosti v velikosti  $0,2t$ ,  $0,3t$ ,  $0,4t$  ter  $0,5t$ , kar pri debelini pločevine 15 milimetrov predstavlja pomike kraka za 3, 4,5, 6 in 7,5 mm. Standard EN 10056-2:1993 o tolerancah pri obliki in dimenzijah za kotnike z dolžino kraka 150 milimetrov omejuje odstopanje od pravokotnosti krakov  $k$  v velikosti 1,5 milimetra, kar pri izbranem kotniku predstavlja  $0,1t$  in zasuk velikosti  $\phi_0=1/100$ .

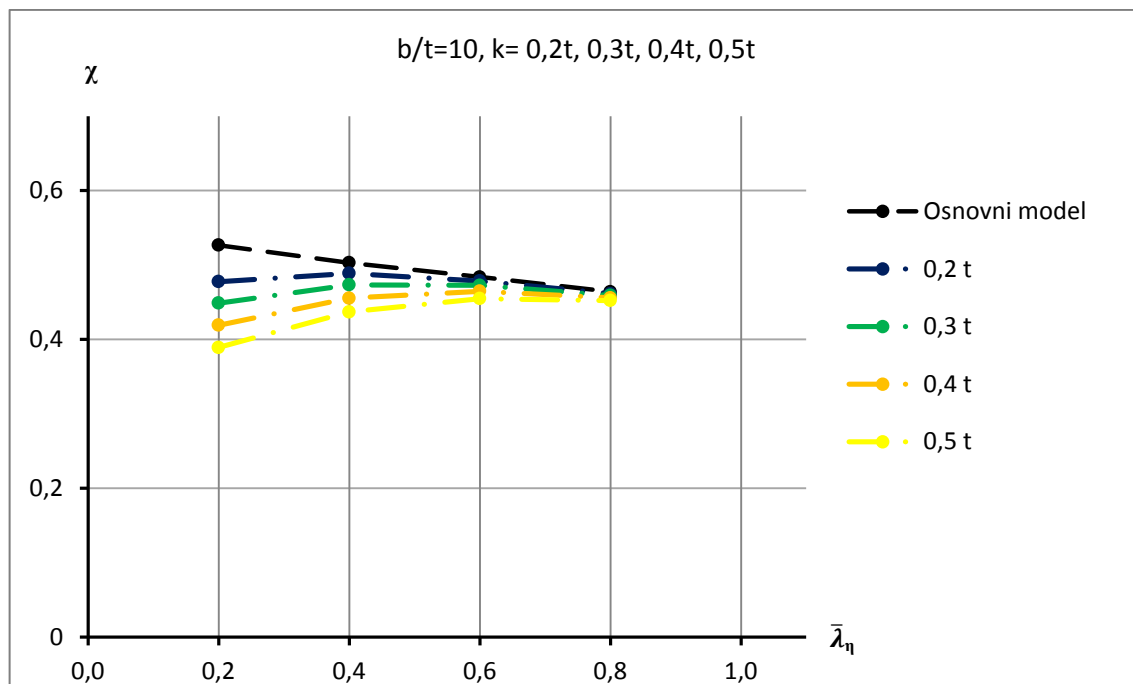


Slika 22: Tolerance pri izdelavi (EN 10056-2, Preglednica 1)



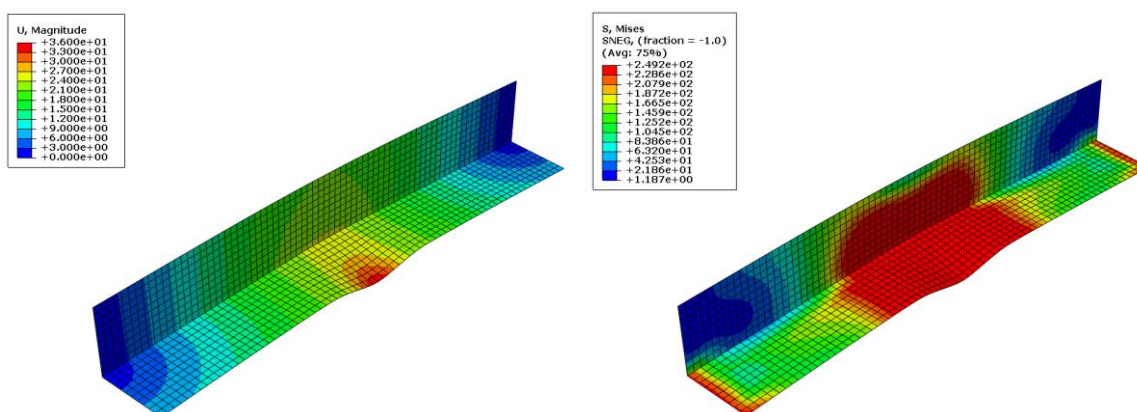
Slika 23: Lokalne nepopolnosti na obremenjenem kraku





Grafikon 40: Vpliv lokalnih nepopolnosti na uklonsko nosilnost

Pri zelo kratkih elementih začetne nepopolnosti povzročijo lokalno izbočenje pločevin in ne globalnega uklona elementa, kar se pozna pri uklonski nosilnosti. Element se ukloni upogibno okoli osi pravokotno na pritrjeni krak, lokalna nepopolnost na sredini razpona obremenjenega kraka pa vodi v lokalno izbočenje pločevine obremenjenega kraka. Podoben odziv numeričnega modela z enostavnimi podporami (podpore s preprečenimi pomiki in prostimi zasuki) sta predstavila tudi Sun in Butterworth (2013).



Slika 24: Velikost pomikov (levo) in razporeditev napetosti (desno) ob lokalnem izbočenju

Z večanjem relativne vitkosti postaja vpliv lokalnega izbočenja pločevine manjši, saj začne, odvisno od načina podpiranja, prevladovati torzijsko-upogibni in upogibni uklon okoli osi pritrjenega kraka in šibke osi elementa.

#### 4.3.4 Začetne nepopolnosti v obliki prve uklonske oblike

Pri stabilnostni analizi tlačno obremenjenih elementov predstavlja prva uklonska oblika deformacijsko obliko, v katero se bo ob nastopu najmanjše uklonske sile pri danih robnih pogojih uklonil element. Izbira prve uklonske oblike z ustrežno amplitudo kot začetne nepopolnosti, je torej smiselna in najenostavnejša izbira.

#### 4.3.5 Izbira začetnih nepopolnosti v numerični analizi

Ker magistrsko delo v tem delu obravnava stabilnost ekscentrično podprtih in obremenjenih kotnikov, je bila v numerični analizi kot začetna nepopolnost uporabljena prva uklonska oblika, ki je bila določena s pomočjo uklonske analize. Kot je že bilo predstavljeno, pri kratkih elementih v prvi uklonski obliki praviloma prevladuje torzijski zasuk, pri daljših pa se element pretežno deformira v obliki sinusoide z enim polvalom. Z razstavitvijo prve uklonske oblike na osnovne deformacijske oblike (lokalne nepopolnosti, torzijski zasuk in upogib v obliki sinusoide), lahko določimo, kolikšen delež prispeva posamezna deformacijska oblika in ob upoštevanju kombinacije normiranih amplitud različnih oblik nepopolnosti, skladno s standardom SIST EN 1993-1-5 in podobno kot v preglednici 8, omejimo kombinacije začetnih nepopolnosti na velikost dovoljenih toleranc. V nelinearni analizi uklonske nosilnosti je bila kot začetna nepopolnost uporabljena maksimalna vrednost nepopolnosti oziroma njihovih kombinacij

Odziva ekscentrično obremenjenih kotnikov ne moremo primerjati z uklonskimi krivuljami, saj standardi podajajo samo približne, ali pa zelo konservativne rešitve uklonske nosilnosti. Z namenom potrditve ustreznosti numeričnega modela in uporabe začetne nepopolnosti, je bila narejena primerjava vrednosti uklonske nosilnosti različno dolgega enakokrakega kotnika z dimenzijami prečnega prereza 90x90x6 milimetrov z rezultati numeričnih simulacij Suna in Butterwortha (2013). V numeričnih modelih so bile uporabljene vrednosti materialnih karakteristik, ki jih navajata avtorja v svojem članku in so prikazane v preglednici spodaj.

Preglednica 16: Materialne karakteristike

Elastični modul E	200000 MPa
Koeficient prečne kontrakcije $\nu$	0,3
Napetost tečenja $f_y$	341 MPa

V plastičnem področju je bila zaradi numerične stabilnosti upoštevana nominalna utrditev materiala v velikosti  $E/10000$ .

V spodnji preglednici so prikazani rezultati uklonske nosilnosti, ki sta jih z uporabo svojega numeričnega modela izračunala Sun in Butterworth (2013) in rezultati izračunani z uporabo numeričnega modela, ki je bil izdelan v sklopu magistrskega dela.

Preglednica 17: Primerjava rezultatov različnih numeričnih modelov

Dolžina elementa [mm]	Uklonska nosilnost [kN]	
	Sun in Butterworth / Numerični model-vpeto	Sun in Butterworth / Numerični model-členkasto
890	184,4 / 184,4	159,8 / 156,3
1298	170,9 / 172,6	149,5 / 147,2
1704	150,1 / 149,8	133 / 146,3*
2515	99,8 / 100,6	92,4 / 94,9

\*Vrednost je bila zaradi težav s stabilnostjo rezultatov določena ob upoštevanju negativne smeri začetnih nepopolnosti, pri katerih so vrednosti uklonske nosilnosti višje kot pri pozitivni smeri.

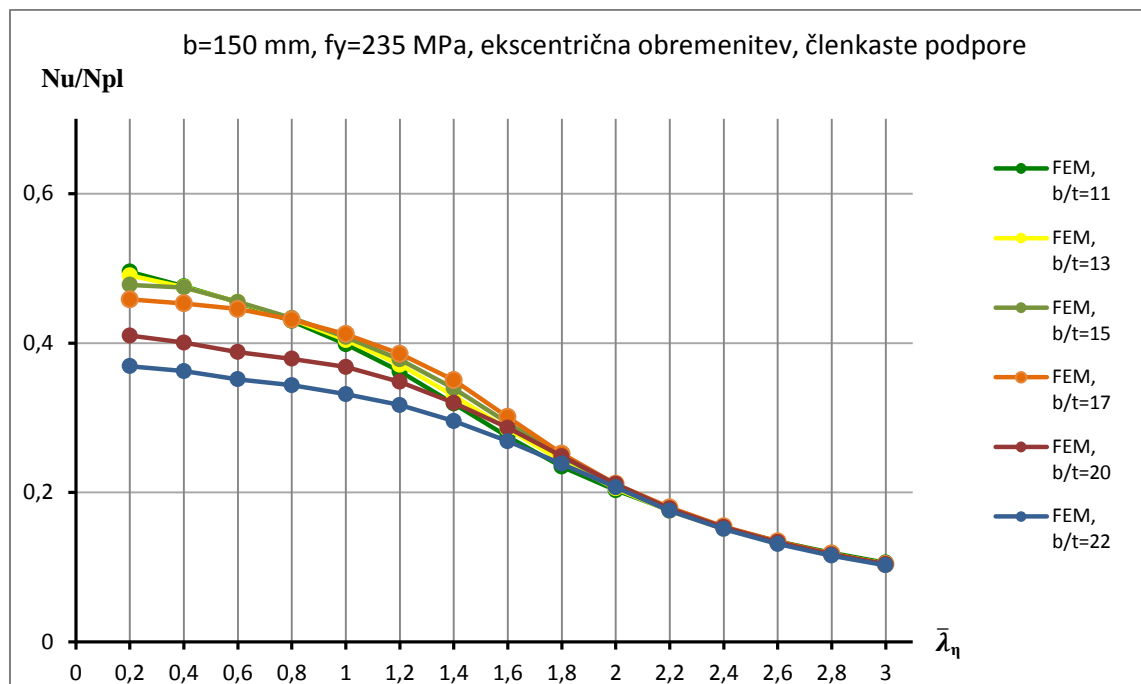
Iz primerjave numeričnih rezultatov, ki so prikazani v zgornji preglednici, je razvidno, da se vrednosti uklonske nosilnosti zelo dobro ujemajo. Numerični model Suna in Butterwortha (2013) je bil določen na podlagi rezultatov eksperimentov, zato je s primerjavo potrjena ustreznost, v magistrskem delu uporabljenega numeričnega modela in uporaba začetnih nepopolnosti v obliki prve uklonske oblike.

#### 4.4 Rezultati numeričnih simulacij

Numerična analiza obnašanja ekscentrično obremenjenih kotnikov je bila izvedena tako za elemente s kompaktnim prečnim prerezom, kot tudi za elemente z vitkim prečnim prerezom. Najvišja vrednost razmerja  $b/t$  je bila 22, saj se elementi z vitkejšim prerezom praktično ne pojavljajo (slika 8). Zaradi primerjave so bile izvedene analize obnašanja različno podprtih oziroma z drugimi elementi povezanih kotnikov. Spoji z enim samim vijakom, ki predstavljajo členkasto podporo in spoji z vsaj dvema vijakoma, ki predstavljajo bolj togo povezavo kotnikov s sosednjimi elementi, so bili v programskem okolju Abaqus modelirani s pomočjo vezi, ki so glede na vrsto spoja preprečevale pomike in zasuke. Rezultati numeričnih simulacij so primerjani z rezultati standardov.

##### 4.4.1 Členkasto podprti elementi (spoji z enim vijakom)

Razlike v uklonski nosilnosti med elementi z različno kompaktnimi prerezi so manjše kot pri centrično podprtih in obremenjenih elementih, kjer so se vrednosti v odvisnosti od kompaktnosti prereza zelo razlikovale. Glede na to, da je obremenjen samo en krak kotnika, ki predstavlja le polovico celotne površine prečnega prereza, je nosilnost ob izgubi stabilnosti ustrezno manjša. Pri kratkih elementih prevladuje torzijski uklon, upogibni uklon je prisoten pri srednje dolgih in dolgih elementih.



Grafikon 41: Rezultati numeričnih simulacij členkasto podprtih elementov

Uklonska nosilnost kotnika, ki je na obeh koncih s sosednjimi elementi povezan preko spoja z enim samim vijakom, je odvisna predvsem od kompaktnosti prečnega prereza oziroma razmerja  $b/t$ . Iz primerjave nosilnosti na zgornjem grafikonu je razvidno, da je oblika krivulje nosilnosti podobna za različna razmerja  $b/t$ . Nosilnost se v območju majhne relativne vitkosti elementa z večanjem vitkosti prereza ustrezno zmanjšuje, kar je posledica torzijskega in torzijsko-upogibnega uklona. V območju večje relativne vitkosti razmerje  $b/t$  nima več bistvenega vpliva, saj se vsi obravnavani kotniki uklonijo upogibno okoli šibke osi.

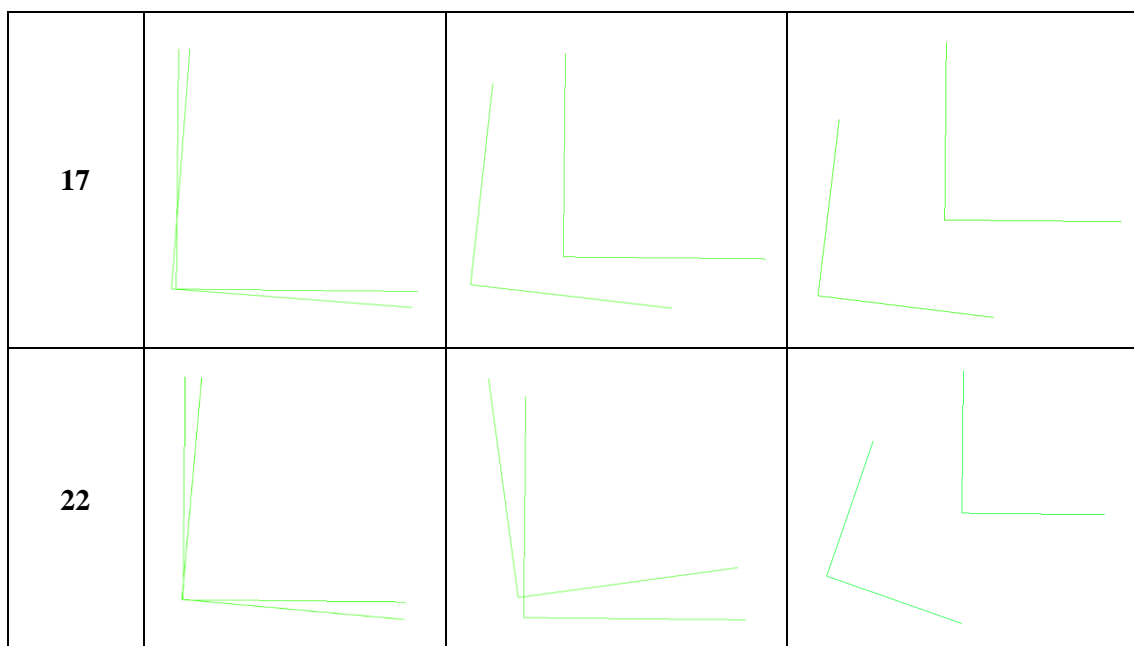
Preglednica 18 prikazuje pomik in zasuk prečnega prereza pri mejni obtežbi na sredini razpona za izbrane elemente pri tipični relativni vitkosti.

Preglednica 18: Pomik in zasuk prečnega prereza na sredini razpona členkasto podprtega elementa

$\bar{\lambda}_\eta$	0,4	1,6	2,8
$b/t$			
13			

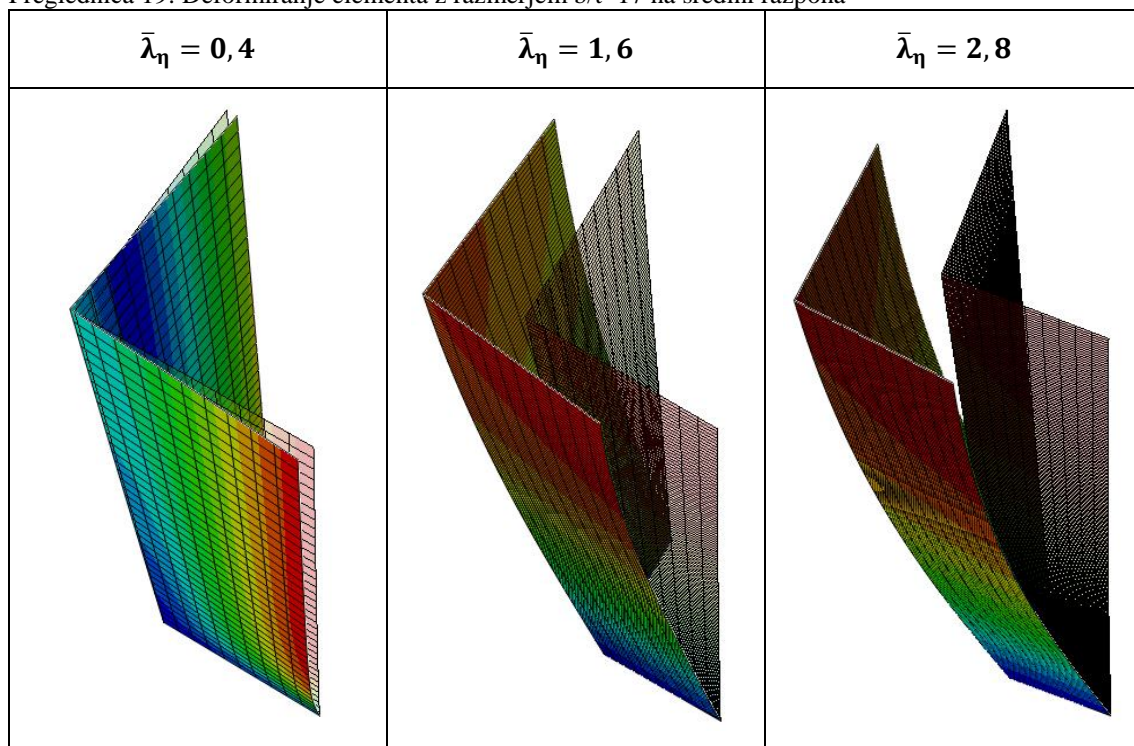
se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 18



Iz primerjave pomikov in zasukov prečnega prereza v zgornjih preglednicah je očitno, da pride pri kratkih elementih do torzijskega uklona elementa. Srednje dolgi elementi se, odvisno od kompaktnosti prereza, uklonijo torzijsko ali torzijsko-upogibno. Elementi s kompaktnejšim prečnim prerezom se praviloma uklonijo upogibno okoli šibke osi.

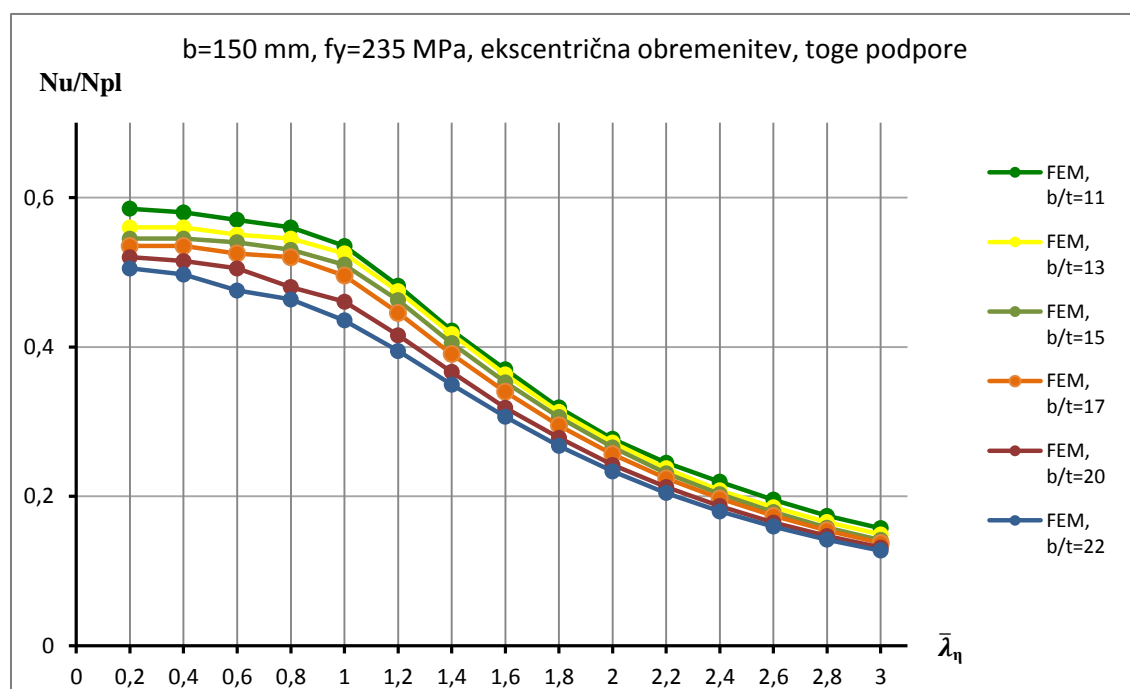
Preglednica 19: Deformiranje elementa z razmerjem  $b/t=17$  na sredini razpona



Posebnost je interakcija torzije in upogiba okoli osi pravokotno na pritrjeni krak, kar je razvidno v preglednicah 18 in 19. Dolgi elementi z zelo vitkim prečnim prerezom se zaradi povečanja območja torzijsko-upogibnega uklona uklonijo torzijsko-upogibno.

#### 4.4.2 Vpeti elementi (spoji z dvema vijakoma)

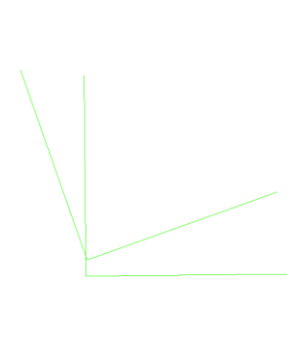
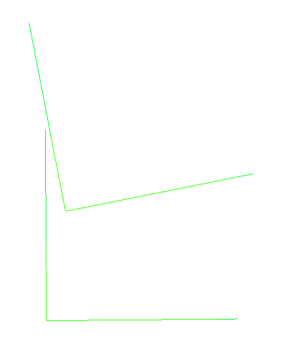
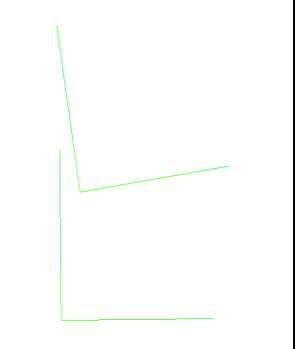
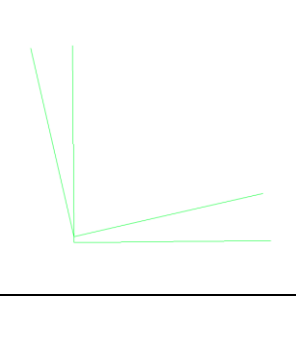

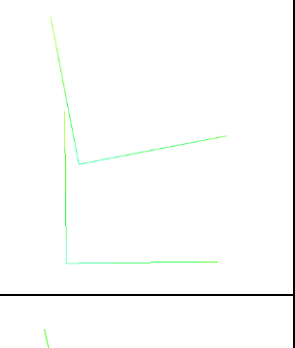
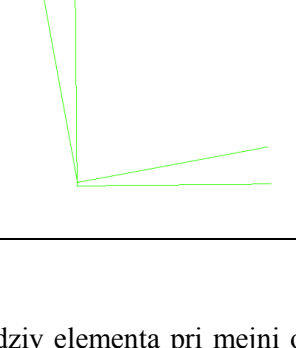
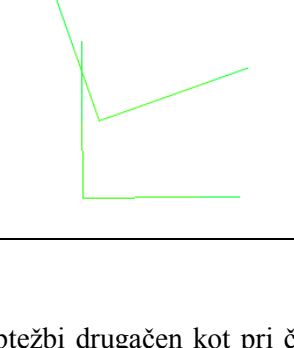
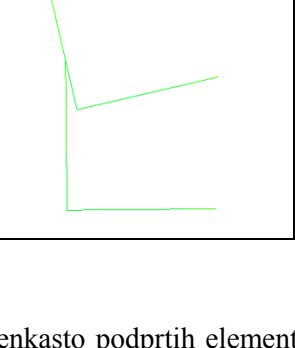
Čeprav se kotniki v spojih kontinuirno nadaljujejo, ali pa so spoji s sosednjimi elementi izvedeni z dvema ali več vijaki, je uklonska dolžina v paličju, ki se upošteva pri izračunu uklonske nosilnosti, enaka sistemski dolžini kotnika. Spoji z vsaj dvema vijakoma vplivajo na uklonsko nosilnost, zato jih standardi obravnavajo ločeno. Pri numeričnih analizah elementov s takšnimi podporami je zato pričakovana višja uklonska nosilnost, kot pri kotnikih, ki so z ostalimi elementi povezani členkasto s samo enim vijakom. Glede na to, da so pri spojih z dvema ali več vijakoma dodatno preprečeni nekateri zasuki, lahko pričakujemo tudi drugačno deformacijsko obliko.



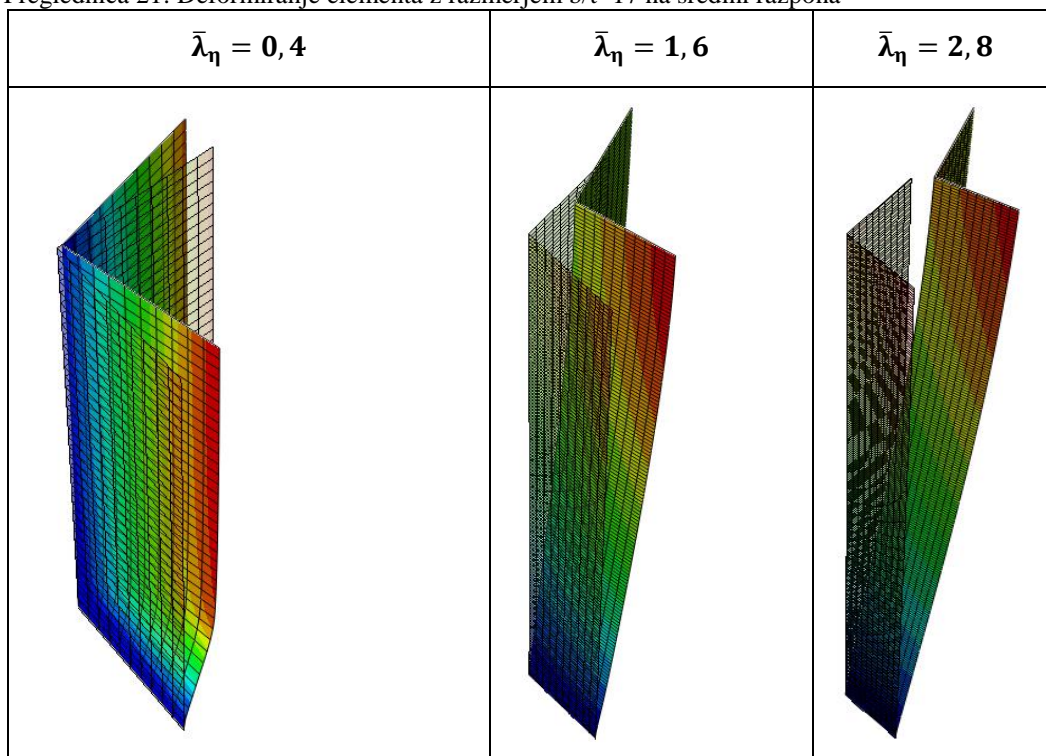
Grafikon 42: Rezultati numeričnih simulacij togo vpetih elementov

Glede na rezultate numeričnih simulacij lahko potrdimo drugačen način izgube stabilnosti, saj je na zgornjem grafikonu izrazit plato torzijskega uklona, ki mu sledi kratko območje torzijsko-upogibnega uklona, temu pa pričakovano območje upogibnega uklona. Vrednosti uklonske nosilnosti so zaradi načina podpiranja pričakovano višje.

Preglednica 20: Pomik in zasuk prečnega prereza na sredini razpona togo vpetega elementa

$\bar{\lambda}_\eta$ b/t	0,4	1,6	2,8
13			
17			
22			

Opazimo, da je odziv elementa pri mejni obtežbi drugačen kot pri členkasto podprtih elementih. Pri majhnih relativnih vitkosti še vedno prevladuje torzijski zasuk, daljši elementi se uklonijo torzijsko-upogibno. Torzijski uklon je v interakciji z upogibnim uklonom okoli osi, ki je vzporedna s pritrjenim krakom, območje je za vsa razmerja b/t glede na grafikon 41 bistveno krajše. Dolgi elementi se večinoma uklonijo upogibno okoli geometrijske osi pritrjenega kraka, kar predvideva tudi standard SIST EN 1993-3-1. Izjema so elementih z zelo vitkim prečnim presekom, pri katerih je še vedno prisoten vpliv torzijskega uklona. Uklon okoli geometrijske osi pritrjenega kraka je pričakovan, saj so zasuki izven ravnine pri spojih z dvema vijakoma preprečeni.

Preglednica 21: Deformiranje elementa z razmerjem  $b/t=17$  na sredini razpona

Iz primerjave uklonske oblike različno podprtih in povezanih elementov je očitno, da se podobno kot pri centrično podprtih in obremenjenih elementih območje torzijskega in torzijsko-upogibnega uklona povečuje z večanjem vitkosti prečnega prereza. Posebnost ekscentrično podprtih elementov je v upogibnem uklonu okoli geometrijske osi. Pri krajših kotnikih s spoji z enim vijakom prevladuje upogibni uklon okoli geometrijske osi prereza, pri daljših pa prevladuje upogibni uklon okoli šibke osi. V splošnem se kratki kotniki, ko so na ostale elemente pritrjeni z dvema vijakoma uklonijo torzijsko, dolgi pa upogibno okoli geometrijske osi pritrjenega kraka.

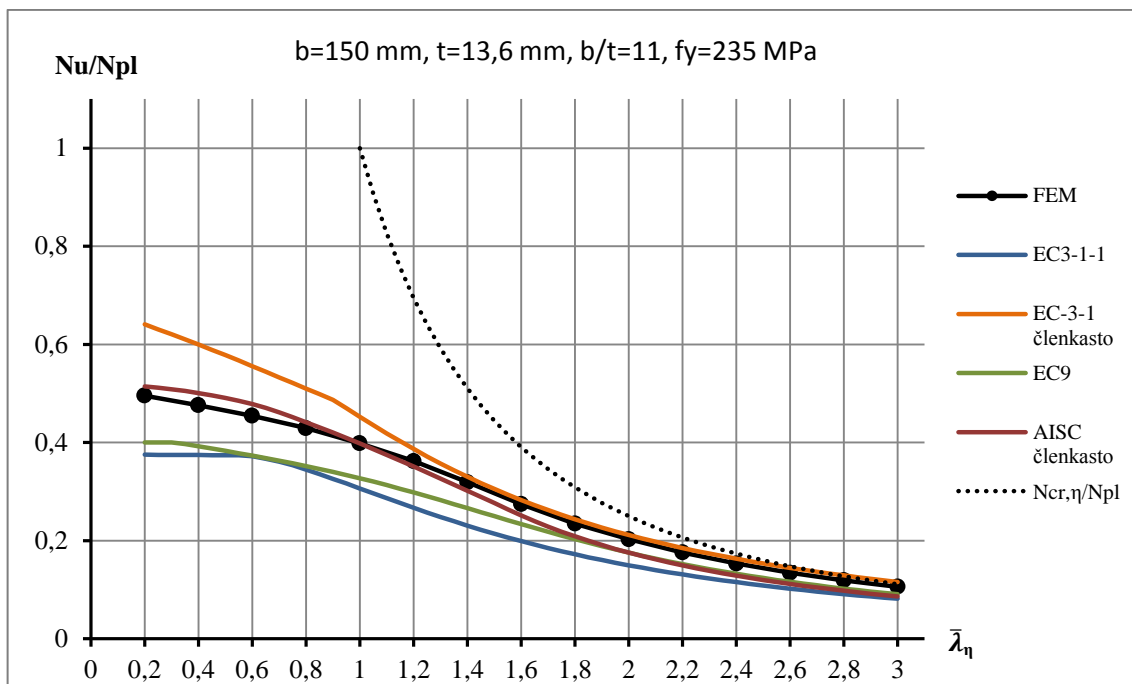
#### 4.5 Primerjava rezultatov numeričnih simulacij z rezultati standardov

Razlika v načinu upogibnega uklona je vidna na grafikonih v nadaljevanju, kjer je s tem namenom prikazana tudi normirana elastična kritična nosilnost okoli šibke osi.

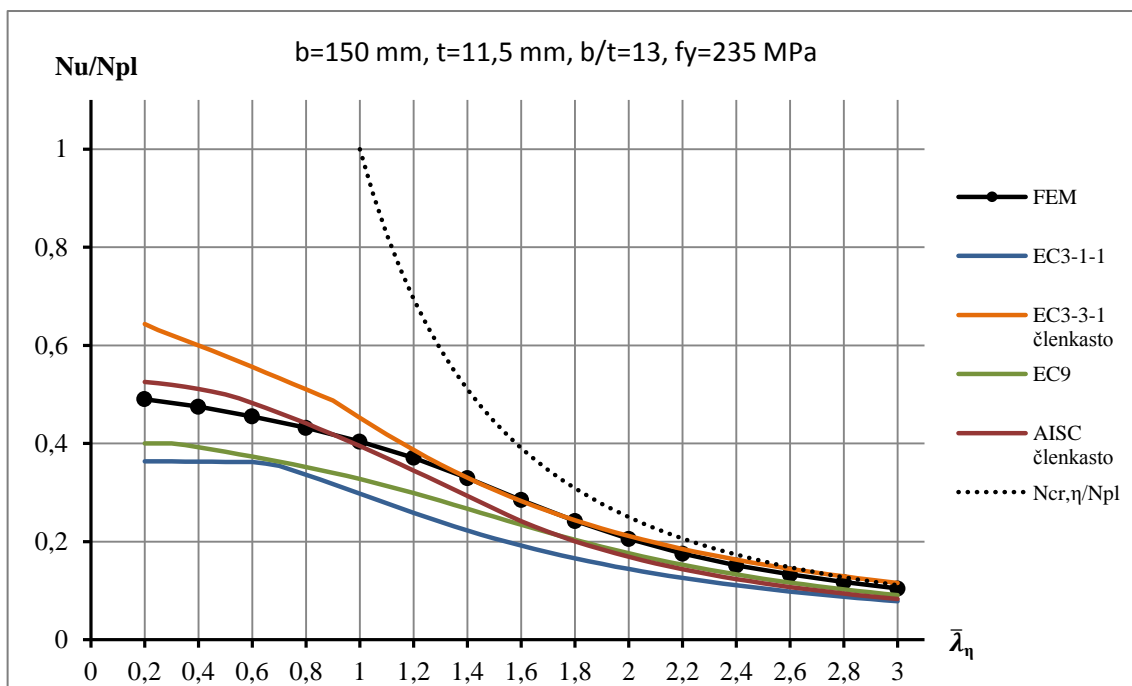
##### 4.5.1 Členkasto podprti elementi (spoji z enim vijakom)

Rezultati numeričnih simulacij so tako kot pri centrično obremenjenih kotnikih primerjani z rezultati, ki jih podajajo standardi. Primerjave za posamezno vrednost razmerja  $b/t$  so prikazane na grafikonih v nadaljevanju.



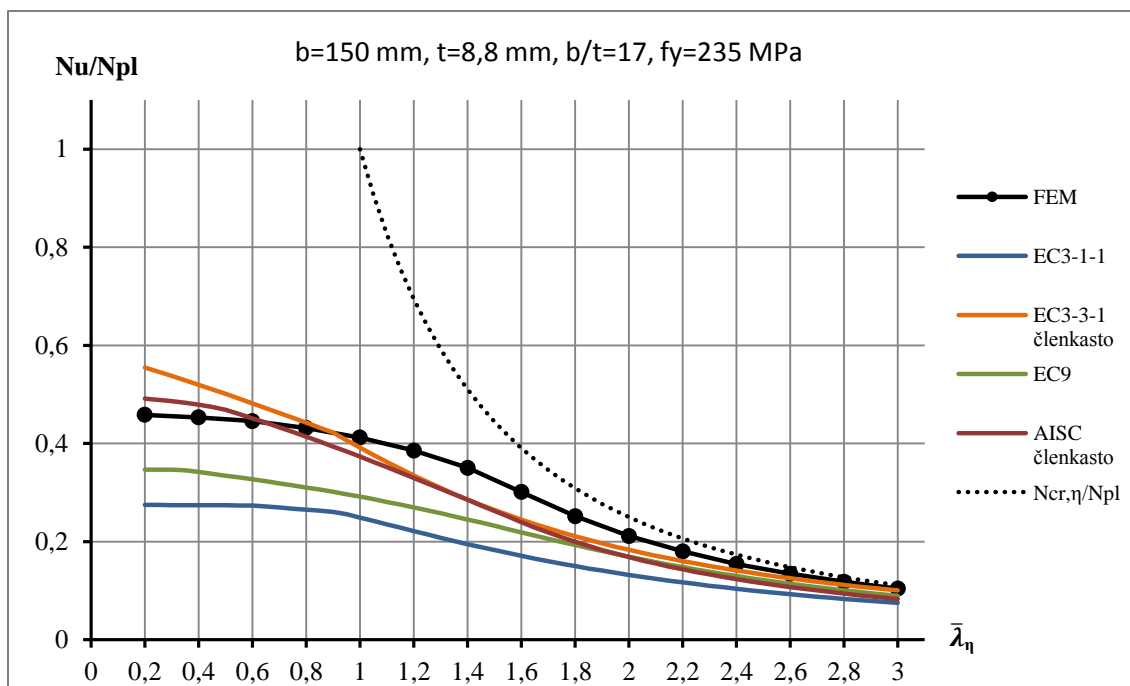
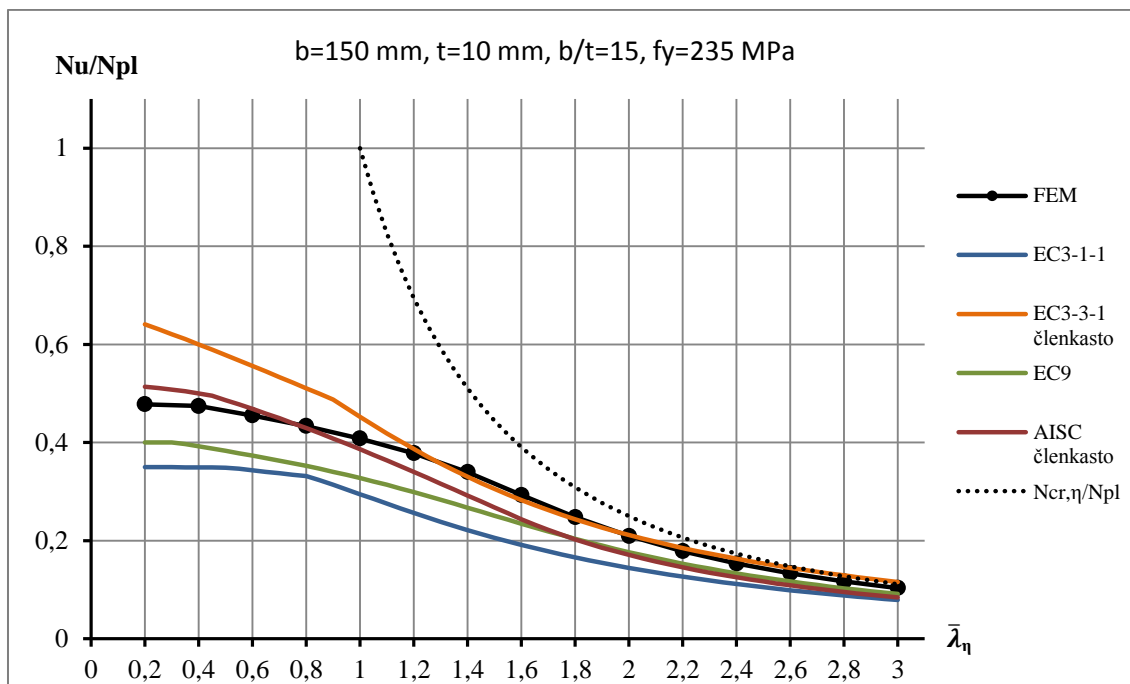


Grafikon 43: Primerjava rezultatov pri  $b/t=11$ , ekscentrična obremenitev

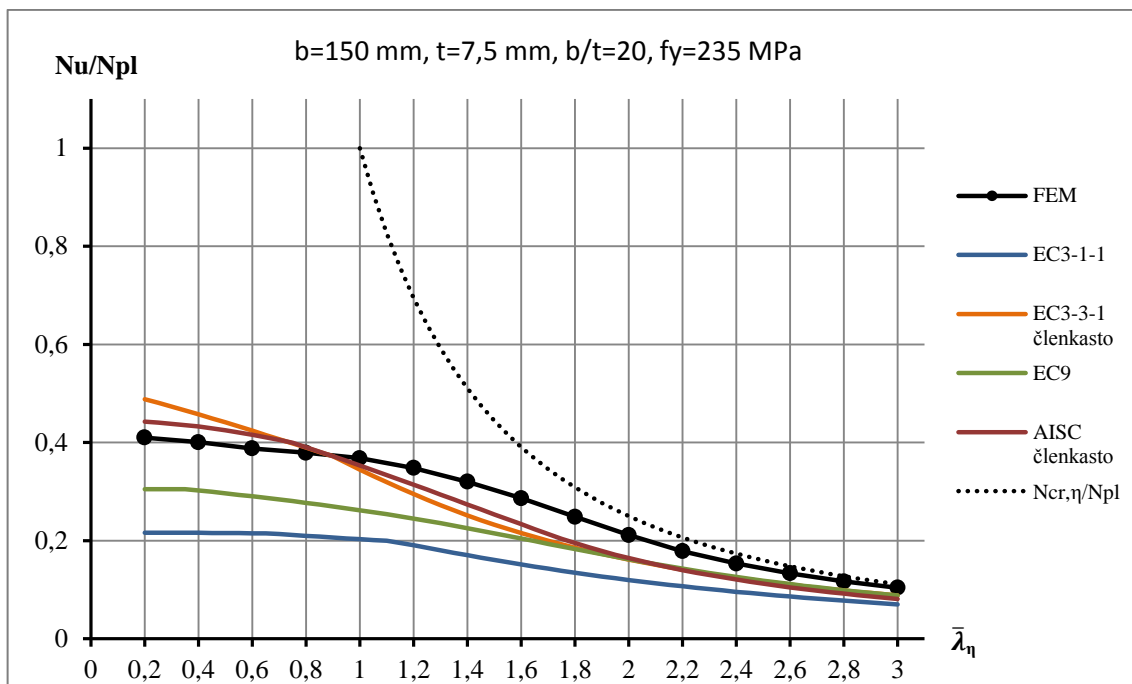


Grafikon 44: Primerjava rezultatov pri  $b/t=13$ , ekscentrična obremenitev

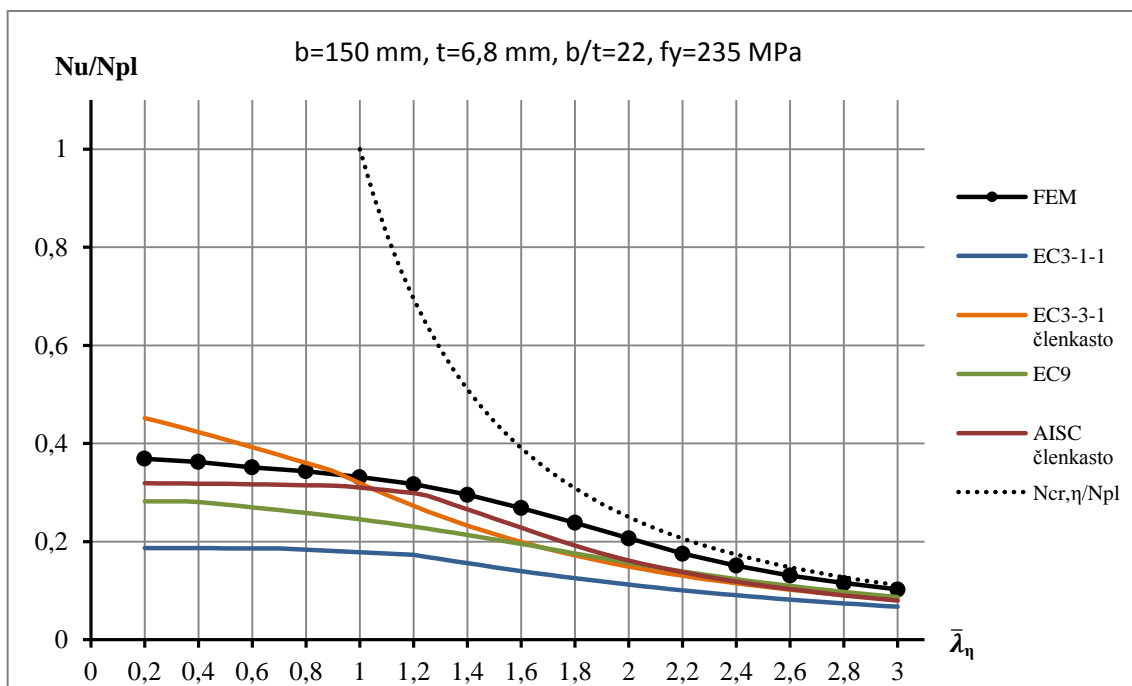
Za kompaktne prečne prereze je na grafikonih 43 in 44 vidno dobro ujemanje rezultatov numeričnih simulacij in rezultatov standardov. Za kratke kotnike so rezultati standarda SIST EN 1993-3-1 na nevarni strani, za dolge kotnike pa se rezultati numeričnih simulacij in standarda povsem ujamejo.



Z večanjem vitkosti prečnega prereza postajajo rezultati standardov vse bolj konservativni. Dobro ujemanje z obliko odziva različnih dolgih kotnikov daje standard SIST EN 1999. Zelo dolgi kotniki se ne glede na kompaktnost prečnega prereza uklonijo upogibno okoli šibke osi.



Grafikon 47: Primerjava rezultatov pri  $b/t=20$ , ekscentrična obremenitev



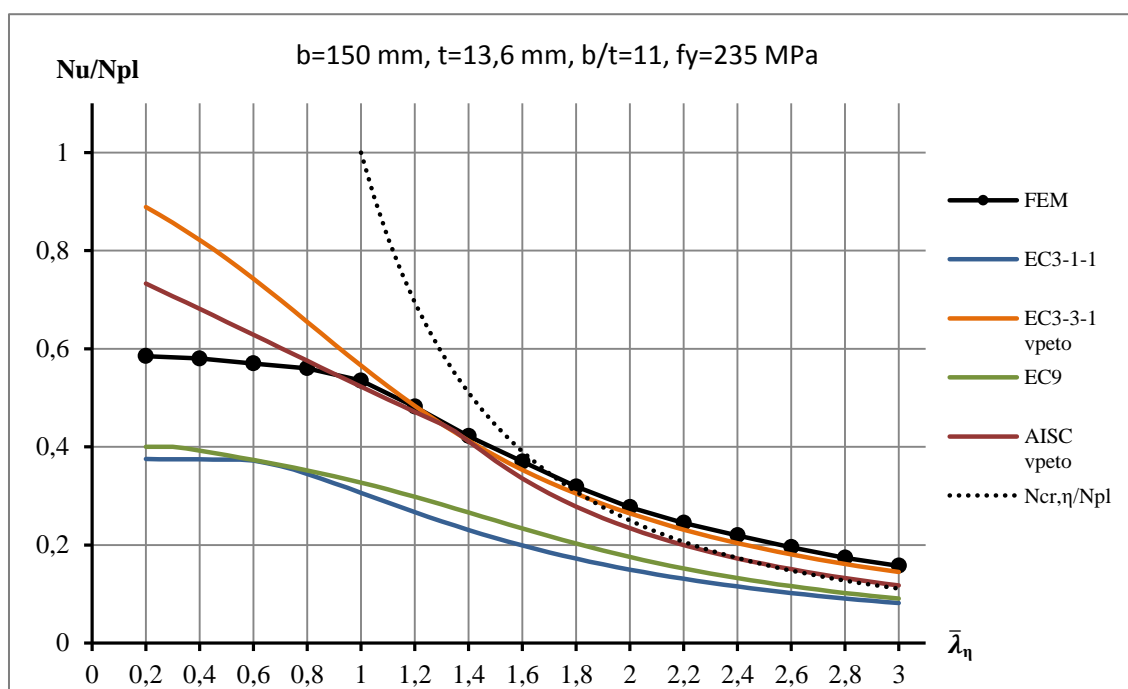
Grafikon 48: Primerjava rezultatov pri  $b/t=22$ , ekscentrična obremenitev

Razen pri majhni relativni vitkosti, so rezultati glede na numerične simulacije na varni strani. Najboljše rezultate glede oblike odziva podaja standard SIST EN 1999, vendar pa so vrednosti uklonske nosilnosti v primerjavi z rezultati numerične analize zelo konservativne. Podoben odziv podaja tudi standard SIST EN 1993-1-1, pri katerem pa so vrednosti še konservativnejše. Standarda

AISC in SIST EN 1993-3-1 sta pri majhnih relativnih vitkosti delno na nevarni strani, v območju večjih vitkosti pa so vrednosti glede na numerične rezultate na varni strani. Ameriški standard AISC v splošnem podaja zelo dobre rezultate. Zaradi členkastih podpor, ki dopuščajo rotacije okoli glavnih in geometrijskih osi prečnega prereza, se vrednosti uklonske nosilnosti členkasto podprtih elementov pri velikih vitkosti približajo elastični uklonski nosilnosti okoli šibke osi. Glede na prikazane primerjave, so v nadaljevanju predlagane rešitve, ki podajajo natančnejše ujemanje rezultatov.

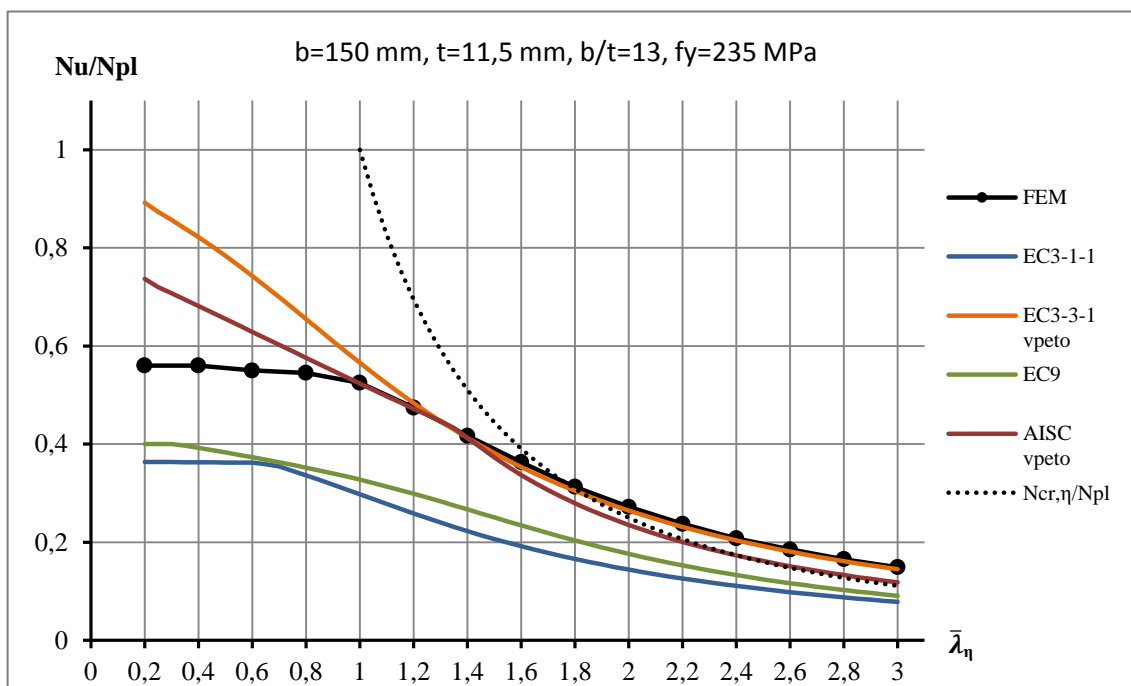
#### 4.5.2 Vpeti elementi (spoji z dvema vijakoma)

Vpliv vpetosti krakov kotnika se kaže v višji uklonski nosilnosti in načinu porušitve. Poleg torzijskega zasuka, ki je v manjši meri prisoten pri obeh načinih podpiranja, se členkasto podprti elementi pri velikih vitkosti uklonijo upogibno okoli šibke osi. Kotniki povezani z dvema vijakoma pa se v začetni fazi pretežno uklonijo okoli geometrijske osi. Obnašanje elementov v numeričnih simulacijah se ujema z ugotovitvami Suna in Butterwortha (2013). Posledica opisanega načina izgube stabilnosti je uklonska nosilnost, ki je pri vitkih elementih višja od elastične kritične nosilnosti okoli šibke osi.

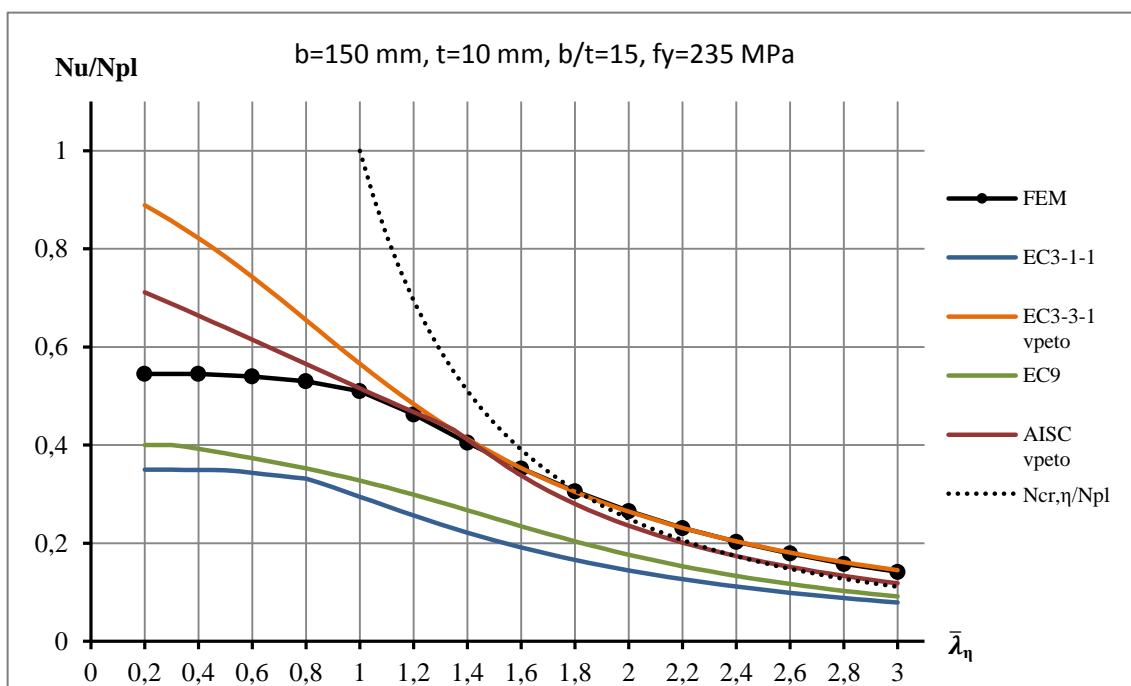


Grafikon 49: Primerjava rezultatov pri  $b/t=11$ , ekscentrična obremenitev

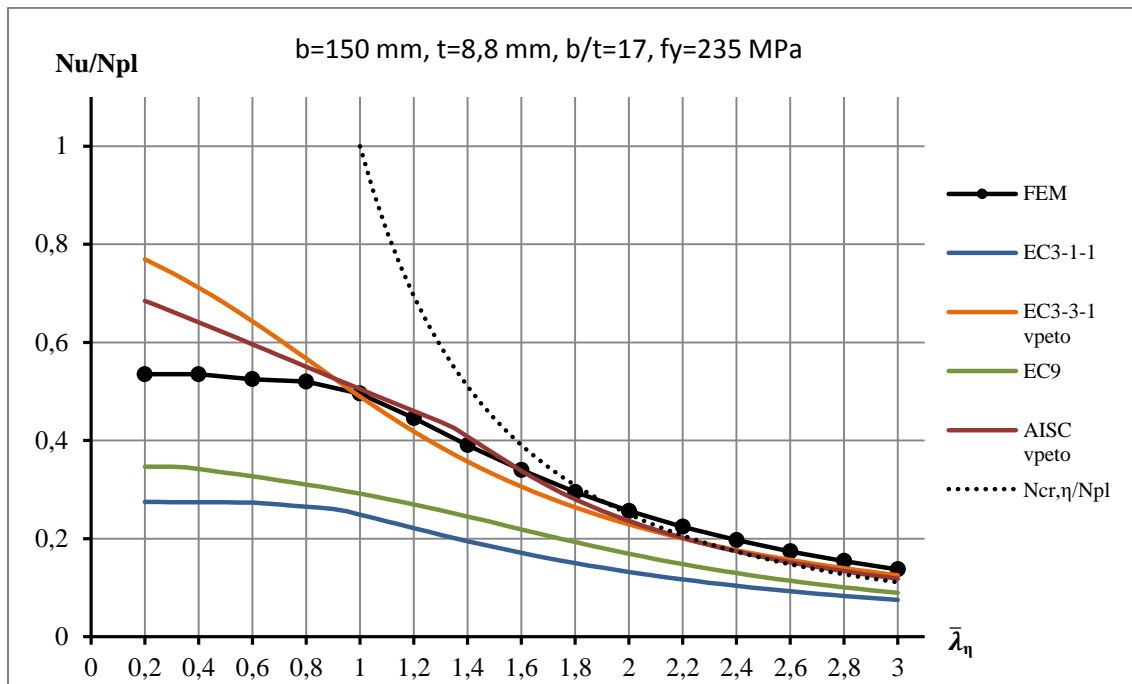
Uklonska nosilnosti, ki je pri standardu SIST EN 1993-1-1 v splošnem zelo konservativna, je posledica že opisane interakcije osne sile in upogibnega momenta, ki nastopa zaradi ekscentričnosti povezave. Standarda SIST EN 1993-3-1 in AISC sta podobno kot za kotnike, ki so z ostalimi elementi povezani preko enega vijaka, pri majhni relativni vitkosti na nevarni strani, drugje pa kažeta dobro ujemanje z rezultati numeričnih simulacij.



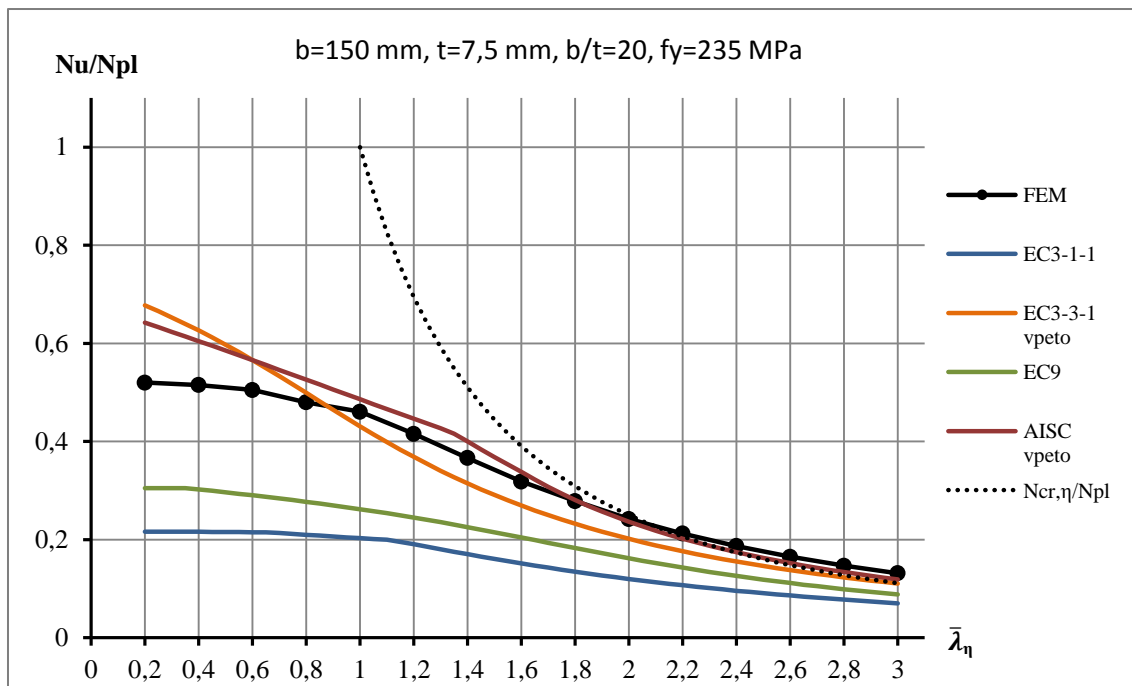
Grafikon 50: Primerjava rezultatov pri  $b/t=13$ , ekscentrična obremenitev



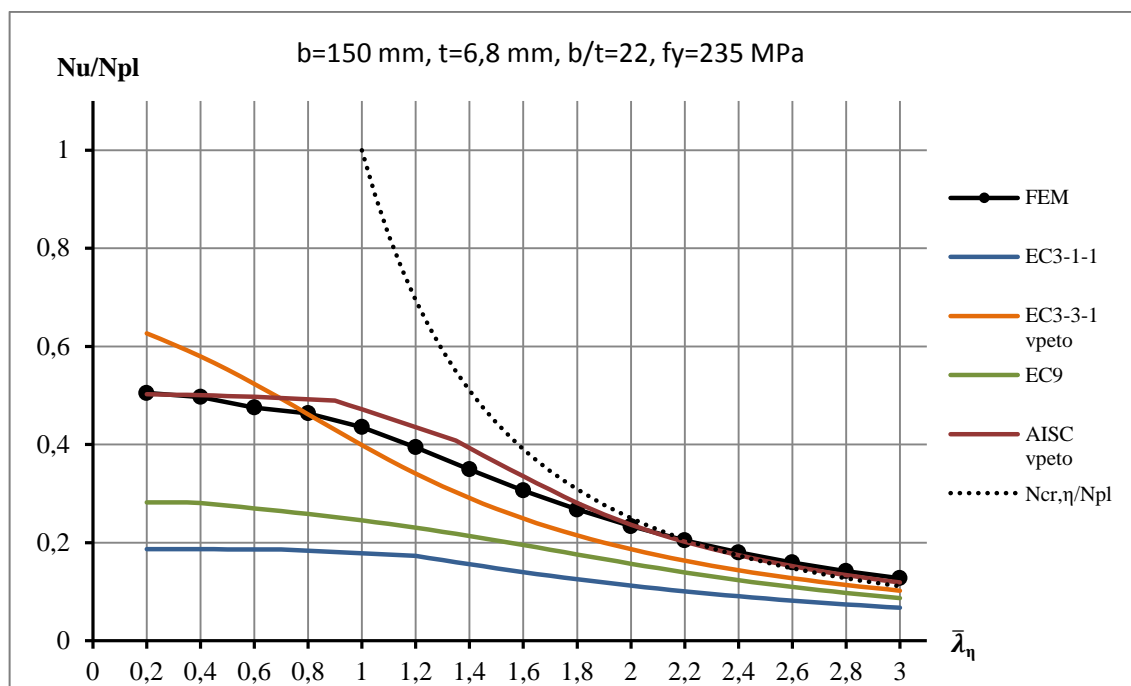
Grafikon 51: Primerjava rezultatov pri  $b/t=15$ , ekscentrična obremenitev



Grafikon 52: Primerjava rezultatov pri b/t=17, ekscentrična obremenitev



Grafikon 53: Primerjava rezultatov pri b/t=20, ekscentrična obremenitev



Grafikon 54: Primerjava rezultatov pri  $b/t=22$ , ekscentrična obremenitev

Pri kotnikih, ki so podprti ali z ostalimi elementi povezani s spoji z vsaj dvema vijakoma, so odstopanja med rezultati numeričnih simulacij in rezultati standardov večja. Uklonske nosilnosti so zaradi večje togosti spojev in različnega načina izgube stabilnosti pričakovano višje. Standard SIST EN 1999 zato podaja še bolj konservativne vrednosti uklonske nosilnosti, kot pri idealno členkasto povezanih kotnikih. Očitno je, da upoštevanje torzijskega in torzijsko-upogibnega uklona v standardu AISC izboljša ujemanje numeričnih in analitičnih rezultatov tega vpetih kotnikov.

#### 4.6 Predlogi za ustrežnejši izračun uklonske nosilnosti

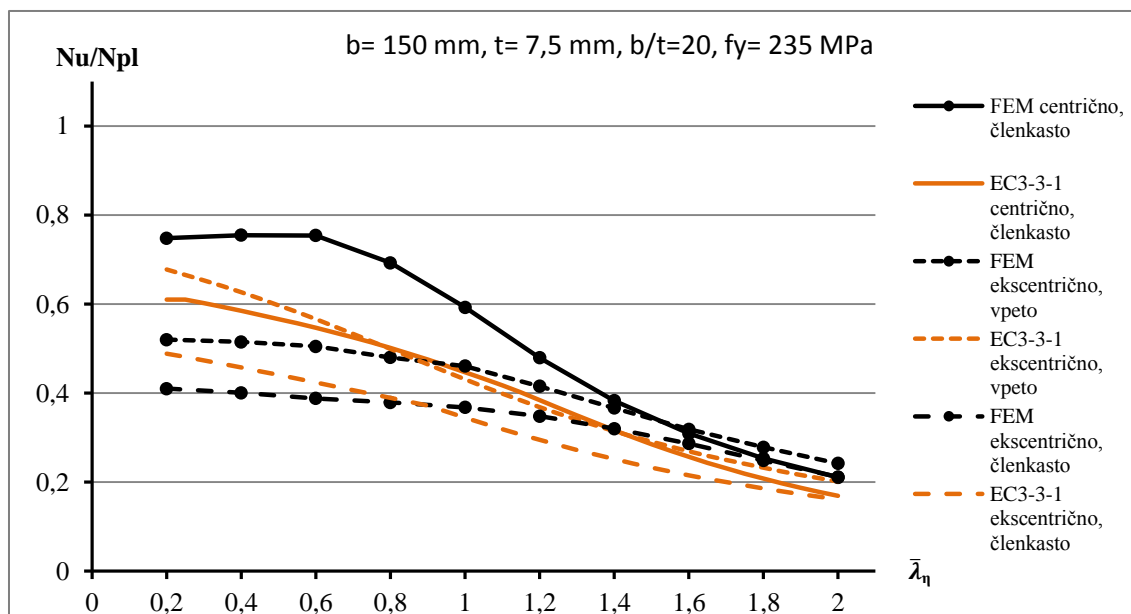
Standardi upoštevajo eksperimentalno dokazane odzive ekscentrično podprtih in obremenjenih enojno simetričnih profilov, vendar je iz prikazanih primerjav očitno, da so razlike med izračuni po standardih in rezultati numeričnih simulacij precejšnje. Podobno kot pri centrično obremenjenih kotnikih, kjer Sinur in Može (2015) predlagata vpeljavo torzijsko-upogibne uklonske krivulje v SIST EN 1993-1-1, je za ekscentrično obremenjene kotnike preverjena uporaba torzijsko-upogibne uklonske krivulje v SIST EN 1993-3-1. Glede na rezultate primerjav različno podprtih in povezanih kotnikov je v standardu SIST EN 1999 smiselna izbira manj strogega redukcijskega faktorja. Preverjeno je tudi upoštevanje torzijskega in torzijsko-upogibnega uklona v standardu AISC.

##### 4.6.1 Uporaba torzijskega in torzijsko-upogibnega uklona v SIST EN 1993-3-1

Izračuni po standardu SIST EN 1993-3-1 in rezultati numeričnih simulacij se ne glede na način povezave srednje dolgih in dolgih kotnikov zelo dobro ujemajo. Kljub upoštevanju torzijskega uklona

z uporabo efektivnega prečnega prereza, je pri kratkih elementih prisotno večje odstopanje. Izbrana je bila torzijska oziroma torzijsko-upogibna uklonska krivulja, s katero zajamemo začetni torzijski plato.

Na grafikonu 55 je prikazana primerjava izračunov po standardih in numeričnih rezultatov za centrično in ekscentrično obremenjene elemente z vitkostjo prereza  $b/t = 20$ . V poglavju 3.5 so že bili predstavljeni predlogi za natančnejši izračun uklonske nosilnosti centrično obremenjenih kotnikov.



Grafikon 55: Primerjava nosilnosti centrično in ekscentrično obremenjenih kotnikov po SIST EN 1993-3-1

V tem poglavju je preverjena uporaba torzijskega in torzijsko-upogibnega uklona za ekscentrično obremenjene kotnike v standardu SIST EN 1993-3-1. Relativna vitkost za torzijsko-upogibni uklon se ob upoštevanju sistemske dolžine določi skladno s standardom SIST EN 1993-1-1, s standardom SIST EN 1993-3-1 pa je določena efektivna relativna vitkost. V predlagani uklonski krivulji so izbrane vrednosti začetnih nepopolnosti  $\alpha = 0,21$  in začetnega platoja  $\bar{\lambda}_0 = 0,4$ . Uklonska nosilnost kotnika se določi ob upoštevanju načina pritrditve s faktorjem  $\eta$ . Merodajna je minimalna vrednost upogibne uklonske nosilnosti, kot je določeno v poglavju 4.1.2 in tukaj predstavljene torzijsko-upogibne uklonske nosilnosti. Primerjava izračuna po standardu ob upoštevanju predlagane torzijsko-upogibne krivulje in postopka izračuna uklonske nosilnosti ter rezultati numeričnih simulacij je za členkasto povezane kotnike prikazana na grafikonu 56, za kotnike z vsaj dvema vijakoma v spojih pa na grafikonu 57.

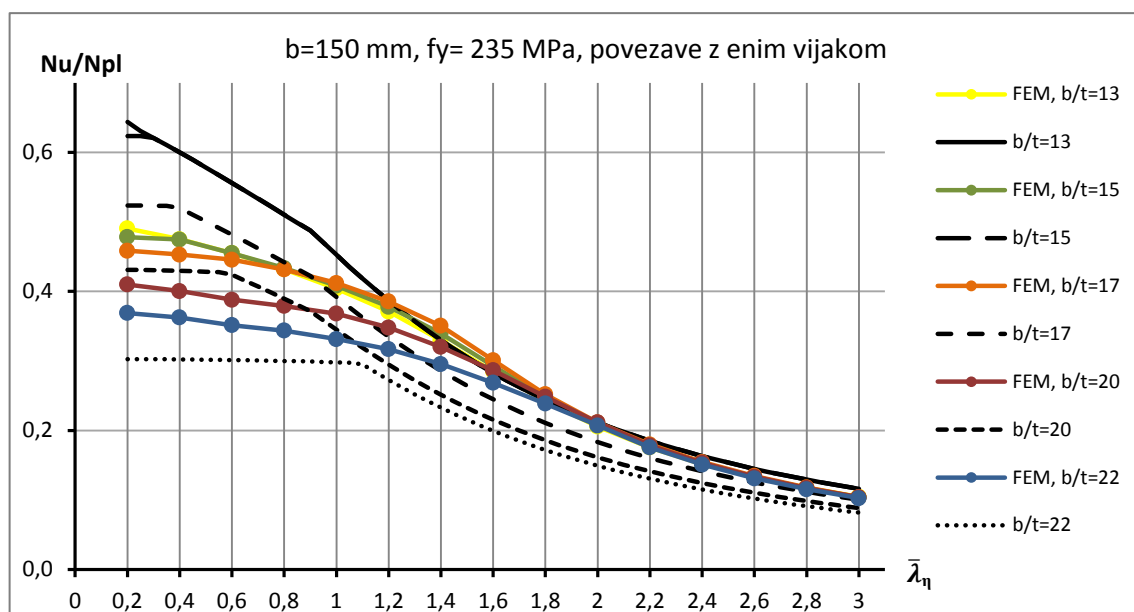
$$\bar{\lambda}_{T,TF} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr,min}}}, \quad N_{cr,min} = \min(N_{cr,2,3}, N_{cr,T}), \quad \bar{\lambda}_{eff} = k \bar{\lambda}_{T,TF}, \quad l_u = L \quad (100)$$

$$\chi_{T,TF} = \begin{cases} 1,0 & \bar{\lambda}_{eff} \leq 0,4 \\ \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_{eff}^2}} & \bar{\lambda}_{eff} > 0,4, \end{cases} \quad \phi = 0,5(1 + 0,21(\bar{\lambda}_{eff} - 0,4) + \bar{\lambda}_{eff}^2) \quad (101)$$

$$N_{b,Rd,T,TF} = \eta \chi_{T,TF} A_{eff} f_y / \gamma_{M1} \quad (102)$$

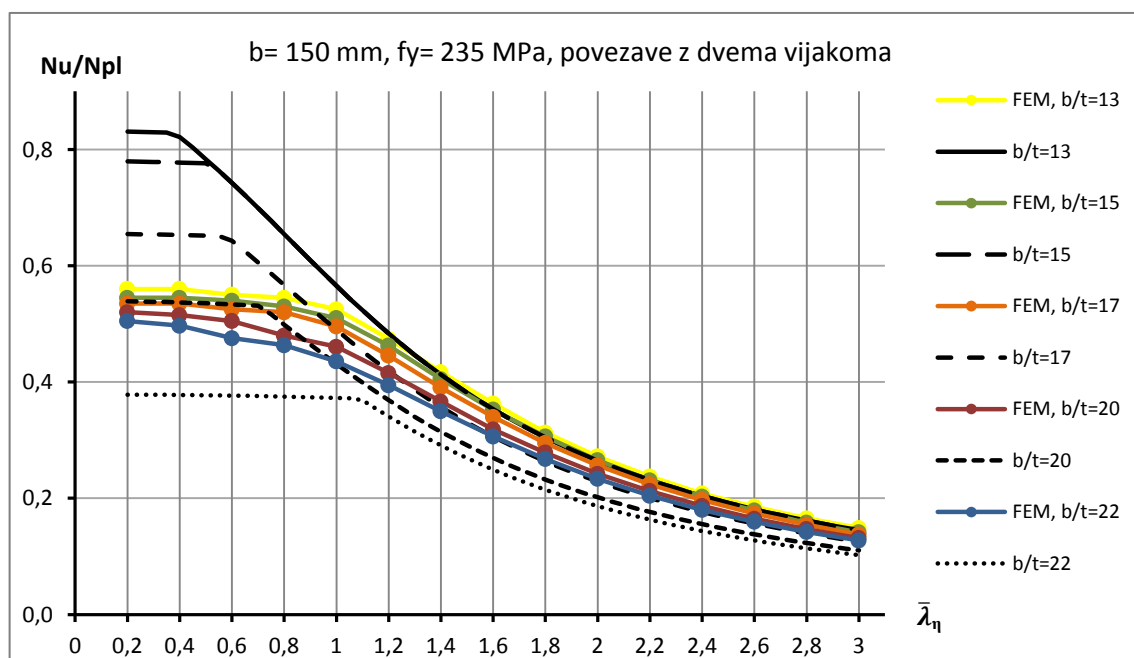


Predlagani postopek ni dovolj natančen za kotnike s spoji z enim in vsaj dvema vijakoma, kar je razvidno iz grafikonov 56 in 57.



Grafikon 56: Primerjava rezultatov predlaganega postopka in numeričnih rezultatov

Z uporabo predlaganega postopka in uklonske krivulje za torzijski in torzijsko-upogibni uklon se rezultati za členkasto povezane kotnike ne ujamejo z rezultati numeričnih simulacij. Kljub predlogu o daljšem torzijskem platoju vrednosti za kompaktne prečne prereze precej odstopajo od rezultatov numeričnih simulacij. Odstopanje je prisotno tudi v območju večjih relativnih vitkosti, čeprav so tam rezultati na varni strani.



Grafikon 57: Primerjava rezultatov predlaganega postopka in numeričnih rezultatov

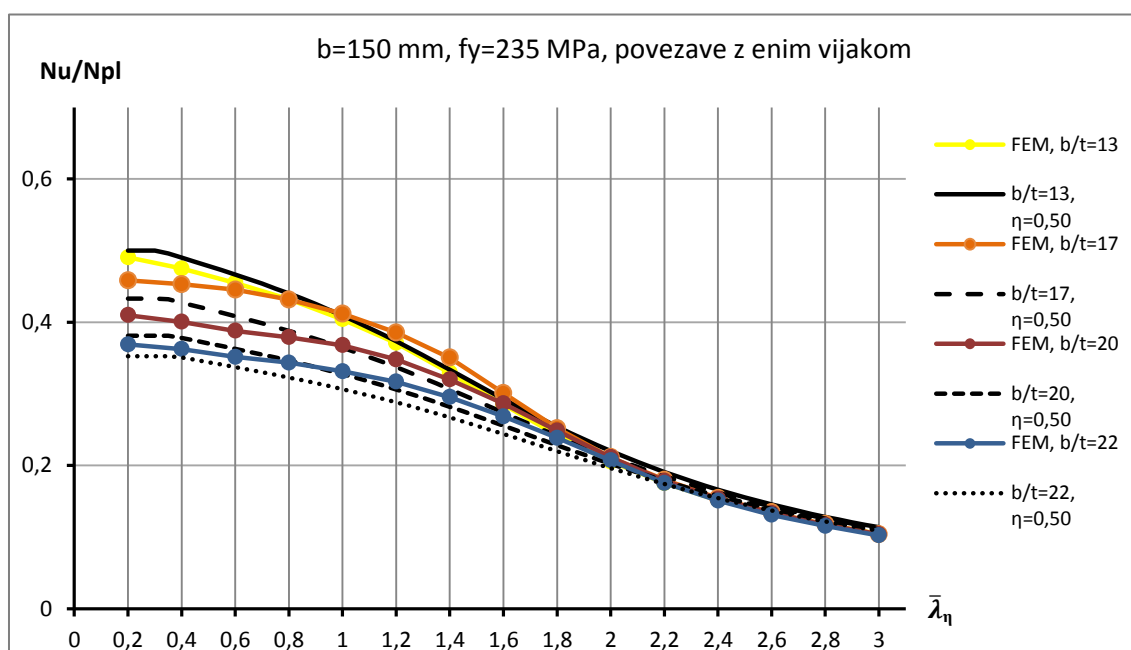
Podobno kot za členkasto pritrjene kotnike je na grafikonu 57 očitno veliko odstopanje med rezultati predlaganega postopka in numeričnih simulacij kotnikov, ki so pritrjeni z vsaj dvema vijakoma. Za srednje in velike relativne vitkosti se rezultati kljub konservativnosti ujamejo dovolj dobro. Zelo veliko odstopanje je prisotno pri kratkih kotnikih, kjer se vrednosti numeričnih simulacij kljub različnim kompaktnostim prečnih prerezov ne razlikujejo tako zelo kot pri centrično obremenjenih kotnih profilih.

Predlog Sinurja in Možeta (2015) o uporabi torzijsko-upogibne uklonske krivulje v SIST EN 1993-1-1 bistveno ne spreminja standarda, zato je enak princip izboljšanja ujemanja rezultatov bil uporabljen tudi v tem poglavju. Rezultati numeričnih simulacij in predlagane torzijske in torzijsko-upogibne uklonske krivulje se ne ujemajo dovolj dobro. Direktna uporaba predloga Sinurja in Možeta (2015) z večjim torzijskim platojem bi bila smiselna v kombinaciji s spremenljivo vrednostjo faktorja pritrditve  $\eta$ , ki bi bil odvisen od kompaktnosti prečnega prereza.

#### 4.6.2 Sprememba redukcije upogibnega uklona SIST EN 1999

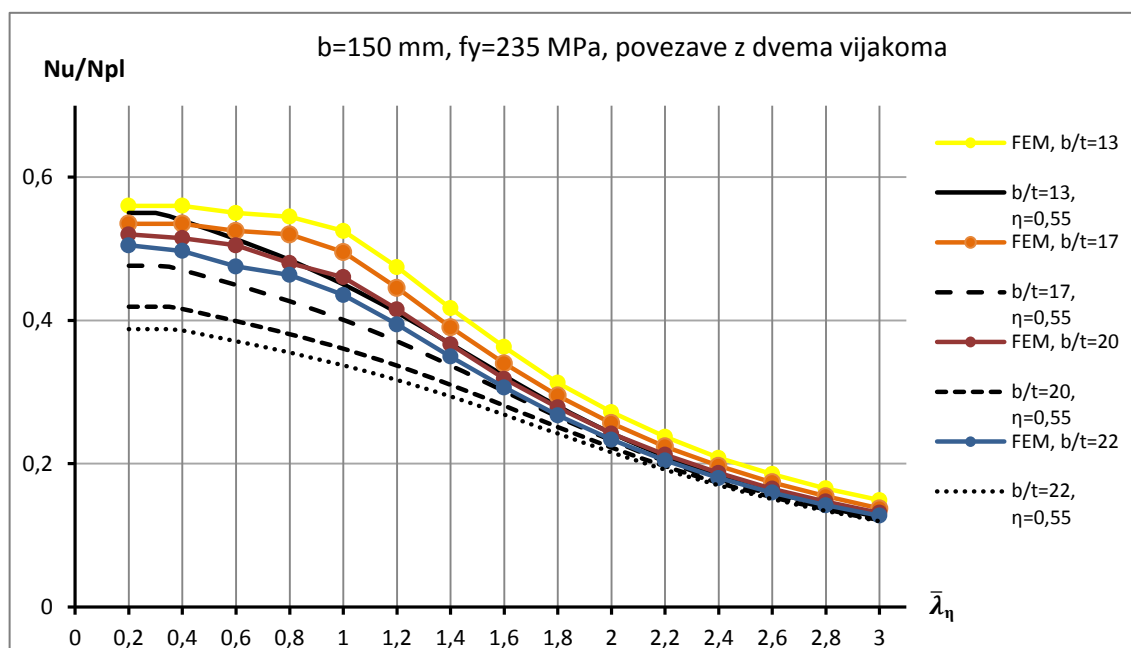
Redukcija upogibnega uklona centrično podprtega elementa daje za členkasto podprte kotnike v primerjavi z rezultati numeričnih simulacij za celotno območje relativne vitkosti konservativne rezultate. Pri kotnikih, ki so z ostalimi elementi povezani z dvema vijakoma, so rezultati v območju majhnih vitkosti konservativni, pri velikih vitkosti pa se zelo dobro ujemajo z numeričnimi rezultati.

Glede na obliko uklonske krivulje je predlagana uporaba manj stroge redukcije, in sicer za členkasto podprte kotnike 50% in za z dvema vijakoma povezane kotnike 55% vrednosti upogibnega uklona enakega členkasto podprtega in centrično obremenjenega elementa. Primerjava rezultatov z upoštevanim predlogom je prikazana na grafikonih 58 in 59.



Grafikon 58: Primerjava rezultatov s predlogom uporabe faktorja  $\eta = 0,5$  za členkaste povezave

Iz primerjave na grafikonu 58 je očitno, da je izbira redukcijskega faktorja  $\eta=0,5$  ustrežnejša, saj so rezultati glede na rezultate numeričnih simulacij na varni strani, uklonska nosilnost pa je s tem višja za 10%. Z dvema vijakoma pritrjeni kotniki imajo zaradi načina podpiranja posledično višjo uklonsko nosilnost kot povsem členkasto povezani elementi, zato je smiselna še manjša redukcija upogibnega uklona. Na spodnjem grafikonu je prikazano ujemanje rezultatov ob upoštevanju redukcijskega faktorja upogibne uklonske nosilnosti  $\eta=0,55$ .



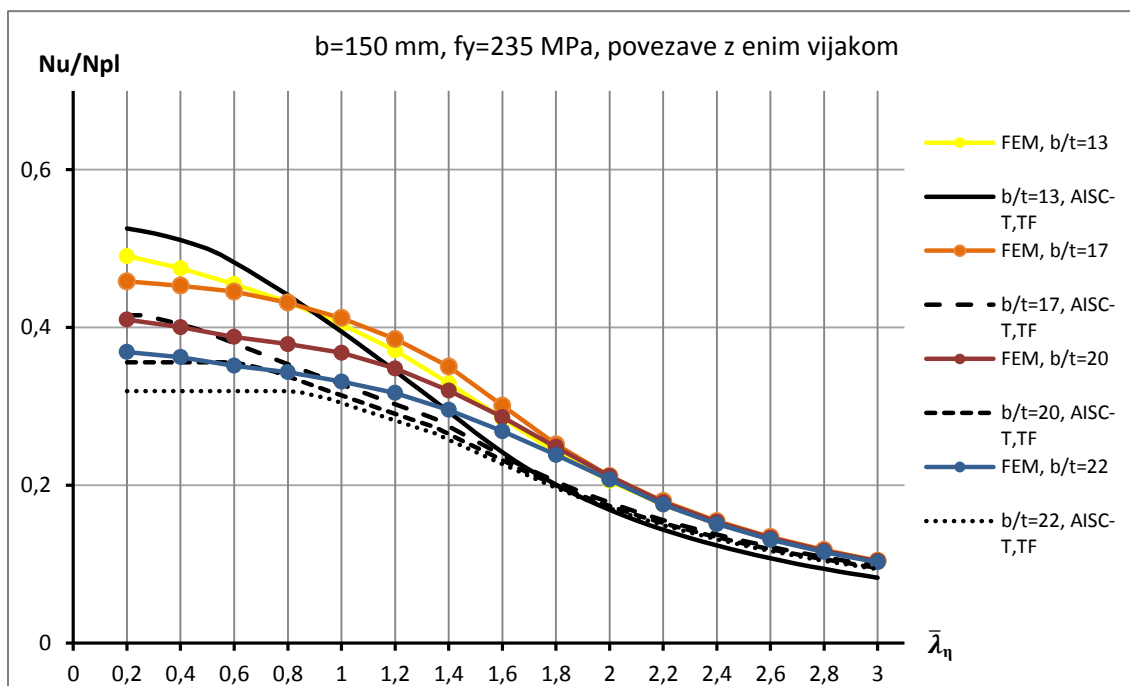
Grafikon 59: Primerjava rezultatov s predlogom uporabe faktorja  $\eta=0,55$  za povezave z dvema vijakoma

Standard v osnovi podaja zelo preprosto rešitev uklonske nosilnosti ekscentrično obremenjenih elementov. Z uporabo redukcijskega faktorja  $\eta = 0,55$  za kotnike s povezavami z dvema vijakoma, se uklonska nosilnost v primerjavi s členkasto podprtimi elementi bistveno ne poveča. Kot najenostavnejša možnost je zato predlagana uporaba redukcijskega faktorja  $\eta = 0,5$  ne glede na način podpiranja in povezovanja. Pri izračunu uklonske nosilnosti enojno simetričnih jeklenih profilov bi bila glede na predstavljene rezultate smiselna sprememba uklonskih krivulj na vrednosti, ki jih podaja standard za konstrukcijske elemente iz aluminijevih zlitin in uporaba predlaganega redukcijskega faktorja  $\eta = 0,5$ .

#### 4.6.3 Upoštevanje torzijskega in torzijsko-upogibnega uklona v AISC

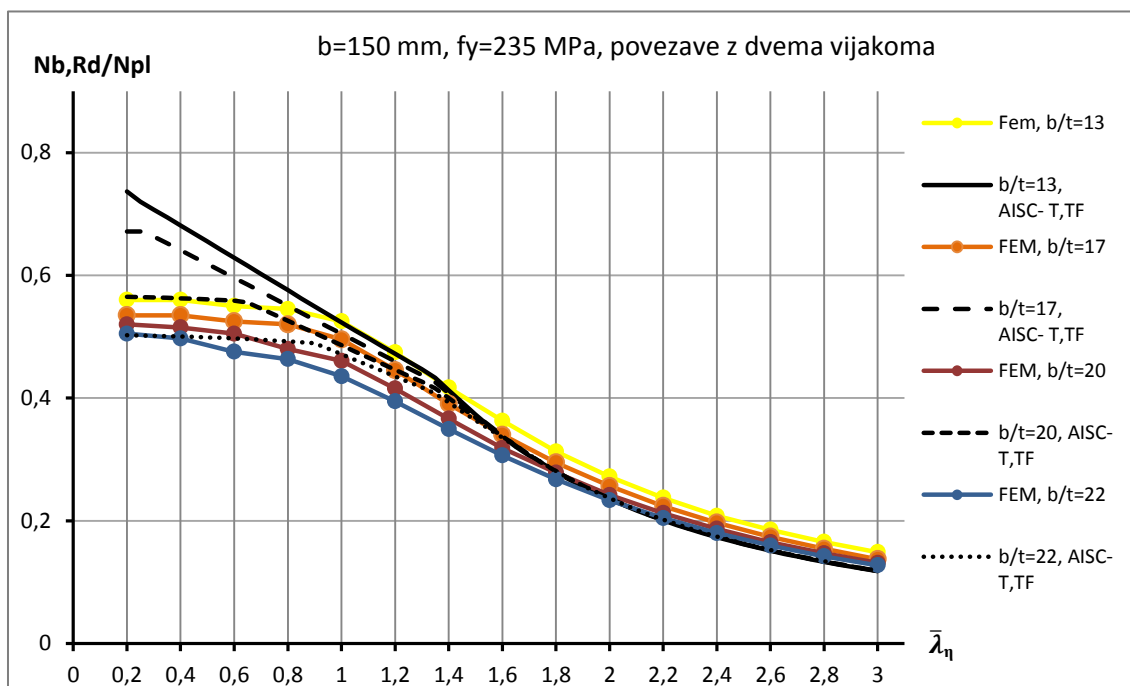
Upoštevanje torzijskega in torzijsko-upogibnega uklona je pri elementih z razmerjem  $b/t=22$  ugodno vplivalo na ujemanje rezultatov, zato so v nadaljevanju prikazani rezultati, kjer je torzijski in torzijsko-upogibni uklon upoštevan za vsa razmerja  $b/t$ . Iz primerjave rezultatov je očitno, da tudi upoštevanje torzijskega in torzijsko-upogibnega uklona ne daje zadovoljivih rezultatov, s katerimi bi se lahko dovolj natančno približali rezultatom numeričnih simulacij. Upoštevanje torzijskega in torzijsko-

upogibnega uklona namreč spremeni vrednosti kritičnih napetosti na podlagi katerih je določena uklonska nosilnost.



Grafikon 60: Upoštevanje T in TF uklona pri členkasto podprtih elementih

Spreminjanje izračuna uklonske nosilnosti členkasto podprtih kotnikov je za standard AISC nepotrebno. Standard z interakcijsko enačbo (90) oziroma (91), v primerjavi z numeričnimi rezultati, dovolj natančno določa uklonsko nosilnost.



Grafikon 61: Upoštevanje T in TF uklona pri kotnikih s povezavami z dvema vijakoma

Upoštevanje torzijskega in torzijsko-upogibnega uklona bistveno ne izboljša ujemanja rezultatov. Pri majhni relativni vitkosti interakcija med torzijskim in upogibnim uklonom ne pride do izraza, zato se uklonska nosilnost v tem območju praktično ne zmanjša. Predlagana sprememba v standardu AISC torej ne podaja ustrezne rešitve.

Izmed vseh predlogov za natančnejši izračun uklonske nosilnosti ekscentrično obremenjenih kotnikov, je v standardu SIST EN 1993-3-1 smiselna vpeljava torzijsko-upogibne uklonske krivulje v kombinaciji s spremenljivo vrednostjo faktorja povezave  $\eta$ . Odziv z dvema vijakoma povezanih kotnikov je zaradi dodatno preprečenih zasukov kompleksnejši.

Določitev uklonske nosilnosti je glede na preverjene predloge najenostavnejša z uporabo postopka, ki je predstavljen v poglavju 6.4.2. Predlog določitve uklonske nosilnosti različno podprtih ekscentrično obremenjenih kotnikov z uporabo konservativnejše vrednosti redukcijskega faktorja  $\eta = 0,50$  predstavlja predlog harmonizacije in poenostavitve standardov Evrokod. Natančnejši izračun uklonske nosilnosti bi v kombinaciji s spremenljivo vrednostjo faktorja povezave  $\eta$  predstavljala tudi uporaba predloga Sinurja in Možeta (2015), vendar bi bile potrebne obsežnejše raziskave obnašanja na različne načine povezanih jeklenih kotnih profilov.

Interakcijska enačba povsem členkasto povezanih in ekscentrično obremenjenih kotnikov v standardu AISC daje dovolj natančne izračune uklonske nosilnosti.

## 5 ZAKLJUČKI

Obnašanje tlačno obremenjenih kotnih profilov je zaradi enojne simetrije prereza težko predvideti, s pomočjo enačb torzijskega, torzijsko-upogibnega in upogibnega uklona, ki opisujejo odziv elementov, pa lahko sklepamo o načinu izgube stabilnosti. Numerični modeli in analize obnašanja predstavljajo najenostavnejši, najcenejši in najhitrejši način predstavitve rezultatov. V magistrskem delu je predstavljeno obnašanje tlačno obremenjenih enojno simetričnih jeklenih profilov. Natančneje so bili obravnavani centrično in ekscentrično obremenjeni enakokraki kotni profili. Predstavljeni so postopki izračuna uklonske nosilnosti po različnih standardih, rezultati pa so primerjani z rezultati numeričnih simulacij, ki so bile izvedene v programskem okolju Abaqus.

Pri študiju postopkov določitve uklonske nosilnosti obravnavanih elementov se je pokazala neusklajenost različnih delov standardov Evrokod glede meje kompaktnosti kotnih profilov. Posledično so rezultati za centrično obremenjene enakokrake kotne profile, ki jih podajajo standardi, glede na rezultate eksperimentov in numeričnih simulacij, zelo konservativni, v nekaterih primerih pa celo na nevarni strani. Smiselno bi bilo poenotiti oziroma pregledno ločiti kriterije kompaktnosti za posamezne oblike prečnih prerezov.

Standard SIST EN 1993 v dveh delih in SIST EN 1999 obravnavata problem uklonske nosilnosti s pomočjo uklonskih krivulj. Ameriški standard AISC podaja enačbo za določitev kritične uklonske napetosti, v katero je glede na vitkost prereza vpeljan faktor  $Q$ . Razlike v rezultatih se pojavijo zaradi različnega načina določitve in uporabe relativne vitkosti, različnih vrednosti začetnih nepopolnosti ter dolžine torzijskega platoja. Interakcija torzijskega in upogibnega uklona okoli močne osi je v enačbah standardov posledica enojne simetrije prereza, rezultati eksperimentov in numeričnih analiz pa kažejo na interakcijo torzijskega in upogibnega uklona okoli šibke osi. Razlike med numerični rezultati in rezultati standardov so zato največje v območju srednje relativne vitkosti, kjer je merodajen prehod iz torzijskega v upogibni uklon okoli šibke osi v eni sami točki.

V okviru raziskav Katedre za metalne konstrukcije na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo, Univerze v Ljubljani, je bil v programskem okolju Abaqus izdelan numerični model centrično obremenjenih in podprtih kotnikov. Začetne nepopolnosti in zaostale napetosti so bile združene v ekvivalentne geometrijske začetne nepopolnosti, ki so bile upoštevane pri numerični analizi uklonske nosilnosti. Model je bil umerjen na podlagi primerjave rezultatov z uklonsko krivuljo b standarda SIST EN 1993-1-1. Rezultati so bili uporabljeni pri izdelavi magistrskega dela in so služili za primerjavo z rezultati standardov. Na podlagi primerjav so predstavljeni ukrepi za poenotenje standardov in natančnejše ujemanje rezultatov.

Ekscentrično podprti in obremenjeni kotniki predstavljajo posebno poglavje stabilnostne analize in določitve uklonske nosilnosti. Njihov odziv je zaradi enojne simetrije prečnega prereza in načina obremenitve zelo kompleksen. Standardi na zelo poenostavljen način določajo uklonsko nosilnost,

postopki izračuna pa so zelo odvisni od načina podpiranja elementov. Najenostavnejši postopek podaja standard SIST EN 1999-1-1, pri katerem je uklonska nosilnost ekscentrično podprtega in obremenjenega elementa enaka 40% upogibne uklonske nosilnosti enakega, vendar centrično podprtega elementa. Standard sicer obravnava konstrukcijske elemente iz aluminijevih zlitin, z namenom kontrole in primerjave so bili postopki uporabljeni pri izračunu uklonske nosilnosti jeklenih kotnih profilov.

V programskem okolju Abaqus je bil za ekscentrično podprte in obremenjene elemente izdelan nov numerični model, pri katerem so bile začetne nepopolnosti upoštevane v obliki prve uklonske oblike. Amplituda ekvivalentnih začetnih nepopolnosti je bila omejena z velikostjo toleranc pri izdelavi elementov. V primerjavi z rezultati tujih avtorjev in eksperimentov so uklonske nosilnosti, določene z uporabo izdelanega numeričnega modela, dovolj natančne, prav tako je ustrezen tudi odziv modela pri izgubi stabilnosti.

V magistrskem delu sta predstavljena dva različna načina podpiranja ekscentrično obremenjenih elementov, od katerih je odvisen tudi način izgube stabilnosti. Členkasto podprti kratki elementi s spoji z enim vijakom se zaradi dopustnih rotacij, ob izgubi stabilnosti uklonijo upogibno okoli osi pravokotno na obremenjen in podprt krak. Kratki elementi s spoji z vsaj dvema vijakoma se uklonijo upogibno okoli osi obremenjenega in pritrjenega kraka. Daljši elementi se ne glede na način podpiranja uklonijo torzijsko-upogibno ali upogibno okoli šibke osi. Odvisno od načina pritrditve je prisotna komponenta upogibnega uklona okoli geometrijske osi, okoli katere se uklonijo kratki elementi. Odziv različno podprtih kotnikov je zaradi različnega načina povezovanja različen, vrednosti uklonskih nosilnosti pa se razlikujejo za približno 10%.

Predstavljeni so ukrepi za ustrežnejši izračun uklonske nosilnosti ekscentrično obremenjenih kotnikov. Najenostavnejša je izbira drugačnega redukcijskega faktorja v standardu SIST EN 1999-1-1, ki praktično ne predstavlja sprememb v postopku obstoječega standarda, rezultati pa se zelo dobro ujemajo z rezultati numeričnih simulacij. V smislu poenotenja standardov Evrokod bi bila za enojno simetrične jeklene profile smiselna uporaba principa in uklonskih krivulj standarda SIST EN 1999. Preverjen je tudi postopek vpeljave torzijsko-upogibne uklonske krivulje v standard SIST EN 1993-3-1.

Magistrsko delo predstavlja postopke izračuna uklonske nosilnosti centrično in ekscentrično podprtih in obremenjenih enojno simetričnih jeklenih profilov. S pomočjo numeričnih simulacij je natančneje predstavljen torzijsko-upogibni uklon kotnikov. Za analizo uklonske nosilnosti ekscentrično obremenjenih kotnikov je izdelan nov numerični model s pomočjo katerega je predstavljeno in podrobno razloženo obnašanje enakokrakih kotnih profilov ob globalni izgubi stabilnosti.

Numerični modeli in primerjave rezultatov predstavljajo osnovo za nadaljnje raziskave in morebitne popravke ali spremembe standardov.

## VIRI

### Uporabljeni viri:

ArcelorMittal Commercial Sections, Sections and Merchant Bars – Sales Programme, ArcelorMittal (Ed.), 2015.

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: 72 str. in 38 str. pril.

Elgaaly, M., Fellow, Dagher, H., Davids, W. 1991. Behaviour of single-angle-compression members. *Journal of Structural Engineering* 117, 12: 3720-3741.

Ellobody, E., Young, B. 2005. Behaviour of Cold-Formed Steel Plain Angle Columns. *Journal of Structural Engineering* 131:457-466.

Popovic, D., Hancock, G. J., Rasmussen, K. J. R. 1999. Axial Compression Tests of Cold-Formed Angles. *Journal of Structural Engineering* 125:515-523.

Roy, G., Polyzois, D., Mohamedien, M. A. 1994. Residual stresses in cold formed steel sections. 12th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, Missouri University of Science and Technology.

Sakla, S. S. S. 1997. Single-angle compression members welded by one leg to gusset plates. Doktorska disertacija. University of Windsor, Faculty of Graduate Studies and Research (samozaložba S. S. S. Sakla): 96 str. in 219 str. pril..

Sinur, F. 2015. Instability of angle profiles. Osebna komunikacija. (7. 5. 2015).

Sinur, F., Može, P., Jursinovič, B., Beg, D. 2013. Stabilnost tlačno obremenjenih kotnih profilov. Ljubljana, 35. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije: 8 str..

Sinur, F., Može, P. 2015. Buckling behaviour of hot-rolled steel angles. Osebna komunikacija. (4. 8. 2015).

Sun, J., Butterworth, J. W. 2013. Behaviour of steel single angle compression members axially loaded through one leg. University of Auckland, Department of Civil and Environmental Engineering: 859-866.



Young, B. 2004. Tests and design of fixed-ended cold formed steel plain angle columns. *Journal of Structural Engineering* 130: 1931-1940.

**Ostali viri:**

Adluri, S. M. R., Madugula, K. S. 1996. Flexural buckling of steel angles: Experimental investigation. *Journal of Structural Engineering* 122: 309-317.

Beg, D., Čermelj, B. (sod.) Jeklene konstrukcije I. Uvod v stabilnost jeklenih konstrukcij. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za metalne konstrukcije: 64 str.

Moen, C. D., Igusa, T., Schafer, B. W. 2008. Prediction of residual stresses and strains in cold-formed steel members. *Thin-Walled Structures* 46: 1274-1289.

Shi, G., Zhou, W., Bai, Y., Liu, Z. 2014. Local buckling of steel equal angle members with normal and high strengths. *International Journal of Steel Structures*, 3: 447-455.

Zhao, W. B. 2005. Behaviour and design of cold-formed steel hollow flange sections under axial compression. Doktorska disertacija. Queensland University of Technology, School of Civil Engineering (samozaložba W. B. Zhao): 313 str. in 16 str. pril.

**Standardi:**

ANSI/AISC 360-10: 2010. Specification for Structural Steel Buildings. Chicago, American Institute of Steel Construction.

EN 10056-2: 1993. Specification of Structural steel equal and unequal leg angles-Part 2: Tolerances on shape and dimensions. Brussels, European Committee for Standardisation.

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.

SIST EN 1993-1-5: 2007. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij - 1-5. del: Elementi pločevinaste konstrukcije. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo.

SIST EN 1993-3-1: 2007. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij - 3-1. del: Stolpi, jambori in dimniki – Stolpi in jambori. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo.

SIST EN 1999-1-1: 2007. Evrokod 9: Projektiranje konstrukcij iz aluminijevih zlitin - 1-1. del: Splošna pravila za konstrukcije. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo.

»Ta stran je namenoma prazna.«

## PRILOGA A: IZRAČUN UKLONSKE NOSILNOSTI CENTRIČNO OBREMENJENEGA KOTNIKA

Obravnavan je 1500 milimetrov dolg jekleni profil s prečnim prerezom enakokrakega kotnika. Dimenzije prečnega prereza so podane v podatkih. Kotnik je sestavni del paličnega stolpa daljnovoda in je obremenjen centrično preko obeh krakov. Določena je uklonska nosilnost elementa po različnih standardih.

### Podatki:

$$b = h = 150 \text{ mm} \quad t = 7,5 \text{ mm}$$

$$L = l_u = 1500 \text{ mm}$$

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2 \quad G = 80769 \text{ N/mm}^2 \quad f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

---

### Geometrijske karakteristike:

$$A = 2 b t - t^2 = 2 * 150 * 7,5 - 7,5^2 = 2193,75 \text{ mm}^2$$

$$I_{\eta} = 1967945,46 \text{ mm}^4 \quad I_{\xi} = 7825517,58 \text{ mm}^4 \quad I_t = 41132,8 \text{ mm}^4$$

$$\xi_s = 51,673 \text{ mm} \quad \eta_s = 0 \text{ mm} \quad i_s^2 = 7134,375 \text{ mm}^2$$

---

### Kontrola kompaktnosti prereza:

$$\frac{b}{t} = 20 > 15 \quad \psi = 1, \quad k_{\sigma} = 0,43$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{20}{28,4 * 1 * \sqrt{0,43}} = 1,074$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,074 - 0,188}{1,074^2} = 0,768$$

$$b_{\text{eff}} = 0,768 * 150 = 115,2 \text{ mm}$$

$$A_{\text{eff}} = 2 b_{\text{eff}} t - t^2 = 2 * 115,2 * 7,5 - 7,5^2 = 1672,1 \text{ mm}^2$$

$$0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,45 * \sqrt{\frac{210000}{235}} = 13,5 < \frac{b}{t} = 20 \leq 0,91 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,91 * \sqrt{\frac{210000}{235}} = 27,2$$

$$Q = Q_s = 1,340 - 0,76 \left(\frac{b}{t}\right) \sqrt{\frac{f_y}{E}} = 1,340 - 0,76 \left(\frac{150}{7,5}\right) \sqrt{\frac{235}{210000}} = 0,832$$

---

### Kritične uklonske sile:

$$N_{\text{cr},\eta} = \frac{\pi^2 E I_{\eta}}{l_u^2} = \frac{\pi^2 * 210000 * 1967945,46}{1500^2} = 1812798,7 \text{ N}$$

$$N_{cr,\xi} = \frac{\pi^2 E I_{\xi}}{l_u^2} = \frac{\pi^2 * 210000 * 7825517,58}{1500^2} = 7208577,9 \text{ N}$$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_s^2} [G I_t] = \frac{1}{7134,375} [80769 * 41132,8] = 465670,2 \text{ N}$$

$$N_{cr,2} = \frac{1}{2 \left(1 - \frac{\xi_s^2}{i_s^2}\right)} \left[ (N_{cr,\xi} + N_{cr,T}) - \sqrt{(N_{cr,\xi} + N_{cr,T})^2 - 4N_{cr,\xi}N_{cr,T} \left(1 - \frac{\xi_s^2}{i_s^2}\right)} \right] =$$

$$= \frac{1}{2 \left(1 - \frac{51,673^2}{7134,375}\right)} \left[ (7208577,9 + 465670,2) - \sqrt{(7208577,9 + 465670,2)^2 - 4 * 7208577,9 * 465670,2 * \left(1 - \frac{51,673^2}{7134,375}\right)} \right] =$$

$$= 11810058 \text{ N}$$

$$N_{cr,3} = \frac{1}{2 \left(1 - \frac{\xi_s^2}{i_s^2}\right)} \left[ (N_{cr,\xi} + N_{cr,T}) + \sqrt{(N_{cr,\xi} + N_{cr,T})^2 - 4N_{cr,\xi}N_{cr,T} \left(1 - \frac{\xi_s^2}{i_s^2}\right)} \right] =$$

$$= \frac{1}{2 \left(1 - \frac{51,673^2}{7134,375}\right)} \left[ (7208577,9 + 465670,2) + \sqrt{(7208577,9 + 465670,2)^2 - 4 * 7208577,9 * 465670,2 * \left(1 - \frac{51,673^2}{7134,375}\right)} \right] =$$

$$= 454237,3 \text{ N}$$

### A.1: EC3-1-1

Upogibni uklon:

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{1672,1 * 235}{1812798,7}} = 0,466$$

$$\eta = \alpha (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) = 0,34 * (0,466 - 0,2) = 0,090$$

$$\phi = 0,5(1 + \eta + \bar{\lambda}^2) = 0,5 * (1 + 0,090 + 0,466^2) = 0,654$$

$$\chi_F = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,654 + \sqrt{0,654^2 - 0,466^2}} = 0,899$$

Torzijski in torzijsko-upogibni uklon:

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_{T,TF} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr,min}}} = \sqrt{\frac{1672,1 * 235}{454237,25}} = 0,930$$

$$\eta = \alpha (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) = 0,34 * (0,930 - 0,2) = 0,248$$

$$\phi = 0,5(1 + \eta + \bar{\lambda}^2) = 0,5 * (1 + 0,248 + 0,930^2) = 1,057$$

$$\chi_{T,TF} = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,057 + \sqrt{1,057^2 - 0,930^2}} = 0,642$$

$$\chi = \min \left\{ \chi_{T,TF} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,899 \\ 0,642 \end{array} \right. \right. = 0,642$$

$$N_{b,Rd} = \chi A_{eff} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,642 * 1672,1 * \frac{235}{1,0} = \mathbf{252,3 \text{ kN}}$$

### A.2: EC3-3-1

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{1672,1 * 235}{1812798,7}} = 0,466$$

$$0,9 \leq k \leq 1,0$$

$$k = 0,8 + \frac{\bar{\lambda}}{10} = 0,8 + \frac{0,466}{10} = 0,8466 \quad k = 0,9$$

$$\bar{\lambda}_{eff} = k \bar{\lambda} = 0,9 * 0,466 = 0,419$$

$$\eta = \alpha (\bar{\lambda}_{eff} - \bar{\lambda}_0) = 0,34 * (0,419 - 0,2) = 0,0745$$

$$\phi = 0,5(1 + \eta + \bar{\lambda}_{eff}^2) = 0,5 * (1 + 0,0745 + 0,419^2) = 0,625$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_{eff}^2}} = \frac{1}{0,625 + \sqrt{0,625^2 - 0,419^2}} = 0,918$$

$$N_{b,Rd} = \chi A_{eff} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,918 * 1672,1 * \frac{235}{1,0} = \mathbf{360,7 \text{ kN}}$$

### A.3: EC9-1-1

Princip določitve uklonske nosilnosti elementov iz aluminijevih zlitin je uporabljen za jeklen kotni profil. Pri izračunu so zaradi primerjav uporabljene materialne karakteristike jekla.

Upogibni uklon:

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{1672,1 * 235}{1812798,7}} = 0,466$$

$$\eta = \alpha (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) = 0,2 * (0,466 - 0,1) = 0,073$$

$$\phi = 0,5(1 + \eta + \bar{\lambda}^2) = 0,5 * (1 + 0,073 + 0,466^2) = 0,645$$

$$\chi = \chi_F = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,645 + \sqrt{0,645^2 - 0,466^2}} = 0,917$$

$$N_{b,Rd,F} = \chi A_{eff} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,917 * 1672,1 * \frac{235}{1,0} = 360329,0 \text{ N}$$

Torzijski in torzijsko-upogibni uklon:

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_{T,TF} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr,min}}} = \sqrt{\frac{2193,75 * 235}{454237,25}} = 1,065$$

$$\eta = \alpha (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) = 0,2 * (1,065 - 0,6) = 0,093$$

$$\phi = 0,5(1 + \eta + \bar{\lambda}^2) = 0,5 * (1 + 0,093 + 1,065^2) = 1,114$$

$$\chi = \chi_{T,TF} = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,114 + \sqrt{1,114^2 - 1,065^2}} = 0,695$$

$$N_{b,Rd,T,TF} = \chi A \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,695 * 2193,75 * \frac{235}{1,0} = 358294,2 \text{ N}$$

$$N_{b,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} N_{b,Rd,F} \\ N_{b,Rd,F,TF} \end{array} \right. = \min \left\{ \begin{array}{l} 360329,0 \\ 358294,2 \end{array} \right. = \mathbf{358,3 \text{ kN}}$$

#### A.4: AISC

Upogibni uklon:

$$r = \sqrt{\frac{I_\eta}{A}} = \sqrt{\frac{1967945,46}{2193,75}} = 29,95 \text{ mm}$$

$$\lambda_c = \frac{l_u}{r} \pi \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{1500}{29,95 * \pi} \sqrt{\frac{235}{210000}} = 0,533$$

$$\lambda_c \sqrt{Q} = 0,533 * \sqrt{0,832} = 0,486 \leq 1,5$$

$$F_{cr,F} = Q(0,658^{Q \lambda_c^2}) f_y = 0,832 * (0,658^{0,832 * 0,533^2}) * 235 = 177,1 \text{ N/mm}^2$$

Torzijski in torzijsko-upogibni uklon

$$r_x = \sqrt{\frac{I_\xi}{A}} = \sqrt{\frac{7825517,58}{2193,75}} = 59,726 \text{ mm}$$

$$F_{ex} = \frac{\pi^2 E}{l_{u,x}^2 / r_x^2} = \frac{\pi^2 210000}{1500^2 / 59,726^2} = 3285,97 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{ez} = G J \frac{1}{A_g \bar{r}_0^2} = 80769 * 41132,8 \frac{1}{2193,75 * 7134,375} = 212,27 \text{ N/mm}^2$$

$$H = 1 - \left( \frac{x_0^2 + y_0^2}{\bar{r}_0^2} \right) = 1 - \left( \frac{\xi_s^2 + \eta_s^2}{i_s^2} \right) = 1 - \left( \frac{51,673^2 + 0^2}{7134,375} \right) = 0,626$$

$$F_e = \frac{F_{ex} + F_{ez}}{2H} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4 F_{ex} F_{ez} H}{(F_{ex} + F_{ez})^2}} \right) =$$
$$= \frac{3285,97 + 212,27}{2 * 0,626} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4 * 3285,97 * 212,27 * 0,626}{(3285,97 + 212,27)^2}} \right) = 207,06 \text{ N/mm}^2$$

$$\lambda_e = \sqrt{\frac{f_y}{F_e}} = \sqrt{\frac{235}{207,06}} = 1,065$$

$$Q = Q_s = 0,832$$

$$\lambda_e \sqrt{Q} = 1,065 * \sqrt{0,832} = 0,971 \leq 1,5$$

$$F_{cr,T,TF} = Q(0,658^{Q\lambda_e^2})f_y = 0,832 * (0,658^{0,832*1,065^2}) * 235 = 131,7 \text{ N/mm}^2$$

Za razmerja  $b/t \leq 20$  se upošteva samo upogibni uklon, zato je:  $F_{cr} = F_{cr,F} = 177,1 \text{ N/mm}^2$

$$P_n = A_g F_{cr} = 2193,75 * 177,1 = \mathbf{388,5 \text{ kN}}$$

»Ta stran je namenoma prazna.«



## **PRILOGA B: IZRAČUN UKLONSKE NOSILNOSTI EKSCENTRIČNO OBREMENJENEGA KOTNIKA**

Obravnavan je 1500 milimetrov dolg jekleni profil s prečnim prerezom enakokrakega kotnika. Dimenzije prečnega prereza so podane v podatkih. Kotnik predstavlja diagonalo paličnega stolpa daljnovoda in je na obeh straneh obremenjen ekscentrično preko enega krakov. Spoji preko katerih je kotnik povezan z ostalimi elementi so na obeh straneh izvedeni členkasto s samo enim ali z vsaj dvema vijakoma. Določena je uklonska nosilnost elementa po različnih standardih.

### **Podatki:**

$$b = h = 150 \text{ mm} \quad t = 7,5 \text{ mm}$$

$$L = 1500 \text{ mm} \quad l_u = 1500 \text{ mm}$$

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2 \quad G = 80769 \text{ N/mm}^2 \quad f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

### **Geometrijske karakteristike:**

$$A = 2 b t - t^2 = 2 * 150 * 7,5 - 7,5^2 = 2193,75 \text{ mm}^2$$

$$W_{y,\text{eff}} = W_{z,\text{eff}} = 25956 \text{ mm}^3 \quad W_{\eta,\text{eff}} = 7402,2 \text{ mm}^3 \quad W_{\xi,\text{eff}} = 42551,3 \text{ mm}^3$$

$$W_{\xi,\text{el}} = 73776,9 \text{ mm}^3$$

$$I_y = I_z = 4896731,52 \text{ mm}^4 \quad I_{\eta} = 1967945,46 \text{ mm}^4 \quad I_{\xi} = 7825517,58 \text{ mm}^4$$

$$I_t = 41132,8 \text{ mm}^4$$

$$\xi_s = 51,673 \text{ mm} \quad \eta_s = 0 \text{ mm} \quad i_{\xi}^2 = 7134,375 \text{ mm}^2$$

$$e_{Ny} = 36,54 \text{ mm} \quad e_{Nz} = 34,71 \text{ mm} \quad e_{N\eta} \approx 0 \text{ mm} \quad e_{N\xi} = 50,38 \text{ mm}$$

### **Kontrola kompaktnosti prereza:**

$$\frac{b}{t} = 20 > 15 \quad \psi = 1, \quad k_{\sigma} = 0,43$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{20}{28,4 * 1 * \sqrt{0,43}} = 1,074$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,074 - 0,188}{1,074^2} = 0,768$$

$$b_{\text{eff}} = 0,768 * 150 = 115,2 \text{ mm}$$

$$A_{\text{eff}} = 2 b_{\text{eff}} t - t^2 = 2 * 115,2 * 7,5 - 7,5^2 = 1672,1 \text{ mm}^2$$

$$0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,45 * \sqrt{\frac{210000}{235}} = 13,5 < \frac{b}{t} = 20 \leq 0,91 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,91 * \sqrt{\frac{210000}{235}} = 27,2$$

$$Q = Q_s = 1,340 - 0,76 \left(\frac{b}{t}\right) \sqrt{\frac{f_y}{E}} = 1,340 - 0,76 \left(\frac{150}{7,5}\right) \sqrt{\frac{235}{210000}} = 0,832$$

**Kritične uklonske sile:**

$$N_{cr,y} = N_{cr,z} = \frac{\pi^2 E I_z}{l_u^2} = \frac{\pi^2 * 210000 * 4896731,52}{1500^2} = 4510688,3 \text{ N}$$

$$N_{cr,\eta} = \frac{\pi^2 E I_\eta}{l_u^2} = \frac{\pi^2 * 210000 * 1967945,46}{1500^2} = 1812798,7 \text{ N}$$

$$N_{cr,\xi} = \frac{\pi^2 E I_\xi}{l_u^2} = \frac{\pi^2 * 210000 * 7825517,58}{1500^2} = 7208577,9 \text{ N}$$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_s^2} [G I_t] = \frac{1}{7134,375} [80769 * 41132,8] = 465670,2 \text{ N}$$

$$N_{cr,2} = \frac{1}{2 \left(1 - \frac{\xi_s^2}{i_s^2}\right)} \left[ (N_{cr,\xi} + N_{cr,T}) - \sqrt{(N_{cr,\xi} + N_{cr,T})^2 - 4N_{cr,\xi}N_{cr,T} \left(1 - \frac{\xi_s^2}{i_s^2}\right)} \right] =$$

$$= \frac{1}{2 \left(1 - \frac{51,673^2}{7134,375}\right)} \left[ (7208577,9 + 465670,2) - \sqrt{(7208577,9 + 465670,2)^2 - 47208577,9 * 465670,2 * \left(1 - \frac{51,673^2}{7134,375}\right)} \right]$$

$$= 11810058 \text{ N}$$

$$N_{cr,3} = \frac{1}{2 \left(1 - \frac{\xi_s^2}{i_s^2}\right)} \left[ (N_{cr,\xi} + N_{cr,T}) + \sqrt{(N_{cr,\xi} + N_{cr,T})^2 - 4N_{cr,\xi}N_{cr,T} \left(1 - \frac{\xi_s^2}{i_s^2}\right)} \right] =$$

$$= \frac{1}{2 \left(1 - \frac{51,673^2}{7134,375}\right)} \left[ (7208577,9 + 465670,2) + \sqrt{(7208577,9 + 465670,2)^2 - 47208577,9 * 465670,2 * \left(1 - \frac{51,673^2}{7134,375}\right)} \right]$$

$$= 454237,25 \text{ N}$$

**Kritični momenti bočne zvrnitve:**

$$M_{cr,z} = \frac{\pi}{L} \sqrt{E I_z G I_t} = \frac{\pi}{1500} \sqrt{210000 * 4896731,52 * 80769 * 41132,8} = 122415919 \text{ Nmm}$$

$$M_{cr,\eta} = \frac{\pi}{L} \sqrt{E I_\eta G I_t} = \frac{\pi}{1500} \sqrt{210000 * 1967945,46 * 80769 * 41132,8} = 77605281,75 \text{ Nmm}$$

### B.1: EC3-1-1

Spoji preko enega vijaka (členkasta povezava) in dveh vijakov (toga povezava):

Upogibni uklon:

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_y}{N_{\text{cr}}}} = \sqrt{\frac{1672,1 * 235}{1812798,7}} = 0,466$$

$$\eta = \alpha (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) = 0,34 * (0,466 - 0,2) = 0,090$$

$$\phi = 0,5(1 + \eta + \bar{\lambda}^2) = 0,5 * (1 + 0,090 + 0,466^2) = 0,654$$

$$\chi_F = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,654 + \sqrt{0,654^2 - 0,466^2}} = 0,899$$

Torzijski in torzijsko-upogibni uklon:

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_{T,TF} = \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_y}{N_{\text{cr,min}}}} = \sqrt{\frac{1672,1 * 235}{454237,25}} = 0,930$$

$$\eta = \alpha (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) = 0,34 * (0,930 - 0,2) = 0,248$$

$$\phi = 0,5(1 + \eta + \bar{\lambda}^2) = 0,5 * (1 + 0,248 + 0,930^2) = 1,057$$

$$\chi_{T,TF} = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,057 + \sqrt{1,057^2 - 0,930^2}} = 0,642$$

$$\chi = \min \left\{ \begin{array}{l} \chi_F \\ \chi_{T,TF} \end{array} \right. = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,899 \\ 0,642 \end{array} \right. = 0,642$$

Bočna zvrnitev v interakciji z uklonom okoli geometrijske osi:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{y,\text{eff}} f_y}{M_{\text{cr,z}}}} = \sqrt{\frac{25956 * 235}{122415919}} = 0,223 \quad \chi_{LT} = 1$$

Interakcija osne sile in upogibnih momentov:

$$\frac{N_{\text{Ed}}}{\chi A_{\text{eff}} f_y / \gamma_{M1}} + \frac{e_{Nz} N_{\text{Ed}}}{\chi_{LT} W_{y,\text{eff}} / \gamma_{M1}} + \frac{e_{Ny} N_{\text{Ed}}}{W_{z,\text{eff}} / \gamma_{M1}} \leq 1,0$$

$$N_{\text{Ed}} \leq \frac{1}{\frac{1}{\chi A_{\text{eff}} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{e_{Nz}}{\chi_{LT} W_{y,\text{eff}} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{e_{Ny}}{W_{z,\text{eff}} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{0,642 * 1672,1 * 235} + \frac{34,71}{1 * 25956 * 235} + \frac{36,54}{25956 * 235}} = 63918,2 \text{ N}$$

Bočna zvrnitev v interakciji z uklonom okoli glavne osi:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{\xi,eff} f_y}{M_{cr,\eta}}} = \sqrt{\frac{42551,3 * 235}{77605281,75}} = 0,359 \quad \chi_{LT} = 1$$

Interakcija osne sile in upogibnega momenta:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi A_{eff} f_y / \gamma_{M1}} + \frac{e_{N\xi} N_{Ed}}{\chi_{LT} W_{\xi,eff} / \gamma_{M1}} \leq 1,0$$

$$N_{Ed} \leq \frac{1}{\frac{1}{\chi A_{eff} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{e_{N\xi}}{\chi_{LT} W_{\xi,eff} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,642 * 1672,1 * 235} + \frac{50,38}{1 * 42551,3 * 235}} = 111084 \text{ N}$$

$$N_{Ed} \leq \min \begin{cases} 63918,2 \\ 111084 \end{cases} \text{ N} = \mathbf{63,9 \text{ kN}}$$

## B.2: EC3-3-1

Spoji preko enega vijaka (členkasta povezava):

Uklon okoli šibke osi:

$$\bar{\lambda}_{\eta} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr,\eta}}} = \sqrt{\frac{1672,1 * 235}{1812798,7}} = 0,466$$

$$k = 0,7 + \frac{0,35}{\bar{\lambda}_{\eta}} = 0,7 + \frac{0,35}{0,466} = 1,45$$

$$\bar{\lambda}_{eff,\eta} = k \bar{\lambda}_{\eta} = 1,45 * 0,466 = 0,676$$

$$\eta = \alpha (\bar{\lambda}_{eff,\eta} - \bar{\lambda}_0) = 0,34 * (0,676 - 0,2) = 0,162$$

$$\phi = 0,5(1 + \eta + \bar{\lambda}_{eff,\eta}^2) = 0,5 * (1 + 0,162 + 0,676^2) = 0,809$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_{eff,\eta}^2}} = \frac{1}{0,809 + \sqrt{0,809^2 - 0,676^2}} = 0,798$$

$$N_{b,Rd,\eta} = \eta \chi A_{eff} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,8 * 0,798 * 1672,1 * \frac{235}{1,0} = \mathbf{250855 \text{ N}}$$

Uklon okoli geometrijske osi:

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{1672,1 * 235}{4510688,3}} = 0,295$$

$$k = 0,7 + \frac{0,58}{\bar{\lambda}_z} = 0,7 + \frac{0,58}{0,295} = 2,666$$

$$\bar{\lambda}_{eff,z} = k \bar{\lambda}_z = 2,666 * 0,295 = 0,787$$

$$\eta = \alpha (\bar{\lambda}_{\text{eff},z} - \bar{\lambda}_0) = 0,34 * (0,787 - 0,2) = 0,2$$

$$\phi = 0,5(1 + \eta + \bar{\lambda}_{\text{eff}}^2) = 0,5 * (1 + 0,2 + 0,787^2) = 0,909$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_{\text{eff}}^2}} = \frac{1}{0,909 + \sqrt{0,909^2 - 0,787^2}} = 0,733$$

$$N_{b,Rd,z} = \eta \chi A_{\text{eff}} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,8 * 0,733 * 1672,1 * \frac{235}{1,0} = \mathbf{230422 \text{ N}}$$

$$N_{b,Rd} = \min \begin{cases} N_{b,Rd,\eta} \\ N_{b,Rd,z} \end{cases} = \min \begin{cases} 250855 \\ 230422 \end{cases} = \mathbf{230,4 \text{ kN}}$$

Spoji preko dveh vijakov (toga povezava):

Uklon okoli šibke osi:

$$\bar{\lambda}_\eta = \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_y}{N_{cr,\eta}}} = \sqrt{\frac{1672,1 * 235}{1812798,7}} = 0,466$$

$$k = 0,7 + \frac{0,35}{\bar{\lambda}_\eta} = 0,7 + \frac{0,35}{0,466} = 1,45$$

$$\bar{\lambda}_{\text{eff}} = k \bar{\lambda}_\eta = 1,45 * 0,466 = 0,676$$

$$\eta = \alpha (\bar{\lambda}_{\text{eff},\eta} - \bar{\lambda}_0) = 0,34 * (0,676 - 0,2) = 0,162$$

$$\phi = 0,5(1 + \eta + \bar{\lambda}_{\text{eff},\eta}^2) = 0,5 * (1 + 0,162 + 0,676^2) = 0,809$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_{\text{eff},\eta}^2}} = \frac{1}{0,809 + \sqrt{0,809^2 - 0,676^2}} = 0,798$$

$$N_{b,Rd,\eta} = \eta \chi A_{\text{eff}} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 1 * 0,798 * 1672,1 * \frac{235}{1,0} = \mathbf{313569 \text{ N}}$$

Uklon okoli geometrijske osi:

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{1672,1 * 235}{4510688,3}} = 0,295$$

$$k = 0,7 + \frac{0,4}{\bar{\lambda}_z} = 0,7 + \frac{0,4}{0,295} = 2,056$$

$$\bar{\lambda}_{\text{eff},z} = k \bar{\lambda}_z = 2,056 * 0,295 = 0,606$$

$$\eta = \alpha (\bar{\lambda}_{\text{eff},z} - \bar{\lambda}_0) = 0,34 * (0,606 - 0,2) = 0,138$$

$$\phi = 0,5(1 + \eta + \bar{\lambda}_{\text{eff},z}^2) = 0,5 * (1 + 0,138 + 0,606^2) = 0,753$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_{\text{eff},z}^2}} = \frac{1}{0,753 + \sqrt{0,753^2 - 0,606^2}} = 0,833$$

$$N_{b,Rd,z} = \eta \chi A_{\text{eff}} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 1 * 0,833 * 1672,1 * \frac{235}{1,0} = \mathbf{327322 \text{ N}}$$

$$N_{b,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} N_{b,Rd,\eta} \\ N_{b,Rd,z} \end{array} \right. = \min \left\{ \begin{array}{l} 313569 \\ 327322 \end{array} \right. = \mathbf{313,6 \text{ kN}}$$

### B.3: EC9-1-1

Princip določitve uklonske nosilnosti elementov iz aluminijevih zlitin je uporabljen za jeklen kotni profil. Pri izračunu so zaradi primerjav uporabljene so materialne karakteristike jekla.

Spoji preko enega vijaka (členkasta povezava) in dveh vijakov (toga povezava):

Upogibni uklon:

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_y}{N_{\text{cr}}}} = \sqrt{\frac{1672,1 * 235}{1812798,7}} = 0,466$$

$$\eta = \alpha (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) = 0,2 * (0,466 - 0,1) = 0,073$$

$$\phi = 0,5(1 + \eta + \bar{\lambda}^2) = 0,5 * (1 + 0,073 + 0,466^2) = 0,645$$

$$\chi = \chi_F = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,645 + \sqrt{0,645^2 - 0,466^2}} = 0,917$$

$$N_{b,Rd,F} = \chi A_{\text{eff}} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,917 * 1672,1 * \frac{235}{1,0} = 360329,0 \text{ N}$$

Torzijski in torzijsko-upogibni uklon:

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_{T,TF} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{\text{cr},\text{min}}}} = \sqrt{\frac{2193,75 * 235}{454237,25}} = 1,065$$

$$\eta = \alpha (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) = 0,2 * (1,065 - 0,6) = 0,093$$

$$\phi = 0,5(1 + \eta + \bar{\lambda}^2) = 0,5 * (1 + 0,093 + 1,065^2) = 1,114$$

$$\chi = \chi_{T,TF} = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,114 + \sqrt{1,114^2 - 1,065^2}} = 0,695$$

$$N_{b,Rd,T,TF} = \chi A \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,695 * 2193,75 * \frac{235}{1,0} = 358294,2 \text{ N}$$

$$N_{b,Rd} = \min \left\{ 0,4 N_{b,Rd,F}, N_{b,Rd,F,TF} \right\} = \min \left\{ 144132, 358294,2 \right\} = \mathbf{144,1 \text{ kN}}$$

#### B.4: AISC

Spoji preko enega vijaka (členkasta povezava):

Upogibni uklon:

$$r = \sqrt{\frac{I_{\eta}}{A}} = \sqrt{\frac{1967945,46}{2193,75}} = 29,95 \text{ mm}$$

$$\lambda_c = \frac{l_u}{r} \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{1500}{29,95 * \pi} \sqrt{\frac{235}{210000}} = 0,533$$

$$\lambda_c \sqrt{Q} = 0,533 * \sqrt{0,832} = 0,486 \leq 1,5$$

$$F_{cr,F} = Q(0,658^{Q \lambda_c^2}) f_y = 0,832 * (0,658^{0,832 * 0,533^2}) * 235 = 177,1 \text{ N/mm}^2$$

Torzijski in torzijsko-upogibni uklon

$$r_x = \sqrt{\frac{I_{\xi}}{A}} = \sqrt{\frac{7825517,58}{2193,75}} = 59,726 \text{ mm}$$

$$F_{ex} = \frac{\pi^2 E}{l_{u,x}^2 / r_x^2} = \frac{\pi^2 210000}{1500^2 / 59,726^2} = 3285,97 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{ez} = G J \frac{1}{A_g \bar{r}_0^2} = 80769 * 41132,8 \frac{1}{2193,75 * 7134,375} = 212,27 \text{ N/mm}^2$$

$$H = 1 - \left( \frac{x_0^2 + y_0^2}{\bar{r}_0^2} \right) = 1 - \left( \frac{\xi_s^2 + \eta_s^2}{i_s^2} \right) = 1 - \left( \frac{51,673^2 + 0^2}{7134,375} \right) = 0,626$$

$$F_e = \frac{F_{ex} + F_{ez}}{2H} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4 F_{ex} F_{ez} H}{(F_{ex} + F_{ez})^2}} \right) =$$

$$= \frac{3285,97 + 212,27}{2 * 0,626} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4 * 3285,97 * 212,27 * 0,626}{(3285,97 + 212,27)^2}} \right) = 207,06 \text{ N/mm}^2$$

$$\lambda_e = \sqrt{\frac{f_y}{F_e}} = \sqrt{\frac{235}{207,06}} = 1,065$$

$$Q = Q_s = 0,832$$

$$\lambda_e \sqrt{Q} = 1,065 * \sqrt{0,832} = 0,971 \leq 1,5$$

$$F_{cr,T,TF} = Q(0,658 Q \lambda_e^2) f_y = 0,832 * (0,658^{0,832 * 1,065^2}) * 235 = 131,7 \text{ N/mm}^2$$

Za razmerja  $b/t \leq 20$  se upošteva samo upogibni uklon, zato je:

$$F_{cr} = F_{cr,F} = 177,1$$

$$P_n = A_g F_{cr} = 2193,75 * 177,1 = 388,5 \text{ kN}$$

$$\frac{P_u}{P_n} + \frac{8}{9} \frac{M_{u\xi}}{M_{n\xi}} \leq 1,0$$

Kontrola plastifikacije prereza:

$$M_n = 1,5 M_y = 1,5 * 73776,9 * 235 = 26006357,3 \text{ Nmm}$$

Kontrola bočne zvrnitve:

$$M_e = \frac{0,46 E b^2 t^2}{L} = \frac{0,46 * 210000 * 150^2 * 7,5^2}{1500} = 81506250 \text{ Nmm}$$

$$M_n = \left( 1,92 - 1,17 \sqrt{\frac{M_y}{M_e}} \right) M_y = \left( 1,92 - 1,17 \sqrt{\frac{17337571,5}{81506250}} \right) * 17337571,5 = 23932512,3 \text{ Nmm}$$

Kontrola lokalnega uklona:

$$M_n = F_y S_c \left( 2,43 - 1,72 \left( \frac{b}{t} \right) \sqrt{\frac{F_y}{E}} \right) = 235 * 73776,9 * \left( 2,43 - 1,72 \left( \frac{150}{7,5} \right) \sqrt{\frac{235}{210000}} \right) \\ = 22179008,3 \text{ Nmm}$$

$$M_n = \min \begin{cases} 26006357,3 \\ 23932512,3 \text{ Nmm} \\ 22179008,3 \end{cases} \quad M_n = 22179008,3 \text{ kNmm}$$

$$P_u \leq \frac{1}{\frac{1}{P_n} + \frac{e_{N,\xi}}{M_n}} = \frac{1}{\frac{1}{388,5} + \frac{8}{9} \frac{50,38}{22179}} = 217,7 \text{ kN}$$



Spoji preko dveh vijakov (toga povezava):

Upogibni uklon:

$$r_x = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{4896731,52}{2193,75}} = 47,25 \text{ mm}$$

$$\frac{L}{r_x} = \frac{1500}{47,25} = 31,75 \leq 80 \qquad \frac{KL}{r} = 72 + 0,75 * 31,75 = 95,81$$

$$\lambda_c = \frac{KL}{r} \frac{f_y}{\pi \sqrt{E}} = \frac{95,81}{\pi} \sqrt{\frac{235}{210000}} = 1,02$$

$$\lambda_c \sqrt{Q} = 1,02 * \sqrt{0,832} = 0,930 \leq 1,5$$

$$F_{cr,F} = Q(0,658^{Q\lambda_c^2}) f_y = 0,832 * (0,658^{0,832*1,02^2}) * 235 = 136,1 \text{ N/mm}^2$$

Torzijski in torzijsko-upogibni uklon

$$r_x = \sqrt{\frac{I_\xi}{A}} = \sqrt{\frac{7825517,58}{2193,75}} = 59,726 \text{ mm}$$

$$F_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(KL)^2 / r_x^2} = \frac{\pi^2 * 210000}{1500^2 / 59,726^2} = 3285,97 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{ez} = G J \frac{1}{A_g \bar{r}_0^2} = 80769 * 41132,8 \frac{1}{2193,75 * 7134,375} = 212,27 \text{ N/mm}^2$$

$$H = 1 - \left( \frac{x_0^2 + y_0^2}{\bar{r}_0^2} \right) = 1 - \left( \frac{\xi_s^2 + \eta_s^2}{i_s^2} \right) = 1 - \left( \frac{51,673^2 + 0^2}{7134,375} \right) = 0,626$$

$$F_e = \frac{F_{ex} + F_{ez}}{2H} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4 F_{ex} F_{ez} H}{(F_{ex} + F_{ez})^2}} \right) =$$

$$= \frac{3285,97 + 212,27}{2 * 0,626} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4 * 3285,97 * 212,27 * 0,626}{(3285,97 + 212,27)^2}} \right) = 207,06 \text{ N/mm}^2$$

$$\lambda_e = \sqrt{\frac{f_y}{F_e}} = \sqrt{\frac{235}{207,06}} = 1,065$$

$$Q = Q_s = 0,832$$

$$\lambda_e \sqrt{Q} = 1,065 * \sqrt{0,832} = 0,971 \leq 1,5$$

$$F_{cr,T,TF} = Q(0,658^{Q\lambda_e^2})f_y = 0,832 * (0,658^{0,832*1,065^2}) * 235 = 131,7 \text{ N/mm}^2$$

Za razmerja  $b/t \leq 20$  se upošteva samo upogibni uklon, zato je:

$$F_{cr} = F_{cr,F} = 136,1 \text{ N/mm}^2$$

$$P_n = A_g F_{cr} = 2193,75 * 136,1 = \mathbf{298,6 \text{ kN}}$$