

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Visokošolski strokovni študij
gradbeništva, Konstrukcijska smer

Kandidat:

Darko Kovačič

**NOSILNOST JEKLENIH NOSILCEV Z
ODPRTINAMI V STOJINI IN JEKLENIH
SATASTIH NOSILCEV**

Diplomska naloga št.: 383

Mentor:
prof. dr. Jože Korelc

Somentor:
Teja Melink

Ljubljana, 2010

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **DARKO KOVAČIČ** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:

**»NOSILNOST JEKLENIH NOSILCEV Z ODPRTINAMI V STOJINI IN JEKLENIH
SATASTIH NOSILCEV«.**

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske
separatoteke FGG.

Ljubljana, 01.06.2010

(podpis)

IZJAVE O PREGLEDU NALOGE

Nalogo so si ogledali učitelji konstrukcijske smeri:

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	004.42:624.014.2:624.072.2(043.2)
Avtor:	Darko Kovačič
Mentor:	izr. prof. dr. Jože Korelc
Somentor:	Teja Melink, univ.dipl.inž.gradb.
Naslov:	Nosilnost jeklenih nosilcev z odprtinami v stojini in jeklenih satastih nosilcev
Obseg in oprema:	162 str., 10 pregl., 93 sl., 170 en.
Ključne besede:	nosilci z odprtinami, satasti nosilci, dimenzioniranje, bočna zvrnitev, napredni računalniški program

Izvleček

V diplomskem delu je predstavljeno dokazovanje upogibne in strižne nosilnosti za jeklene nosilce z odprtinami v stojini in za jeklene sataste nosilce. Dimenzioniranje takih nosilcev se izvaja v skladu s splošnimi pravili Evrokoda za dimenzioniranje nosilcev z upoštevanjem posebnosti nosilcev z odprtinami ali pa z nelinearno prostorsko analizo z upoštevanjem imperfektnosti. Za razmejitve nosilcev z odprtinami od satastih nosilcev se uporabljajo geometrijski kriteriji. Od teh geometrijskih razmejitev je odvisen nadaljni pristop k dimenzioniranju nosilcev z odprtinami, oziroma satastih nosilcev. Nosilnost pri bočni zvrnitvi pri satastih nosilcih in pri nosilcih z odprtinami se dokazuje enako kot pri polnostenskih nosilcih z upoštevanjem geometrijskih in statičnih karakteristik prečnega prereza na mestu odprtine.

Z uporabo naprednih računalniških programov je mogoče natančneje določiti obnašanje nosilcev z odprtinami, kot z uporabo uveljavljenih metod po Evrokodu, zato je bil za diplomsko nalogo narejen program AceGirder, v katerem je možna izbira med satastimi nosilci, nosilci z enojno odprtino in nosilci z večimi odprtinami. S programom se dela statično analizo pri dani obtežbi, analizo mejne nosilnosti in stabilnostno analizo.

BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 004.42:624.014.2:624.072.2(043.2)
Author: Darko Kovačič
Supervisor: assoc. prof. dr. Jože Korelc
Co-supervisor: Teja Melink, C.E.
Title: Resistance of steel beams with web openings and castellated beams
Notes: 162 p., 10 tab., 93 fig., 170 eq.
Key words: beams with openings, castellated beams, design, lateral torsional buckling, advanced computer software

Abstract

In Diploma demonstration of bending and shear resistance of steel beams with openings in web and for castellated beams is being presented. Dimensioning of such beams is performed in compliance with general rules by Eurocode for dimensioning of beams by considering speciality of beams with openings or by non-linear analysis with consideration of imperfections. For delimit of beams with openings from castellated beams, geometric criteria are being used. Further approach to the dimensioning of these two types of beams depends on mentioned geometric delimitations. Resistance to lateral torsional buckling, for castellated beams and beams with openings, is demonstrated in the same way as solid web beams, by taking geometric and static characteristics of the cross-sectional area at the place opening into account.

It is possible to more accurately determine the behaviour of beams with openings by using advanced computer software than by already established methods by Eurocodes. For the purpose of the Diploma a program »AceGirder« had been written, in which the user can choose from different types of beams, such as castellated beams and beams with a single or multiple openings. Software carries out a statistic analysis at a given load, analysis of the limit load and stability.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Jožetu Korelcu in somentorici Teji Melink, univ.dipl.inž.gradb.

Posebna zahvala gre tudi družini, ki mi je omogočila študij in me podpirala vsa leta v celotnem času študija.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	NOSILCI Z ODPRTINAMI	2
2.1	Predstavitev nosilcev z odprtinami	2
2.2	Stojina z odprtinami.....	4
2.3	Razponi nosilcev z odprtinami in njihovo načrtovanje	5
2.4	Višina mednadstropne konstrukcije	6
2.5	Opcije izbire dovodnih vodov	7
2.6	Tipični vgrajeni vodi v odprtinah stojin	8
2.7	Prednosti krožnih vodov v primerjavi s pravokotnimi	9
2.8	Požarna zaščita nosilcev z odprtinami	10
3	SPLOŠNI PRINCIPI K ANALIZI NOSILCEV Z ODPRTINAMI	12
3.1	Metode dokazovanja nosilnosti pri nosilcih z odprtinami	12
3.2	Vpliv odprtín v stojini na metode analiz.....	12
3.3	Načini porušitev zaradi odprtín v stojini.....	13
3.4	Načini porušitve satastih nosilcev	13
3.5	Predstavitev načinov porušitev stojin z odprtinami	14
3.5.1	Vierendeelov ali strižni mehanizem	14
3.5.2	Mehanizem upogibnega uklona.....	15
3.5.3	Bočna zvrnitev nosilca.....	15
3.5.4	Porušitev varjenih stikov polnih delov stojin	15
3.5.5	Lokalno izbočenje polnega dela stojine pod koncentrirano obtežbo.....	16
3.5.6	Lokalna izbočitev polnega dela stojine z odprtinami	16
3.5.6.1	Model za izračun izbočitev polnega dela stojine med odprtinami.....	17
4	GEOMETRIJA ODPRTIN V STOJINI	19
5	RAČUNSKI MODELI	22
6	RAZVRSTITEV PREREZOV	25
6.1	Uvod.....	25
6.2	Razvrstitev prečnih prerezov brez odprtín	25
6.3	Razvrstitev prečnih prerezov z odprtino	26
6.3.1	Efektivna dolžina odprtine	26
6.3.2	Klasifikacija pasnice.....	28

6.3.3	Klasifikacija stojine.....	28
6.4	Efektivna dolžina odprtine za Vierendeelov moment	29
7	PROJEKTNO VODILO ZA STOJINE Z LOKALNIMI ODPRTINAMI.....	30
7.1	Nosilnost odprtin brez ojačitev med stojinami	30
7.2	Pozicije in dimenzije odprtin.....	30
7.3	Kontrola vnosa koncentrirane sile	32
7.4	Strižna nosilnost prereza z odprtino.....	34
7.4.1	Kontrola strižne nosilnosti prereza z odprtino	34
7.4.1.1	Kontrola strižne nosilnosti prereza s pravokotno odprtino.....	35
7.4.1.2	Kontrola strižne nosilnosti prereza z okroglo odprtino	35
7.4.2	Projektna nosilnost stojine odprtine pri lokalni izbočitvi.....	36
7.4.3	Kontrola strižne nosilnosti prečnega prereza z odprtino.....	36
7.5	Upogibna nosilnost prereza z odprtino	37
7.5.1	Kontrola upogibne nosilnosti prereza z odprtino	37
7.5.1.1	Kontrola upogibne nosilnosti prereza s pravokotno odprtino	37
7.5.1.2	Kontrola upogibne nosilnosti prereza z okroglo odprtino.....	38
8	SATASTI NOSILCI	40
8.1	Razvoj satastih nosilcev skozi zgodovino	40
8.2	Razvoj proizvodne tehnologije	41
8.3	Prednosti satastih nosilcev	42
8.4	Slabosti satastih nosilcev	42
8.5	Uporaba satastih nosilcev	43
8.6	Satasti nosilci s heksagonalnimi in povišanimi oktagonalnimi odprtini.....	50
8.6.1	Kot izreza pri satastih nosilcih s heksagonalnimi odprtini.....	51
8.6.2	Različni zaključki satastih nosilcev s heksagonalnimi odprtini	52
8.7	Satasti nosilci z okroglimi odprtini in povišanimi okroglimi odprtini	53
8.7.1	Izbira premera in razmaka med okroglimi odprtini	55
8.7.2	Primerjava satastih nosilcev z okroglimi in heksagonalnimi odprtini	55
8.8	Statična presoja satastega nosilca	56
8.8.1	Splošno o statični analizi satastega nosilca.....	56
8.8.2	Analiza in načrtovanje satastih nosilcev	57
8.8.2.1	Geometrijski pogoji za sataste nosilce	57
8.8.2.2	Dimenzije in razpored odprtin pri satastih nosilcih.....	60
8.8.3	Kontrole nosilnosti za MSN.....	61
8.9	Kontrola nosilnosti prečnega prereza na mestu odprtine.....	62
8.9.1	Poligonalne odprtine	62

8.9.1.1	Kontrola osne nosilnosti T prereza	62
8.9.1.2	Kontrola strižne nosilnosti T prereza	63
8.9.1.3	Kontrola nosilnosti T prereza zaradi interakcije delovanja M-V-N.....	63
8.9.1.4	Kontrola upogibne nosilnosti T prereza	64
8.9.2	Krožne odprtine.....	65
8.10	Kontrola nosilnosti polnega prereza stojine med odprtini	67
8.10.1	Splošno o nosilnosti polnega prereza stojine	67
8.10.2	Kontrola upogibne nosilnosti polnega prereza stojine med odprtini.....	67
8.10.3	Kontrola strižne nosilnosti prereza polne stojine med odprtini.....	68
8.11	Varilna procedura pri satastih nosilcih	69
8.12	Primer tabel za sataste nosilce z okroglimi odprtini	71
8.13	Analize nosilnosti satastih nosilcev	72
8.14	Izbira vzdolžnega profila	73
8.14.1	Ukrivljeni satasti nosilci.....	73
8.14.2	Satasti nosilci s spremenljivim prečnim prerezom	75
8.14.3	Podolgovate odprtine.....	76
8.14.4	Asimetrični nosilci	77
8.14.5	Angelina nosilec	78
9	OJAČITEV ODPRTIN V STOJINI.....	82
9.1	Tipi ojačitev odprtini.....	82
9.2	Ojačitev polnega dela stojine pri satastih nosilcih in nosilcih s posameznimi odprtini.....	83
9.3	Zapolnitev odprtini v stojini z diski	84
9.4	Okrogle ojačitve.....	85
9.5	Kontrola izbočenja tlačene pasnice v ravnini stojine	86
9.6	Vzdolžne ojačitve.....	86
9.6.1	Podpiranje koncentrirane obremenitve pri satastih nosilcih.....	88
9.7	Prečne ojačitve	88
9.8	Kontrola nosilnosti prereza odprtine z vzdolžno ojačitvijo	88
9.8.1	Kontrola strižne nosilnosti prereza z ojačitvijo pravokotne odprtine	88
9.8.2	Kontrola strižne nosilnosti prereza z ojačitvijo okrogle odprtine	89
9.8.3	Kontrola upogibne nosilnosti prereza z ojačitvijo odprtine	89
9.9	Kontrola nosilnosti nosilcev z vmesnimi prečnimi ojačitvami odprtini	92
9.9.1	Strižna nosilnost panela stojine z odprtino	94
9.9.1.1	Določitev projektne strižne nosilnosti panela stojine z odprtino v središču panela stojine.....	94
9.9.1.2	Določitev projektne strižne nosilnosti panela stojine z ekscentrično nameščeno odprtino	95
9.9.1.3	Panel stojine z ojačano odprtino	97
9.9.2	Kontrola momenta nosilnosti za stojino z odprtino.....	99

10	NOSILNOST ELEMENTOV	100
10.1	Splošno o bočni zvrnitvi nosilcev z odprtini	100
10.2	Nosilnost na bočno zvrnitev nosilcev z odprtini	101
10.3	Izbira uklonske krivulje za bočno zvrnitev nosilcev z odprtini	101
11	KONTROLA VNOSA KONCENTRIRANE SILE	104
11.1	Kontrola vnosa koncentrirane sile pri nosilcih z odprtini	104
11.2	Kontrola vnosa koncentrirane sile pri satastih nosilcih	104
12	KONTROLA POMIKOV NOSILCEV Z ODPRTINAMI	105
12.1	Kontrola pomikov nosilcev z odprtini	105
12.2	Kontrola pomikov satastih nosilcev	106
12.2.1	Splošno o kontroli pomikov na satastih nosilcih	106
12.2.2	Kontrola pomikov s pomočjo virtualnega dela	107
12.2.3	Analitični model za določanje upogibkov pri satastih nosilcih z dolgimi razponi	107
12.3	Naravna frekvenca	109
13	PROGRAM ACEGIRDER	110
13.1	Predstavitev programa AceGirder	110
13.2	Uporaba programa AceGirder.....	110
13.3	Vnos vhodnih podatkov	112
13.3.1	Splošno	112
13.3.2	Zavihek nosilec	112
13.3.3	Podpore	113
13.3.4	Obtežba	113
13.3.5	Nepopolnosti	115
13.3.6	Analiza.....	115
13.3.6.1	Formulacija elementa.....	117
13.3.6.2	Parametri inkrementne rešitve.....	117
13.3.6.3	Mreža končnih elementov	117
13.4	Ukazni gumbi za analizo.....	118
13.5	Postprocesiranje rezultatov	119
13.6	Nosilec z odprtini	119
13.6.1	Satasti nosilci v programu AceGirder	119
13.6.2	Nosilci z enojnimi odprtini v stojini.....	123
13.6.3	Nosilci z večimi odprtini v stojini.....	124
14	STATIČNA PRESOJA IZBRANEGA SATASTEGA NOSILCA	126

14.1	Splošno.....	126
14.2	Material in geometrija satastega nosilca s heksagonalnimi odprtinami	126
14.2.1	Material satastega nosilca	126
14.2.2	Razpon satastega nosilca.....	127
14.2.3	Geometrijske karakteristike prečnega prereza satastega nosilca	127
14.3	Analiza obtežbe in obtežne kombinacije.....	129
14.3.1	Analiza obtežbe.....	129
14.3.2	Obtežne kombinacije.....	130
14.3.3	Izračun notranjih sil na satastemu nosilcu za MSN	130
14.3.4	Geometrijske omejitve odprtin.....	132
14.4	Kontrola kompaktnosti prereza	133
14.5	Kontrola nosilnosti pasu T prereza nad in pod odprtino	134
14.5.1	Geometrija pasu T prereza	134
14.5.2	Kontrola nosilnosti prereza na mestu odprtine v prerezu 1-1	135
14.5.3	Celotni Vierendeelov moment odprtine	136
14.6	Kontrola nosilnosti polne stojine med odprtinami	137
14.7	Kontrola izbočenja tlačene pasnice v ravnini stojine	138
14.8	Kontrola bočne zvrnitve.....	139
14.9	Kontrola pomikov.....	141
14.10	Stabilnostna analiza s programom AceGirder.....	143
14.11	Mejna nosilnost pri dani obtežbi.....	150
14.12	Statična analiza pri dani obtežbi.....	153
14.13	Primerjava med analitičnimi in numeričnimi rezultati nosilnosti na satastemu nosilcu	154
15	ZAKLJUČEK.....	156
	VIRI.....	157
	PRILOGE	162

KAZALO SLIK

SLIKA 1: GEOMETRIJA LOKALNIH PRAVOKOTNIH ODPRTIN V STOJINI	2
SLIKA 2: GEOMETRIJA OKROGLIH ODPRTIN V STOJINI.....	2
SLIKA 3: RAZPORED NOSILCEV NA KRATEM RAZPONU	6
SLIKA 4: RAZPORED NOSILCEV NA DOLGEM RAZPONU	6
SLIKA 5: PROSTOR POTREBEN ZA POTEK VODOV	7
SLIKA 6: ZAŠČITA NOSILCEV Z ODPRTINAMI	10
SLIKA 7: NASTANEK PLASTIČNIH ČLENKOV PRI SATASTEMU NOSILCU S ŠESTEROKOTNIMI ODPRTINAMI.....	14
SLIKA 8: DEFORMACIJA ODPRTINE ZARADI STRIŽNEGA MEHANIZMA	14
SLIKA 9: UPOGIBNI UKLON	15
SLIKA 10: PORUŠITEV VARJENEGA POLNEGA DELA STOJINE	16
SLIKA 11: GEOMETRIJA ODPRTIN V STOJINI.....	19
SLIKA 12: PORUŠITEV PREČNEGA PREREZA ZARADI PREČNE SILE	22
SLIKA 13: PORUŠITEV PREČNEGA PREREZA ZARADI UPOGIBA	22
SLIKA 14: VIERENDEELOV MEHANIZEM OKOLI ODPRTINE	23
SLIKA 15: PORUŠNI MEHANIZEM ZARADI VNOSA KONCENTRIRANE SILE IN VZDOLŽNEGA STRIGA.....	24
SLIKA 16: DEL STOJINE Z ODPRTINAMI	27
SLIKA 17: POLOŽAJ ODPRTIN V STOJINI IN DIMENZIJE	32
SLIKA 18: CONA VPLIVA ODPRTINE.....	34
SLIKA 19: SATASTI NOSILEC S HEKSAGONALNIMI IN OKTAGONALNIMI ODPRTINAMI.....	50
SLIKA 20: IZREZ SATASTEGA NOSILCA Z TRADICIONALNIMI DIMENZIJAMI.....	51
SLIKA 21: ENOSTAVEN IN POCENI ZAKLJUČEK, VENDAR NI PRIMEREN ZA UPORABO.....	52
SLIKA 22: DALJŠI ZAKJUČEK, VENDAR NI ZELO UČINKOVIT	52
SLIKA 23: DOBER ZAKJUČEK, BREZ DODATNEGA REZANJA IN ODPADNEGA MATERIALA	52
SLIKA 24: ZAKLJUČEK JE TOG IN DRAG.....	53
SLIKA 25: PRIKAZ IZDELAVE SATASTEGA NOSILCA Z OKROGLIMI ODPRTINAMI.....	54
SLIKA 26: KONČNA GEOMETRIJA SATASTEGA NOSILCA Z OKROGLIMI ODPRTINAMI.....	54
SLIKA 27: SATASTI NOSILEC S SPREMENJIVIMI DIMENZIJAMI ODPRTIN	56
SLIKA 28: STANDARDNI SATASTI NOSILEC S HEKSAGONALNIMI ODPRTINAMI.....	56
SLIKA 29: PREČNI PREREZ SATASTIH NOSILCEV	60
SLIKA 30: DIMENZIJE IN GEOMETRIJA ODPRTIN SATASTIH NOSILCEV	61
SLIKA 31: MODEL ZA ANALIZO SATASTEGA NOSILCA.....	62
SLIKA 32: MODEL ZA DOKAZOVANJE PREČNE SILE NA ZGORNJI POLOVICI SN	69
SLIKA 33: PROCES UKRIVITVE SATASTEGA NOSILCA Z OKROGLIMI ODPRTINAMI	73
SLIKA 34: VPETJE UKRIVLJENEGA NOSILCA PRI KONTINUIRNIH OKVIRJIH.	74

SLIKA 35: POSTOPEK IZDELAVE SN S HEKSAGONALNIMI ODPRTINAMI S SPREMENLJIVIM PREČNIM PREREZOM	75
SLIKA 36: SATASTI NOSILEC S SPREMENJIVIM PREČNIM PREREZOM Z REDUCIRANO TEŽO	76
SLIKA 37: SATASTI NOSILEC S PODOLGOVATO ODPRTINO	76
SLIKA 38: SOVPREŽNI ASIMETRIČNI SATASTI NOSILEC	78
SLIKA 39: ANGELINA NOSILEC	79
SLIKA 40: PRIMERJAVA MED OBLIKAMI ODPRTIN.....	80
SLIKA 41: PROCES IZDELAVE ANGELINA NOSILCA	80
SLIKA 42: GEOMETRIJSKE OZNAKE ANGELINA NOSILCA.....	81
SLIKA 43: OJAČITEV ODPRTIN V STOJINI.....	82
SLIKA 44: OJAČITEV POLNEGA DELA STOJINE.....	84
SLIKA 45: ZAPOLNITEV ODPRTINE	85
SLIKA 46: GEOMETRIJSKE OMENJITVE ZA PRAVOKOTNE ODPRTINE.....	87
SLIKA 47: VZDOLŽNA OJAČITEV PRI SN ZA IZOGIBANJE LOKALNIM PLASTIČNIM DEFORMACIJAM.....	88
SLIKA 48: KRITERIJ ZA POVEČANJE DOLŽINE OJAČITVE	91
SLIKA 49: PREČNI PREREZ SATASTEGA NOSILCA	100
SLIKA 50: PROGRAM ACEGIRDER	111
SLIKA 51: RAZDELITV GLAVNEGA OKNA PROGRAMA ACEGIRDER	111
SLIKA 52: ZAVIHEK NOSILEC V PROGRAMU ACEGIRDER.....	112
SLIKA 53: ZAVIHEK PODPORE V PROGRAMU ACEGIRDER.....	113
SLIKA 54: ZAVIHEK OBTEŽBA V PROGRAMU ACEGIRDER	114
SLIKA 55: ZAVIHEK NEPOPOLNOSTI V PROGRAMU ACEGIRDER	115
SLIKA 56: ZAVIHEK ANALIZA V PROGRAMU ACEGIRDER	116
SLIKA 57: TOPOLOGIJA IN OBLIKOVANJE KONČNIH ELEMENTOV.....	117
SLIKA 58: UKAZNI GUMBI V PROGRAMU ACEGIRDER.....	118
SLIKA 59: GUMBI ZA POSTPROCESIRANJE V PROGRAMU ACEGIRDER	119
SLIKA 60: SATASTI NOSILEC Z OKROGLIMI ODPRTINAMI	120
SLIKA 61: SKICA SN Z ZAHTEVANIMI GEOMETRIJSKIMI KARAKTERISTIKAMI ZA VNOS	121
SLIKA 62: MREŽA KONČNIH ELEMENTOV ZA SN S HEKSAGONALNIMI ODPRTINAMI ZA 9 - VOZLIŠČNI ISOPARAMETRIČNI LUPINASTI ELEMENT, PRI GOSTOTI MREŽE 1.....	121
SLIKA 63: MREŽA KONČNIH ELEMENTOV ZA SN S HEKSAGONALNIMI ODPRTINAMI ZA 9 - VOZLIŠČNI ISOPARAMETRIČNI LUPINASTI ELEMENT, PRI GOSTOTI MREŽE 2.....	122
SLIKA 64: MREŽA KONČNIH ELEMENTOV ZA SN S HEKSAGONALNIMI ODPRTINAMI ZA 9 - VOZLIŠČNI ISOPARAMETRIČNI LUPINASTI ELEMENT, PRI GOSTOTI MREŽE 3.....	122
SLIKA 65: MREŽA KONČNIH ELEMENTOV ZA SN S HEKSAGONALNIMI ODPRTINAMI ZA 9 - VOZLIŠČNI ISOPARAMETRIČNI LUPINASTI ELEMENT, PRI GOSTOTI MREŽE 4.....	122

SLIKA 66: MREŽA KONČNIH ELEMENTOV ZA SN S HEKSAGONALNIMI ODPRTINAMI ZA 9 - VOZLIŠČNI ISOPARAMETRIČNI LUPINASTI ELEMENT, PRI GOSTOTI MREŽE 5.....	123
SLIKA 67: MREŽA KONČNIH ELEMENTOV ZA SN S HEKSAGONALNIMI ODPRTINAMI ZA 9 - VOZLIŠČNI ISOPARAMETRIČNI LUPINASTI ELEMENT, PRI GOSTOTI MREŽE 6.....	123
SLIKA 68: SKICA NOSILCA PODOLGOVATO ENOJNO ODPRTINO V STOJINI	124
SLIKA 69: NOSILEC Z ENOJNO PRAVOKOTNO ODPRTINO, Z MREŽO KONČNIH ELEMENTOV GOSTOTE 2.....	124
SLIKA 70: SKICA NOSILCA Z VEČIMI PRAVOKOTNIMI ODPRTINAMI.....	125
SLIKA 71: NOSILEC Z VEČIMI OKTAGONALNIMI ODPRTINAMI, Z MREŽO KONČNIH ELEMENOTV GOSTOTE 2.....	125
SLIKA 72: SKICA KONSTRUKCIJE OBRAVNAVANEGA SATASTEGA NOSILCA.....	126
SLIKA 73: GEOMETRIJA SATASTEGA NOSILCA.....	127
SLIKA 74: GEOMETRIJA NA VZDOLŽNEM PREREZU	128
SLIKA 75: PREČNI PREREZ ODPRTINE SATASTEGA NOSILCA	128
SLIKA 76: SILE NA PROSTOLEŽEČEMU NOSILCU ZA MSN	131
SLIKA 77: PREČNE SILE VEd, y NA PROSTOLEŽEČEM NOSILCU	131
SLIKA 78: MOMENTI MEd, z NA PROSTOLEŽEČEM NOSILCU	131
SLIKA 79: PORAZDELITEV SIL NA VIERENDEELOVEMU NOSILCU	131
SLIKA 80: OSNE SILE NEd, V NA VIERENDEELOVEMU NOSILCU.....	132
SLIKA 81: PREČNE SILE VEd, y, V NA VIERENDEELOVEMU NOSILCU	132
SLIKA 82: MOMENTI MEd, z, V NA VIERENDEELOVEMU NOSILCU	132
SLIKA 83: OBTEŽBA NA VIERENDEELOVEMU NOSILCU ZA MSU	142
SLIKA 84: 1. UKLONSKA OBLIKA ZA SATASTI NOSILEC Z BOČNIM PODPIRANJEM ZGORNJE PASNICE NA 800CM.....	148
SLIKA 85: 1. UKLONSKA OBLIKA ZA SATASTI NOSILEC Z BOČNIM PODPIRANJEM ZGORNJE PASNICE NA 400CM.....	148
SLIKA 86: 1. UKLONSKA OBLIKA ZA SATASTI NOSILEC Z BOČNIM PODPIRANJEM ZGORNJE PASNICE NA 267CM.....	148
SLIKA 87: 1. UKLONSKA OBLIKA ZA SATASTI NOSILEC Z BOČNIM PODPIRANJEM ZGORNJE PASNICE NA 200CM.....	148
SLIKA 88: 2. UKLONSKA OBLIKA ZA SATASTI NOSILEC Z BOČNIM PODPIRANJEM ZGORNJE PASNICE NA 200CM.....	149
SLIKA 89: 3. UKLONSKA OBLIKA ZA SATASTI NOSILEC Z BOČNIM PODPIRANJEM ZGORNJE PASNICE NA 200CM.....	149
SLIKA 90: 1. UKLONSKA OBLIKA ZA POLNOSTENSKI NOSILEC Z BOČNIM PODPIRANJEM ZGORNJE PASNICE NA 200CM	149
SLIKA 91: 2. UKLONSKA OBLIKA ZA POLNOSTENSKI NOSILEC Z BOČNIM PODPIRANJEM ZGORNJE PASNICE NA 200CM.....	149

SLIKA 92: 1. UKLONSKA OBLIKA ZA SATASTI NOSILEC Z BOČNIM PODPIRANJEM ZGORNJE PASNICE NA 167CM.....	149
SLIKA 93: 1. UKLONSKA OBLIKA ZA SATASTI NOSILEC Z BOČNIM PODPIRANJEM ZGORNJE PASNICE NA 100CM.....	150

KAZALO PREGLEDNIC

PREGLEDNICA 1: MANJŠA MEJA l_0 , KJER JE ZADOŠČENO VSEM RAZREDOM STOJIN ZA b_{wc}	29
PREGLEDNICA 2: REZULTATI STABILNOSTNE ANALIZE ZA SATASTI NOSILEC S HEKSAGONALNIMI ODPRTINAMI	145
PREGLEDNICA 3: REZULTATI STABILNOSTNE ANALIZE ZA POLNOSTENSKI I NOSILEC	146
PREGLEDNICA 4: VREDNOSTI MEJNE UPOGIBNE NOSILNOSTI $MRdFEM$ BREZ UPOŠTEVANJA NEPOPOLNOSTI	152
PREGLEDNICA 5: VREDNOSTI MEJNE UPOGIBNE NOSILNOSTI $MRdFEM$ Z UPOŠTEVANJEM NEPOPOLNOSTI	152
PREGLEDNICA 6: VREDNOSTI MEJNE STRIŽNE NOSILNOSTI $VRdFEM$ BREZ UPOŠTEVANJA NEPOPOLNOSTI	152
PREGLEDNICA 7: VREDNOSTI MEJNE STRIŽNE NOSILNOSTI $VRdFEM$ Z UPOŠTEVANJEM NEPOPOLNOSTI	153
PREGLEDNICA 8: VREDNOST POMIKOV $uzFEM$ ZA STATIČNO ANALIZO ZA SATASTI NOSILEC S HEKSAGONALNIMI ODPRTINAMI	153
PREGLEDNICA 9: VREDNOST POMIKOV $uzFEM$ ZA STATIČNO ANALIZO ZA POLNOSTENSKI I NOSILEC	154
PREGLEDNICA 10: PRIMERJAVA REZULTATOV NOSILNOSTI IZRAČUNANIH NA VIERENDEELOVEMU NOSILCU PO EVROKODU IN NA 3D MODELU PO METODI KONČNIH ELEMENTOV	155

SEZNAM UPORABLJENIH OZNAK

ANGELINA	Satasti nosilec z odprtinami tipa Angelina
BWEO	Satassti nosilec s podolgovatimi odprtinami
BRSO	Satasti nosilec s pravokotnimi ali kvadratnimi odprtinami
CAB	Satasti nosilec s heksagonalnimi odprtinami
CABIP	Satasti nosilec s povišanimi odprtinami
CEB	Satasti nosilec z okroglimi odprtinami
CEBIP	Satasti nosilec s povišanimi okroglimi odprtinami
EC	Evrokod
MCO	Nosilec z večimi okroglimi odprtinami
MCHO	Nosilec z večimi povišanimi okroglimi odprtinami
MEO	Nosilec z večimi podolgovatimi odprtinami
MHO	Nosilec z večimi heksagonalnimi odprtinami
MKE	Metoda končnih elementov
MOO	Nosilec z večimi oktagonalnimi odprtinami
MRSWO	Nosilec z večimi pravokotnimi ali kvadratnimi odprtinami
MSN	Mejno stanje nosilosti
MSU	Mejno stanje uporabnosti
S	Jeklo
SCO	Nosilec z okroglo enojno odprtino

SCHO	Nosilec s povišano okroglo enojno odprtino
SEO	Nosilec s podolgovato enojno odprtino
SHO	Nosilec s heksagonalno enojno odprtino
SN	Satasti nosilec
SOO	Nosilec z oktagonalno enojno odprtino v programu
SRSWO	Nosilec s pravokotno ali kvadratno enojno odprtino
VAV	Spremenljiv volumen zraka
VRF	Sistem spremenljivega pretoka hladilnega sredstva

1 UVOD

Zaradi inženirske prakse se pogosto pojavlja potreba po odprtinah v jeklenih nosilcih. Potreba po odprtinah je pogosta zaradi potreb pri vgradnji inštalacij ali zaradi arhitekturne narave.

V diplomskem delu so predstavljene metode dokazovanja nosilnosti jeklenih nosilcev z odprtinami v stojini in jeklenih satastih nosilcev. V uvodnem delu diplomske naloge sem se osredotočil na predstavitev tipov odprtin v nosilcih in na njihovo uporabo. Predstavil sem, kakšen je vpliv odprtin v stojini na porušitve v primeru neustreznega pristopa k dimenzioniranju nosilcev z odprtinami. Za jasno razmejitev nosilcev s posameznimi odprtinami in satastih nosilcev glede geometrijskih omejitev so v diplomskem delu prikazane omejitve za njihovo razmejitev, kajti to je pomembno za nadaljno dokazovanje nosilnosti. Dokazovanje nosilnosti pri nosilcih z odprtinami in satastih nosilcih ni enako kot pri polnostenskih nosilcih. Tudi dokazovanje strižne in upogibne nosilnosti je drugačno pri jeklenih nosilcih s posameznimi odprtinami v primerjavi z jeklenimi satastimi nosilci. Za dokazovanje nosilnosti nosilcev s posameznimi odprtinami in satastih nosilcev se uporablja standard ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N, kot tudi ustrezna literatura, katero sem predstavil v diplomskem delu. Pri računu notranjih sil pri satastih nosilcih se račun dela na ekvivalentnem Vierendeelovemu nosilcu, saj je to primerna rešitev za izračun notranjih sil.

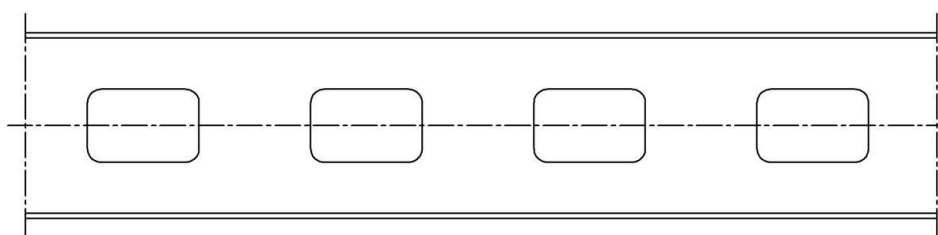
V sklopu diplomske naloge sem sodeloval pri izdelavi programa AceGirder, ki omogoča numerično analizo izoliranih nosilcev poljubnih prerezov. V programu je mogoče izbirati med statično analizo pri dani obtežbi, analizo mejne nosilnosti in stabilnostno analizo. Za potrebo analiz nosilcev z odprtinami sem napisal programske kode za geometrijo nosilcev z enojnimi odprtinami v stojini, nosilce z večimi odprtinami in sataste nosilce. V diplomskem delu je izvedeno dokazovanje nosilnosti za mejno stanje nosilnosti in mejno stanje uporabnosti po poenostavljeni metodi iz Evrokoda 3 za satasti nosilec s heksagonalnimi odprtinami in kontrola bočne zvrnitve. Narejena je primerjava modelov končnih elementov med satastim nosilcem s heksagonalnimi odprtinami in polnostenskim I nosilcem, za stabilnostno analizo, analizo mejnega stanja nosilnosti in statično analizo, ki je izvedena s programom AceGirder. Poleg tega je narejena tudi primerjava med rezultati za satasti nosilec med poenostavljeno metodo računa po Evrokodu in dobljenimi rezultati iz programa AceGirder.

2 NOSILCI Z ODPRTINAMI

2.1 Predstavitev nosilcev z odprtinami

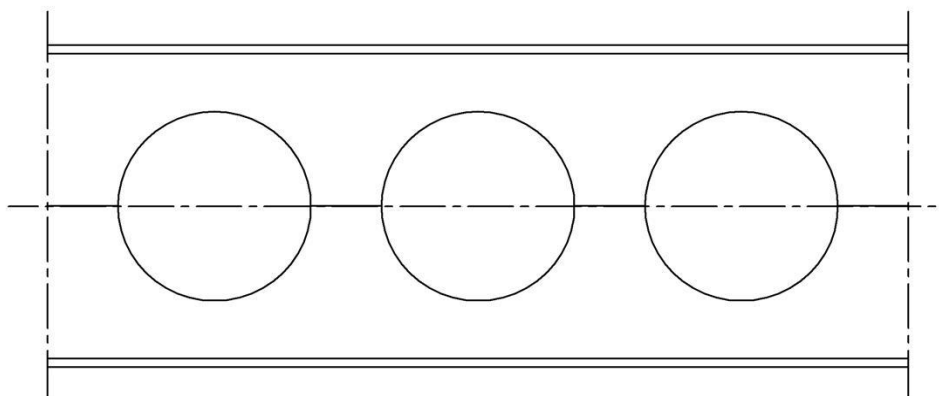
V modernem projektiranju postajajo razponi vse daljši. Dolgi razponi vodijo do boljše izkoriščenih prostov in zmanjšanemu številu stebrov. Z razponi se povečuje višina prereza, kar pa vodi do višjih višin etaž in s tem v končni fazi do večje višine konstrukcije. Problem postane pri namestitvi vodov, ki še dodatno povečujejo višino nadstropij, zato se za primerno rešitev izkažejo nosilci z odprtinami. Obstajata dve glavni konfiguraciji odprtin, glede na metodo proizvodnje profilov:

- Lokalne oziroma posamezne odprtine, pri katerih je vpliv med njimi majhen, prikazuje Slika 1.



Slika 1: Geometrija lokalnih pravokotnih odprtin v stojini

- Odprtine, ki so enakomerno razporejene po stojini in je med njimi večji medsebojni vpliv, prikazuje Slika 2.



Slika 2: Geometrija okroglih odprtin v stojini

Metode izdelave so lahko naslednje:

- Vroče valjani prerezi s posameznimi odprtinami, kot je to prikazano na Sliki 2.1.



Slika 2.1: Lokalne pravokotne odprtine v nosilcu (Feldmann in sod., 2006d)

- Vroče valjani prerezi, ki so izrezani iz profila in varjeni tako, da oblikujejo vrsto enakomerno razporejenih odprtin, kot je to prikazano na Sliki 2.2. Pri tem se dobi povečano višino profila. Prečni prerez je lahko nesimetričen. Poznani so pod imenom satasti nosilci.



Slika 2.2: Satasti nosilec z okroglimi odprtinami (Feldmann in sod., 2006d)

- Varjeni prerezi, ki so sestavljeni iz treh pločevin, kot je to prikazano na Sliki 2.3. Iz stojine se izrežejo odprtine, nato pa se pločevine varijo skupaj. Prerez je lahko

nesimetričen zaradi uporabe širše pasnice v natezni coni, lahko pa se uporabi spremenljivi prerez po višini vzdolž dolžine.



Slika 2.3: Nosilec s spremenljivimi oblikami odprtin (Feldmann in sod., 2006d)

2.2 Stojina z odprtinami

Nosilci z dolgimi razponi se uporabljajo v zgradbah z namenom da ustvarjajo fleksibilnost in boljšo uporabnost prostora. Druga posledica njihove uporabe je, da mora biti prilagodljivost instalacij na voljo v celotnem območju z možnostjo sprememb. Dolgi razponi dajejo dovolj prostora za instalacije v eni smeri, kar pa pomeni oviro v drugi smeri. S tem pa postane višina mednadstropne konstrukcije višja, ker so instalacije pod nosilci, to pa povečuje višino mednadstropne konstrukcije in v končni fazi stroške za fasado, kot tudi v primeru, ko je predpisana končna višina stavbe. Rešitev tega so nosilci z odprtinami, ki omogočajo vodenje vodov skozi odprtine. Za izdelane profile se lahko izdelata odprtine, kjer so potrebne, ta na zadostni razdalji zaradi zmanjšanega medsebojnega vpliva odprtin. Vpliv odprtin na elastično razporeditev napetosti se je preučevalo že pred več kot pred 100 leti, vendar te rešitve dandanes niso več koristne za določevanje nosilnosti nosilcev z odprtinami. Uspešna ideja, ki se še sedaj uporablja je vzeta iz teorije za Vierendeelove nosilce za del nosilca z odprtino. Vierendeelovi nosilci so dobili ime po Arthurju Vierendeelu, ki je bil belgijski profesor za gradbeništvo in je razvil metodo za račun, kjer je konstrukcija nosilec modeliran z nadomestnim paličjem. Njegova metoda je bil razvita leta 1896 in prvič uporabljena leta 1902 za jeklen rešetkast most v Belgiji pri kraju Avelgen.

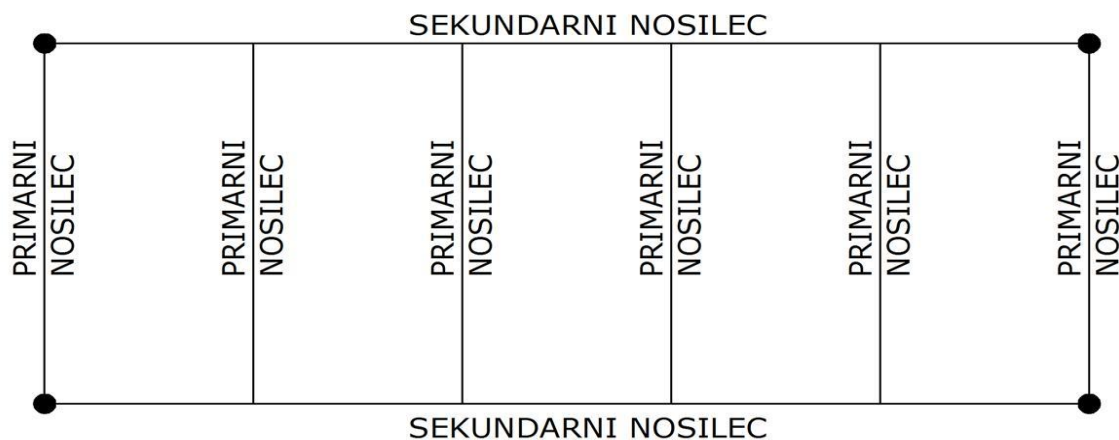
Pri uporabi te metode je privzeto, da je prerez v področju odprtine sestavljen iz dveh T prerezov, ta dva T prereza nosita upogibni moment kot osni sili in strig, ki povzročata dodatne lokalne upogibne momente z maksimumi v vogalih odprtine. Velike odprtine povzročajo zmanjšanje strižne nosilnosti in upogibne nosilnosti, kar prikazuje Slika 2.4. Zato je pri prenosu strižnih napetosti med velikimi odprtinami pomemben pogoj oblikovanja in iskanje prostora za velike odprtine izven cone velikih strižnih napetosti. Dobro je, če so odprtine locirane v področju, kjer so izračunane manjše prečne sile.



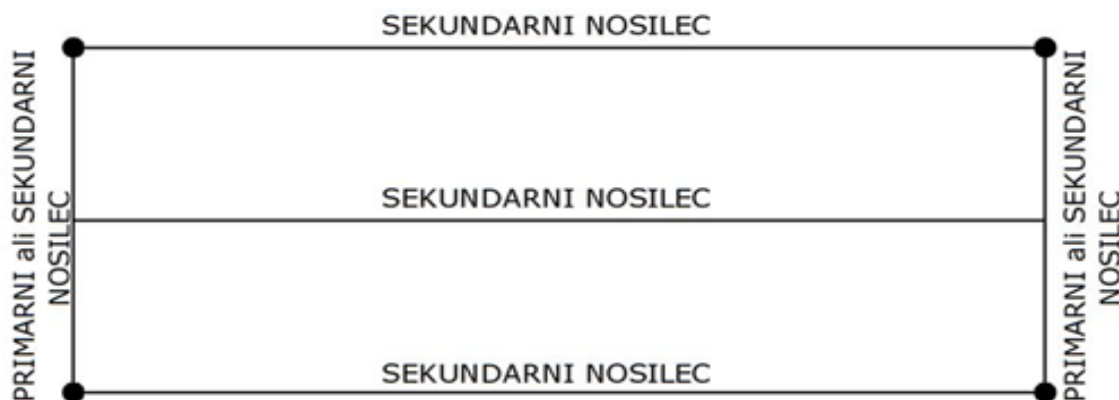
Slika 2.4: Vierendeelov upogib pri veliki lokalni odprtini s simetričnimi horizontalnimi ojačitvami (Feldmann in sod., 2006d)

2.3 Razponi nosilcev z odprtinami in njihovo načrtovanje

Za zmanjšanje števila stebrov se uporabljajo nosilci, ki premoščajo velike razpone. Pri določitvi pozicij stebrov se moramo odločiti, kako se bodo postavili primarni in sekundarni nosilci, kot to prikazujeta Slika 3 in Slika 4, preko katerih se prenaša obtežba v stebre in naprej v temelje. Pri tem postane uporaba sekundarnih nosilcev pomembna, saj postanejo razponi daljši. Posledično se postavi vprašanje, kakšne nosilce uporabiti na velikih razponih. Opcija za izbiro nosilca za mednadstropno konstrukcijo na daljših razponih je izbira satastega nosilca. Pri izbiri konstrukcijskega sistema se za sekundarni nosilec lahko izbere satasti nosilec. Primarni nosilec je lahko polnostenski ali satasti nosilec, odvisno od poteka instalacij.



Slika 3: Razpored nosilcev na kratem razponu



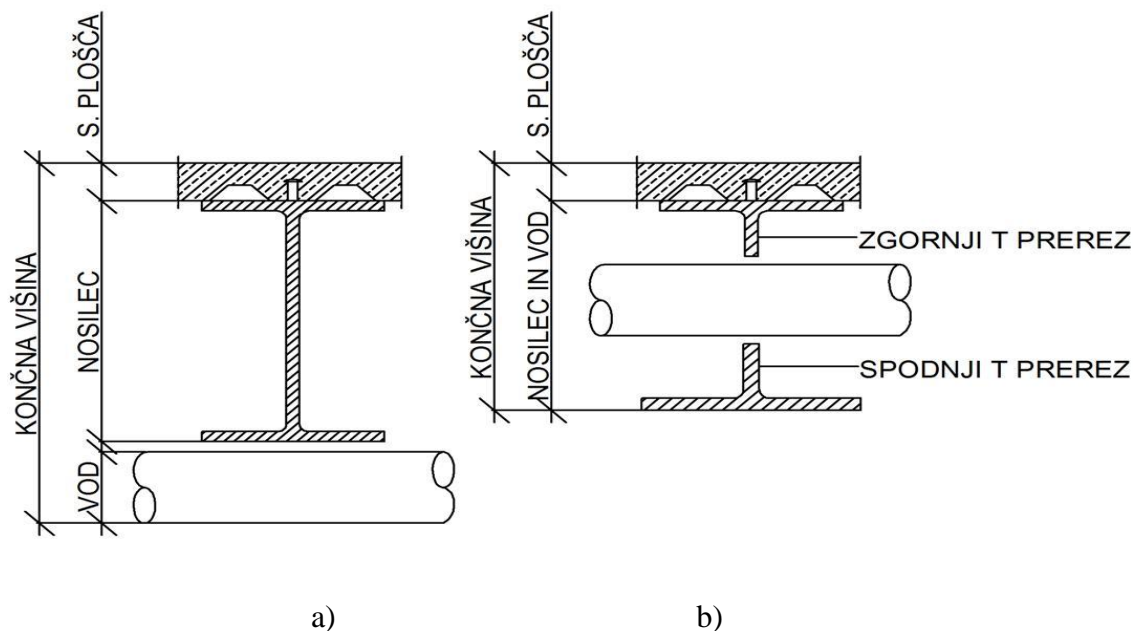
Slika 4: Razpored nosilcev na dolgem razponu

Ovisno od situacije, se lahko namesto satastih nosilcev uporabi nosilce z odprtinami. Ti so po eni strani bolj ugodnejši od satastih nosilcev v primerih, kjer ni potrebno imeti satastih nosilcev. Obe obliki zmanjšata višino konstrukcije, omogočata pa odprtine na mestih, kjer so potrebne. Pri tem se je potrebno zavedati, da prisotnost odprtin v stojini spremeni obnašanje nosilca in porazdelitev napetosti v njem.

2.4 Višina mednadstropne konstrukcije

Koristno bi bilo, da bi se zmanjšala višina etaže ali da bi se zmanjšali stroški obloge, kot tudi uskladitev z načrtovanjem omejitve višine mednadstropne konstrukcije pri skupni višini stavbe. To pa zahteva skrbno izbiro nosilcev in obravnavanje ter vključitev inštalacij v strukturo. V primeru izbire podobnih višin primarnih in sekundarnih nosilcev, s tem, da pod

njimi potekajo vodi, se pojavi problem v višini mednadstropne konstrukcije, kot se vidi na Sliki 5 a). Če izberemo višje primarne in nižje sekundarne nosilce, bo mednadstropna konstrukcija višja in bo možno, da bodo šli vodi skozi primarni nosilec in pod sekundarnimi nosilci, kot se to vidi na Sliki 5 b). Iz tega sledi, da minimalna višina mednadstropne konstrukcije vedno ne bo ustrezala minimalni višini nadstropja.



Slika 5: Prostor potreben za potek vodov

2.5 Opcije izbire dovodnih vodov

Dovodni vodi za strojniške inštalacije vključujejo:

- Vode, namenjene oskrbovanju, ki služijo strojnimi ali klimatskim napravam.
- Vode, namenjene ogrevanju in ohlajevanju ter kondenzacijske cevi, ki služijo za tuljave ventilatorjev ali razširitvi hladilnih tuljav.
- Vode, ki služijo vodi za razpršilce za protipožarne sisteme ali vode, ki služijo plinskimi vodom.
- Vode, namenjene hlajenju s spremenljivim pretokom hladilnega sistema in razcepitvenim sistemom, ki zajemajo notranje in zunanje komponente.
- Pomožne naprave, ki služijo zgoraj navedenim sistemom, vključno z vodi in dovodnimi cevmi.

Dovodni vodi za električne instalacije vključujejo:

- Komunikacijske kable, namenjene prenosu podatkov, komunikacij in uporabi telefonije.
- Izgradnjo sistema signalnih kablov za upravljanje in povezovanje v naprave, kot so termostati, tuljave in svetila.
- Energetske kable za razsvetljavo.
- Kable, namenjene protipožarnim sistemom.
- Kable, namenjene varnostnim sistemom in sistemom za nadzor.
- Dodatne naprave, kot so kabelski vložki, podporni mehanizmi, terminali in naprave, ki služijo upravljanju sistema kontrole.

2.6 Tipični vgrajeni vodi v odprtinah stojin

Največje in najpogostejše vrste vgradnje instalacij so tiste, ki služijo mehanskim prezračevalnim sistemom ali klimatskim napravam s termalnimi sistemi. Ti so razvrščeni v kategorije: centralizirani zračni sistemi, delno centralizirani sistemi za zrak in vodo in lokalni zračni sistemi. V Preglednici A.1 so podane nominalne dimenzije vodov. Centralizirani sistemi vključujejo stalni volumen sistema ali spremenljiv volumen sistema od katerih imajo vsaki vodi svoje zahteve. Delno centralizirani sistemi vključujejo ventilatorske tuljave, ohlajeno zgornjo ploščo, in prostor na osnovi toplotnih črpalk. Konstantni volumni sistemov omogočajo ventilacijo zraka s fiksnimi vodi, preko katerih se pripelje ohlajen ali ogrevan zrak. Spremenljivi klimatski volumski sistemi so sistemi, kjer se odstranjeni zrak ne samo prezrači, ampak se tudi vrne nazaj v prostor ohlajen ali ogrevan. Sistema s konstantnim in spremenljivim volumenskim sistemom se uporabljata v povezavi z satastimi nosilci. Lokalni sistemi večinoma služijo za hladilne naprave in naprave, ki služijo hladilnemu sistemu s spremenljivim pretokom, ki služijo v posameznih območjih v stavbi.

Preglednica A.1: Prostor odprtine potreben za tipične vode (Mitchell in sod., 2003)

Sistem	Dimenzije		
	Dolžina [mm]	Širina [mm]	Višina [mm]
Spremenljiv volumen zraka (VAV) sistem	600	300	350 – 750
Sistem spremenljivega pretoka hladilnega sredstva (VRF) sistem			450
Prezračevalne tuljave	1000	500	450
Voden zračni sistem			450
Drenaža			10 -25 na m ¹
Drenaža za odpadke in umazanijo			7 – 16 na m ¹
Razsvetljava			100 – 150

2.7 Prednosti krožnih vodov v primerjavi s pravokotnimi

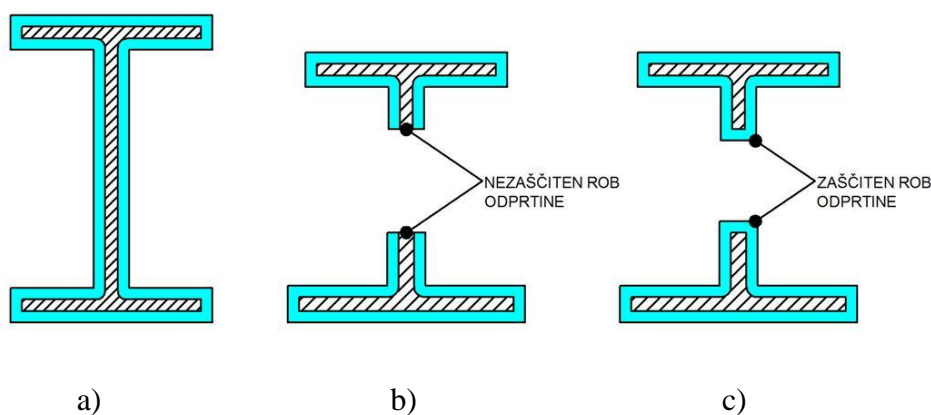
Prednost uporabe krožnih cevi, namesto pravokotnih, je v tem, da so okrogle cevi na splošno bolj prilagodljive. Posledično velikost odprtine v nosilcu vpliva na velikost ventilatorjev in s tem povezanih naprav ter obratovalnih stroškov. Obstajajo tudi druge prednosti za uporabo krožnih vodov. Pri zgradbi narejeni s satastimi nosilci z okroglimi odprtini je mogoče uporabljati okrogle, kvadratne ali podolgovate cevi. Po uporabi izolacij, požarne zaščite, se bo prostor, potreben za vode, zmanjšal, kar pa bo vplivalo na velikost in obliko odprtin. Krožni cevovodi so poleg uporabnosti do trikrat bolj energetsko učinkoviti kot pravokotne cevi, poleg tega pa so tudi cenejši in lažji za čiščenje kot pravokotni kanali.

2.8 Požarna zaščita nosilcev z odprtinami

Na velikost odprtin poleg instalacij vpliva tudi požarna zaščita. Poleg naštetih dejavnikov je potrebno upoštevati tudi požarno zaščito že v fazi projektiranja, da pri končnih velikostih odprtin ne pride do težav pri vgradnji instalacij.

Požarna zaščita nosilcev z odprtinami, kot so prikazane na spodnjih slikah:

- Prerez brez odprtine, Slika 6 a).
- Prerez z odprtino, a brez zaščite roba odprtine, Slika 6 b).
- Prerez z zaščito roba odprtine, Slika 6 c).



Slika 6: Zaščita nosilcev z odprtinami

Sistemi protipožarne zaščite so razdeljeni v naslednje skupine:

- **Cement in materiali na osnovi mavca**

Med dražje protipožarne zaščite sodijo cementi in materiali na osnovi mavca, ki vsebujejo mineralna vlakna, vermikulit, ekspanzirani perlit ter druge lahke agregate in polnila. Materiali na osnovi mineralnih vlaken lahko zagotovijo do 240 minut požarne odpornosti in so ponavadi opredeljeni kot nevnetljivi. Vgradnja nekaterih protipožarnih sistemov je na kraju vgradnje nosilcev, nekateri protipožarni sistemi pa se uporabljajo že v procesu izdelave v jeklnah. Pri vključitvi protipožarne zaščite se zmanjša velikost odprtine, s tem pa nastane problem v vključitvi vodov v odprtine.

- **Plošče in prevleke**

Prevleke, trde in poltrde plošče se uporabljajo kot suha oblika protipožarnih sistemov. Temeljijo na materialih kot so keramična vlakna, kalcijev silikat, kamena volna, mavec in vermikulit. Večina jih je primerna le za notranjo uporabo v času vgradnje, v primeru uporabe kamene volne pa se uporabljaja zunanji ovoj iz aluminjaste folije ali kake druge podobne zaščite. Ta rešitev ni primerna za nosilce z odprtini, ker bi bila izvedba predraga, vgradnja pa bi zahtevala veliko časa.

- **Intumescentni premazi**

Intumescentni premazni sistemi so razvrščeni v tankoslojne in debeloslojne filmske premaze. Materiali za intuscementne premaze so reaktivni in nabreknejo v primeru požara. Tanki filmski premazi se nanašajo na površino z razprševanjem, z brizganjem (Slika 6.1) s čopiči ali z valjčki. V primerjavi z ostalima vrstama je uporaba intuscementnih premazov, pri satastih nosilcih in nosilcih z odprtini, boljša. Debelina intuscementnih premazov je od 0,3 do 6,5mm in ne vpliva na velikost odprtin.



Slika 6.1: Zaščita satastega nosilca z brizganim intuscementnim premazom
(Mitchell in sod., 2003)

3 SPLOŠNI PRINCIPI K ANALIZI NOSILCEV Z ODPRTINAMI

3.1 Metode dokazovanja nosilnosti pri nosilcih z odprtini

Konstrukcijska pravila za valjane profile z odprtini so bila razvita v ZDA v zgodnjih 60-ih. Prva Evropska priporočila so pokrivala tanke stojine v nosilcih in sta jih razvila Hoglund in Jonansson v okviru ECCS-projekta ter jih izdala leta 1977. Nadaljna priporočila in informacije so bila del Dodatka N v ENV 1993-1-1:1992/A2:1998. Ko so preoblikovali ENV v EN je bilo odločeno, da se Annex N k EN ne doda in da se ne gre tako daleč podrobno z pravili. Pravila za nosilce z odprtini obstajajo v ZDA, vendar ta ne pokrivajo satastih nosilcev. Obstajajo publikacije za vročevaljane jeklene nosilce s prekinjenimi – izoliranimi odprtini v SCI P068 in v SCI P100 za sataste nosilce z okroglimi odprtini in simetričnim prerezom. Veliko literature navaja metode računanja satastih nosilcev in nosilcev z lokalnimi odprtini. Proizvajalci satastih nosilcev, kot so Westook, Grünbauer BV, Macsteel, CMC Steel Products, Fabsec, Peiner Träger, ArcelorMittal ter ostali proizvajalci, imajo svoje pristope k računu satastih nosilcev. Tradicionalno načrtovanje satastih nosilcev je s testiranjem, novejša pa s pravili, ki temeljijo na poenostavljenih analitičnih modelih.

3.2 Vpliv odprtini v stojini na metode analiz

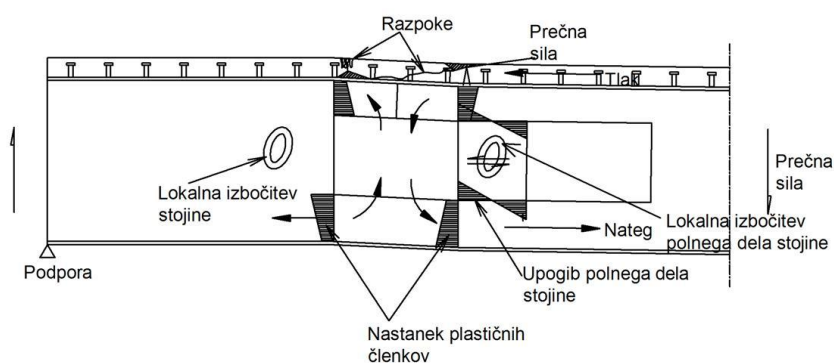
Obnašanje nosilcev z lokalnimi odprtini ali z odprtini na enakomernemu razmaku je komplicirano. Načini porušitev so odvisni od naslednjih možnosti:

- Pozicije odprtini v višini prereza stojine.
- Oblike odprtini, ki so najpogosteje okrogle, poligonalne ali podolgovate.
- Razmaka med odprtini, kjer se pričakuje interakcijski efekt v delih polne stojine med odprtini.
- Pozicij odprtini v stojini, glede na razpored prečnih sil in upogibnih momentov.
- Asimetrije jeklenega prereza v odnosu s površinami pasnic.
- Vitkosti stojine, kar vpliva na uklonsko nosilnost.

3.3 Načini porušitev zaradi odprtin v stojini

Pričakujejo se različni načini porušitev, ki so prikazani na Sliki 6.2. Pričakuje se jih nad in pod odprtino ali preko nje. Nekateri načini porušitve nastanejo zaradi lokalnega efekta pri velikih lokalnih odprtinah, drugi načini pa se pričakujejo v delih polne stojine med odprtinami. Principi načinov porušitve, ki se lahko pričakujejo, so naslednji:

- Zaradi vpliva upogibnega momenta na poziciji odprtine.
- Zaradi vpliva prečne sile na poziciji odprtine.
- Zaradi Vierendeelovega upogiba, ki je odvisen od strižnega prenosa preko odprtine.
- Zaradi lokalne izbočitve stojine preko celotne višine prereza.
- Zaradi vzdolžnega striga v polni stojini med odprtinami.
- Zaradi lokalne izbočitve polne stojine med odprtinami, ki so blizu skupaj.
- Zaradi lokalne izbočitve polnega dela stojine, ki je odvisna od vitkosti polne stojine in strižne nosilnosti polne stojine med odprtinami.



Slika 6.2: Načini porušitve pri odprtinah, ki so blizu skupaj (Feldmann in sod., 2006d)

3.4 Načini porušitve satastih nosilcev

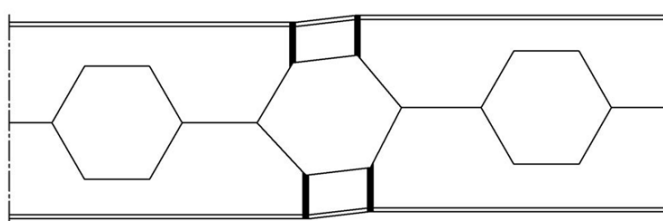
Eksperimentalne študije o satastih nosilcih poročajo o šestih načinih porušitve. Ti so tesno povezani z geometrijo nosilca, vitkostjo, velikostjo in obliko odprtin, tipa obtežbe in lokalne izbočitve polnega dela stojine. Porušitev se pričakuje pri naslednjih načinih odpovedi: Vierendeelovega mehanizma, strižnega mehanizma, lokalne izbočitve polnega dela stojine, bočne zvrnitve nosilca, upogibnega uklona nosilca, zdrsa zvarov po stojini, lokalne izbočitve polnega dela stojine zaradi striga in tlaka.

3.5 Predstavitev načinov porušitev stojin z odprtinami

3.5.1 Vierendeelov ali strižni mehanizem

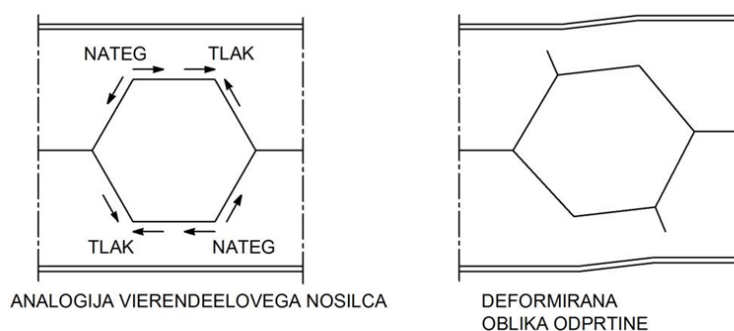
(Demirdjian, 1999)

Ta način porušitve je povezan s prečnimi silami, ki delujejo na nosilec. Zaradi njih se tvorijo plastični členki na izbočenemu kotu na vogalu odprtine T preseza, nad in pod odprtino, Slika 7. Ti členki tvorijo obliko paralelograma, Slika 8. Ta način porušitve je bil prvič poročan v delih Altifillischa (1957) ter Topraca in Cooka (1959). Nosilci z relativno kratkimi razponi z majhnimi T prerezi in dolgimi varilnimi dolžinami so občutljivi na ta način porušitve.



Slika 7: Nastanek plastičnih členkov pri satastem nosilcu s šesterokotnimi odprtinami

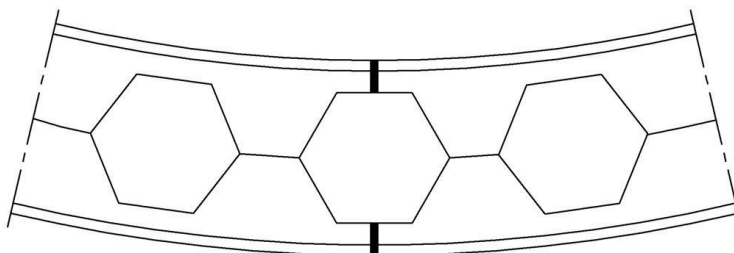
Ko je satasti nosilec obremenjen s prečnimi silami, mora T prerez nad in pod odprtino prenašati strig, kot tudi primarni in sekundarni moment. Primarni moment je upogibni moment nosilca. Sekundarni moment se imenuje Vierendeelov moment in je učinek akcije strižne sile v T prerezu preko horizontalne dolžine odprtine. Iz tega sledi: če se širina odprtine povečuje, se sekundarni moment povečuje. Lokacija porušitve se bo zgodila poleg odprtine pod največjo prečno silo ali v primeru večih odprtin, ki so izpostavljene isti maksimalni prečni sili, kjer bo ena z največjim momentom kritična.



Slika 8: Deformacija odprtine zaradi strižnega mehanizma

3.5.2 Mehanizem upogibnega uklona

Pod upogibom, s tem, da je prerez v 1. ali 2. kompatnostnem razredu T prerezi nad in pod odprtino zaradi vpliva natega in tlaka postanejo polnoplastični, Slika 9. Za ta način porušitve je bilo ugotovljeno, da je tečenje v T prerezih podobno kot pri polnostenskih polnih prerezih.



Slika 9: Upogibni uklon

3.5.3 Bočna zvrnitev nosilca

(Demirdjian, 1999)

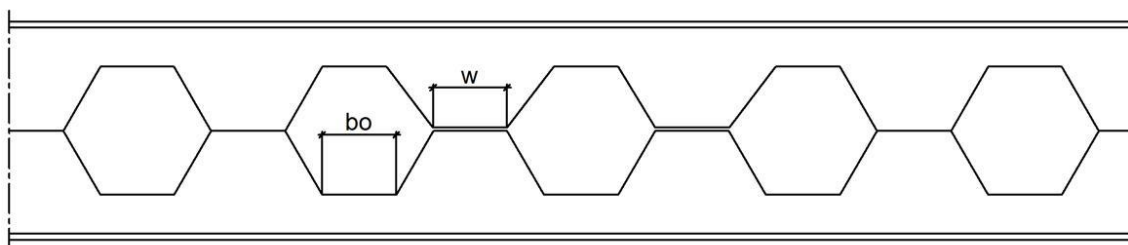
Bočna zvrnitev je povezana z daljšimi razponi z neustrezno bočno podporo za podpiranje tlačene pasnice. Nethercot in Kerdal (1982) sta raziskovala ta način porušitve pri satastih nosilcih in ugotovila, da imajo odprtine v stojini negativni efekt na bočno zvrnitev upogibnega nosilca. Zaradi tega je kasneje pri proceduri računa za bočno zvrnitev prišlo do uporabe reduciranega prereza. Nethercot in Kerdal sta zapisala, da mora biti satasti nosilec zasnovan kot struktura sam v sebi. Odkrila sta, da je edini način, da se pravilno analizira in razume sataste nosilce s pogledom na vsako komponento posebej.

3.5.4 Porušitev varjenih stikov polnih delov stojin

(Demirdjian, 1999)

Srednja debelina zvara po polnem delu stojine med odprtinami se prestriže, ko horizontalna strižna napetost presega mejo plastičnosti varjenih stikov stojin, kot to prikazuje Slika 10. Husain in Speirs (1971) sta raziskala to porušitev s testiranjem šestih nosilcev s kratkimi varilnimi dolžinami po stojini. Ugotovila sta, da je ta način porušitve odvisen od varilne dolžine. Horizontalna dolžina b_o na horizontalnem delu odprtine nad in pod odprtino je iste

dolžine kot je varilna dolžina w , kar pomeni, da se povečajo sekundarni momenti. Iz tega sledi, da je varilna dolžina bolj ranljiva za porušitev. Poleg tega sta ugotovila, da zožanje odprtine močno izboljša učinkovitost nosilcev in daje bolj optimalno konstrukcijo.



Slika 10: Porušitev varjenega polnega dela stojine

Verjetnost nastanka Vierendeelovega mehanizma je verjeten v nosilcih z dolgimi horizontalnimi dolžinami odprtin b_o in daljšimi varilnimi dolžinami w . Po drugi strani, so kratki vari nagnjeni k porušitvi varjenih stikov, zaradi prekoračenih horizontalnih napetosti tečenja v zvaru. Ta koncept je uporabljen v mnogih satastih nosilcih s heksagonalnimi odprtinami.

3.5.5 Lokalno izbočenje polnega dela stojine pod koncentrirano obtežbo

(Demirdjian, 1999)

Vnos koncentrirane sile ali reakcije v točki preko polnega dela stojine povzroči izbočitev polnega dela stojine. Ta način porušitve je bil poročan v eksperimentalnih študijah Tropaca in Cooka (1959) ter Hosaina in Speirsa (1973). Izbočitev polnega dela stojine pod koncentrirano prečno silo ni dodatek k izbočenju dela stojine, kot bi bilo pod prečno silo. Zaradi tega se mora predvideti ojačitev stojine.

3.5.6 Lokalna izbočitev polnega dela stojine z odprtinami

Vzdolžna strižna sila v stojini je povezana z dvojinim upogibom preko višine polnega dela stojine, kot je prikazano na Sliki 10.1. To ima za posledico upogibni efekt v polni stojini med odprtinami preko višine stojine. Ta efekt se imenuje lokalna izbočitev polnega dela stojine.



Slika 10.1: Lokalna izbočitev polnega dela stojine (Feldmann in sod., 2006a)

3.5.6.1 Model za izračun izbočitve polnega dela stojine med odprtinami

Model za lokalno izbočitev polnega dela stojine je kompliciran fenomen, ki je odvisen od:

- Oblike odprtine.
- Vitkosti dela stojine T prereza nad odprtino.
- Asimetričnosti razporeditve odprtin po stojini, kot je to prikazano na Sliki 10.1.

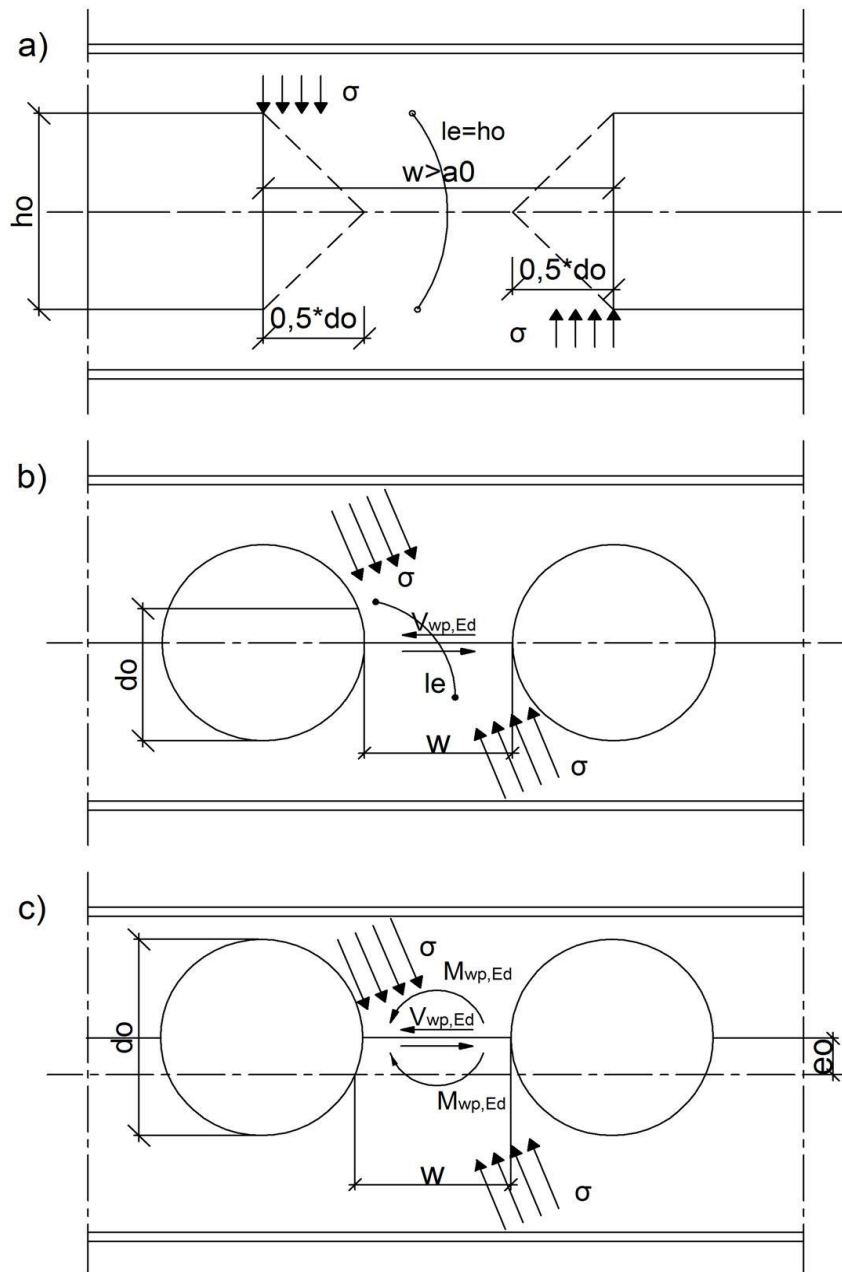
Računski model temelji na sledečih parametrih:

- Tlačne napetosti v polnem delu stojine med odprtinami so ekvivalentne vzdolžni strižni napetosti.
- Izbočitev preko efektivne višine stojine, ki je odvisna od prostora med odprtinami.
- Dodatne upogibne napetosti v ravnini, ki vplivajo na polni del stojine med odprtinami.

Obstajajo trije primeri razmaka med odprtinami:

- Odprtine, katerih medsebojna razdalja je večja ali pa da so lokalizirane (pri teh odprtinah ni interakcije), to se vidi na Sliki 10.2 a).
- Odprtine, katerih medsebojna razdalja je manjša in med njimi povzroča povečanje napetosti v polnem delu stojine, to se vidi na Sliki 10.2 b).

- Nesimetrično pozicionirane odprtine v višini stojine, ki povzročajo momente v ravnini polnega dela stojine med odprtini, to se vidi na Sliki 10.2 c).

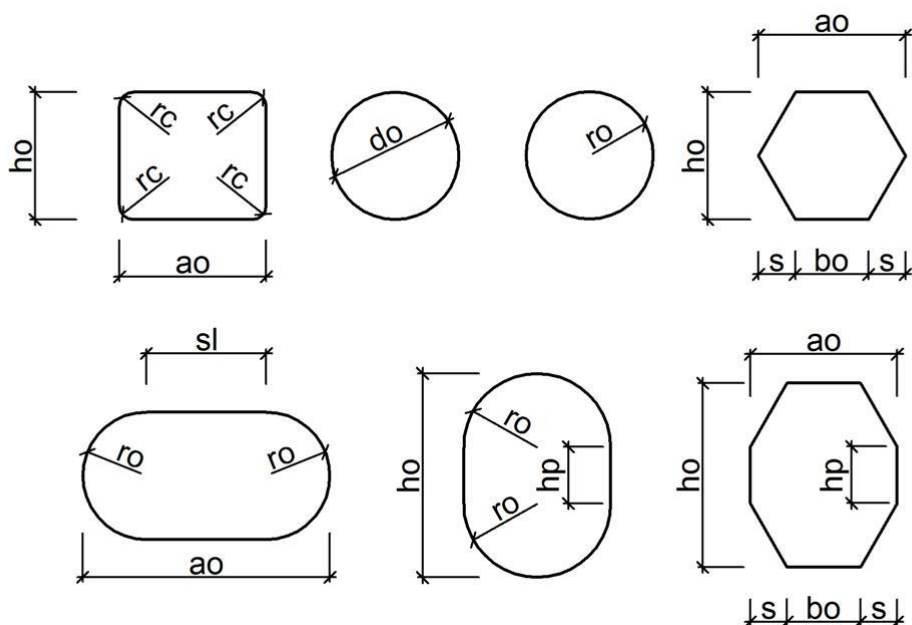


Slika 10.2: Upogib polnega dela stojine (Feldmann in sod., 2006d)

4 GEOMETRIJA ODPRTIN V STOJINI

Na Sliki 11 so podane oznake za tipe odprtin v stojini:

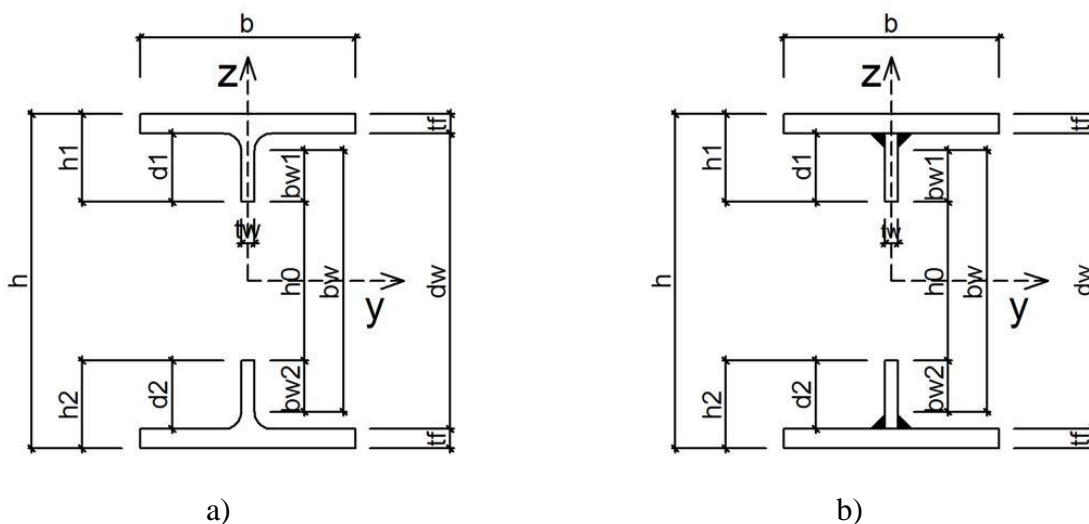
- Pravokotne odprtine so opredeljene z višino odprtine h_o , njeno širino a_o in po potrebi z radijem zaokrožitve r_c .
- Okrogle odprtine so opredeljene s premerom d_o ali polmerom odprtine r_o .
- Šesterokotne odprtine so opredeljene z višino odprtine h_o , minimalno širino poligonalne odprtine b_o , širino odprtine a_o in dolžino poševnega reza po stojini s .
- Povišane okrogle odprtine so opredeljene z višino odprtine h_o , njenim polmerom r_o in vmesno višino h_p .
- Osmerokotne odprtine so opredeljene z višino odprtine h_o , minimalno širino poligonalne odprtine b_o , širino odprtine a_o , dolžino poševnega reza po stojini s in vmesno višino h_p .
- Podolgovate odprtine so opredeljene s polmerom odprtine r_o , širino odprtine a_o in ravnim delom odprtine med polkrogoma s_l .



Slika 11: Geometrija odprtin v stojini

Geometrija prečnega prereza z odprtino velja za:

- Vroče valjane prereze, Slika 11.1 a).
- Varjene prereze, Slika 11.1 b).

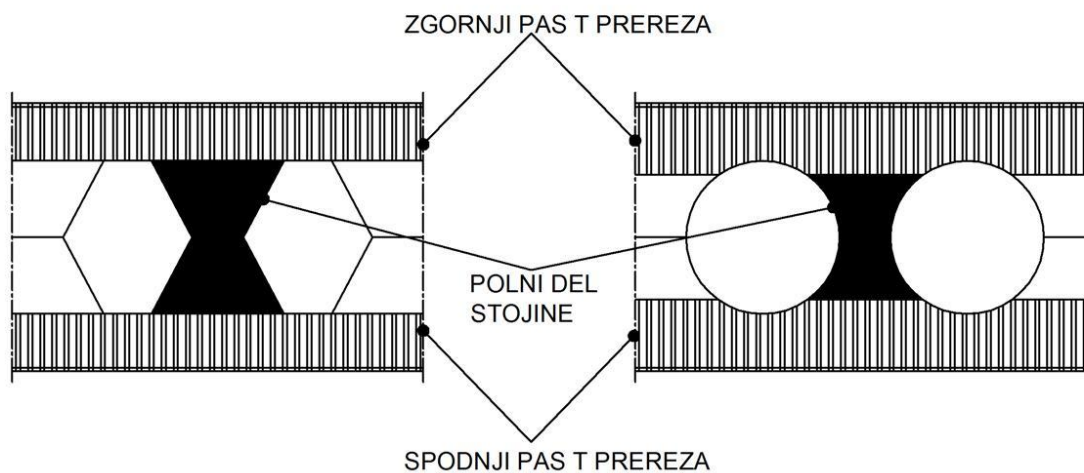


kjer je:

- h višina prereza;
 t_f debelina pasnice;
 t_w debelina stojine;
 b širina pasnice;
 d_w višina stojine brez pasnic;
 d_1 višina stojine zgornjega T prereza brez pasnic;
 d_2 višina stojine spodnjega T prereza brez pasnic;
 h_1 višina zgornjega T prereza s pasnico;
 h_2 višina spodnjega T prereza s pasnico;
 b_w višina ravnega dela stojine z odprtino;
 b_{w1} višina ravnega dela stojine T prereza nad odprtino;
 b_{w2} višina ravnega dela stojine T prereza pod odprtino;

Slika 11.1: Prečni prerez z odprtino (ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

Polni del stojine med odprtinami s pripadajočima T prerezoma nad in pod odprtino je prikazan na Sliki 11.2.



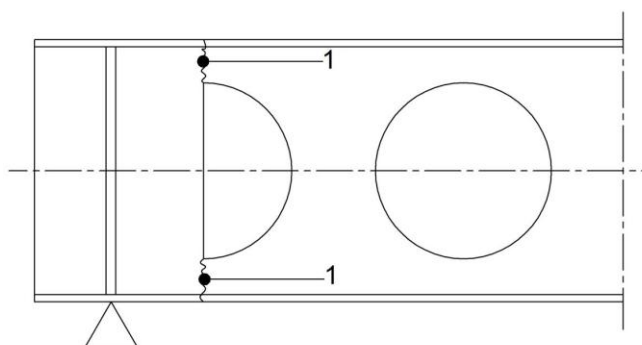
Slika 11.2: Polni del stojine s T prerezoma (ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

5 RAČUNSKI MODELI

(ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

Za nosilce z odprtini v stojini je potrebno računsko preveriti naslednje porušne mehanizme:

- Porušitev zaradi vnosa koncentrirane sile, Slika 12.

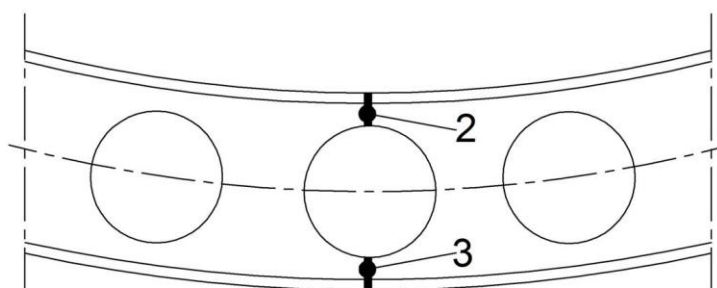


kjer je:

- 1 Plastifikacija zaradi striga.

Slika 12: Porušitev prečnega prereza zaradi prečne sile

- Porušitev zaradi upogibnega momenta, Slika 13.

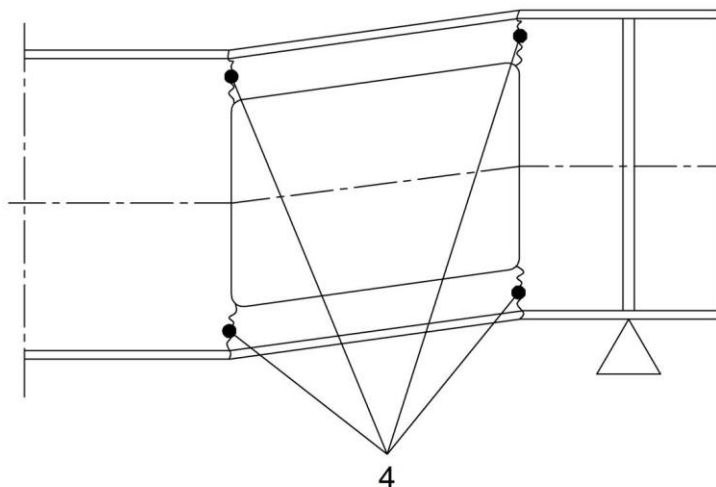


kjer je:

- 2 Plastifikacija v tlačni coni.
- 3 Plastifikacija v natezni coni.

Slika 13: Porušitev prečnega prereza zaradi upogiba

- Porušitev zaradi nastanka Vierendeelovega mehanizma pri odprtinah, Slika 14.



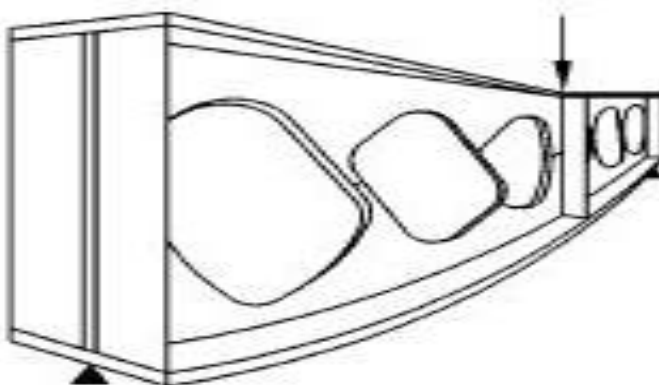
kjer je:

- 4 Plastični členki.

Slika 14: Vierendeelov mehanizem okoli odprtine

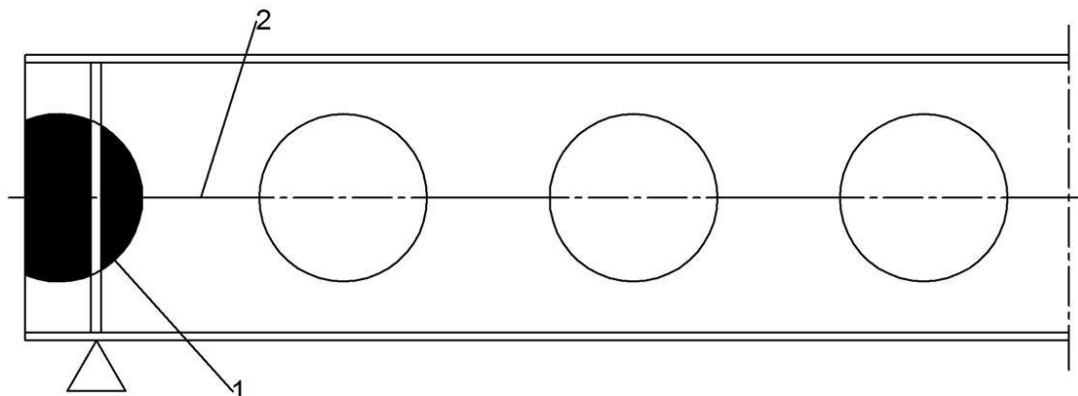
Za sataste nosilce je potrebno poleg naštetih dokazovanj, pokazanih na Sliki 12, Sliki 13 in Sliki 14 računsko preveriti tudi naslednje porušne mehanizme, ki so posledica vzdolžnega striga v polnem delu stojine med odprtinami:

- Porušitev zaradi momenta v polnem delu stojine med odprtinami, Slika 14.1.



Slika 14.1: Izbočenje polnega dela stojine med odprtinami zaradi vzdolžne sile
(ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

- Porušitev polnega dela stojine med odprtinami zaradi delovanja vzdolžne strižne sile ali porušitev zvara med varjenima polnima deloma stojin, Slika 15.



kjer je:

- 1 Zapolnitev odprtine s pločevino.
- 2 Možna porušitev zaradi striga.

Slika 15: Porušni mehanizem zaradi vnosa koncentrirane sile in vzdolžnega striga

6 RAZVRSTITEV PREREZOV

6.1 Uvod

Razvrstitev prerezov je odvisna od:

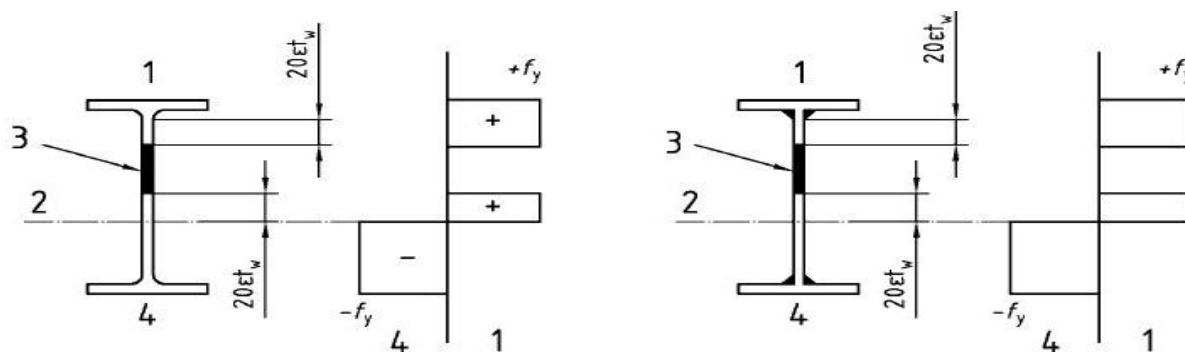
- vpliva obtežbe na tlačeno pasnico;
- dela stojine v tlaku, ki je odvisna od simetričnosti prereza;
- višine stojine T prerezov nad in pod odprtino;
- širine odprtine.

Prva dva kriterija sta definirana v SIST EN 1993-1-1, medtem ko sta tretji in četrti kriterij odvisna od velikosti odprtin.

6.2 Razvrstitev prečnih prerezov brez odprtin

(ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

Za prečni prerez sta zahtevana 1. ali 2. razred kompaktnosti za pasnici ter 1.,2., ali 3. razred kompaktnosti za stojino. Polni prečni prerez s stojino v 3. razredu ter s pasnicama v 1. ali 2. razredu se lahko obravnava tudi kot efektivni prerez 2. razreda z efektivno stojino. Del stojine v tlaku se nadomesti z odsekom $20 \cdot \varepsilon \cdot t_w$ pod tlačeno pasnico in z drugim odsekom $20 \cdot \varepsilon \cdot t_w$ nad plastično nevtralno osjo efektivnega prečnega prereza, prikazano na Sliki 15.1 .



1 tlak

2 nevtralna plastična os

3 del zanemarjene stojine

4 nateg

Slika 15.1: Efektivni prerez razreda 2 (ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

kjer je:

$$\varepsilon \quad \text{koeficient} \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \text{ in } f_y \text{ v } \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right];$$

f_y meja plastičnosti jekla.

Kontrolo kompaktnosti se dela za:

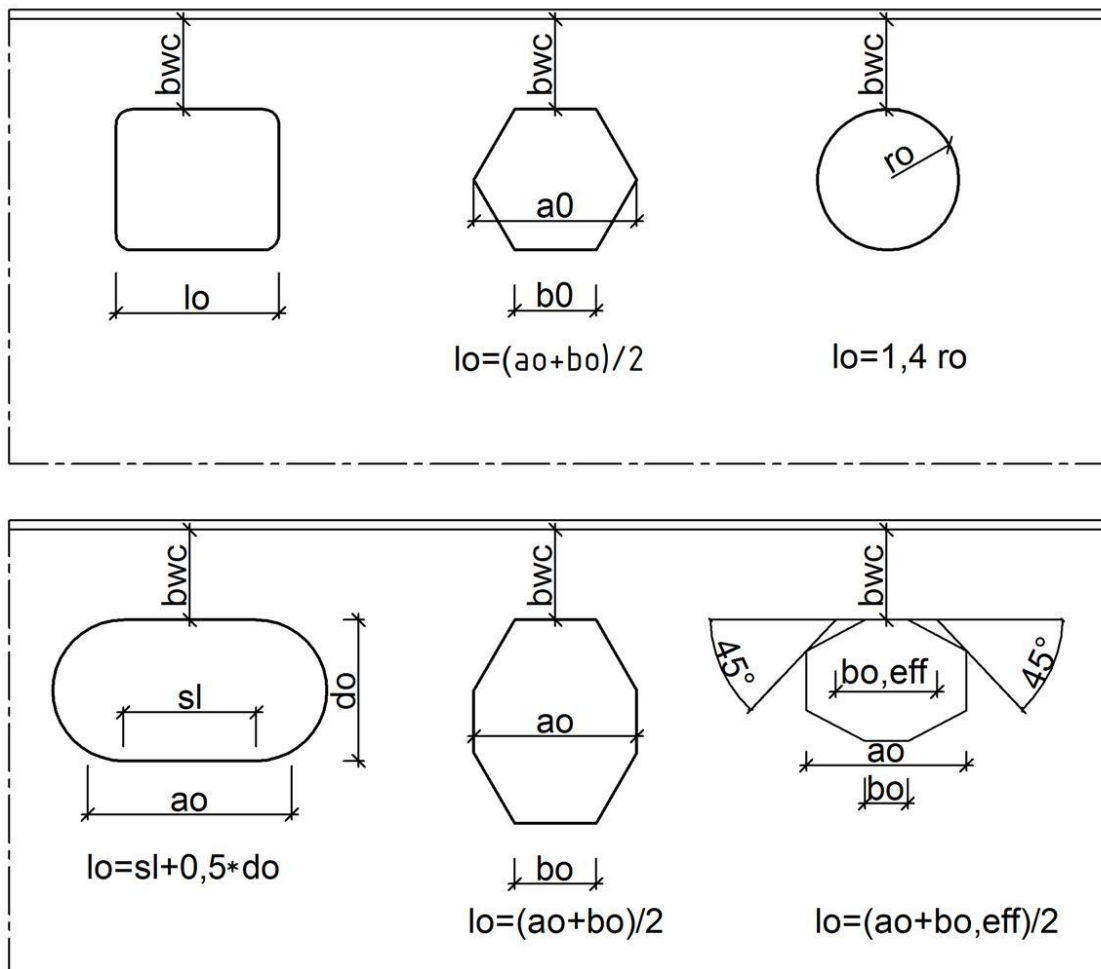
- stojine po (SIST EN 1993-1-1:2005; Preglednica 5.2, list 1)
- pasnice po (SIST EN 1993-1-1:2005; Preglednica 5.2, list 2 in 3)

6.3 Razvrstitev prečnih prerezov z odprtino

6.3.1 Efektivna dolžina odprtine

Efektivna dolžina odprtine (Slika 16) za obravnavo stabilnosti stojine nad in pod odprtino.

Efektivna dolžina l_o je neodvisna od b_{wc} .



kjer je:

b_{wc} minimalna višina stojine T prereza b_{w1} ali b_{w2} ;

$b_{o,eff}$ efektivna minimalna širina odprtine;

l_o efektivna dolžina odprtine.

Slika 16: Del stojine z odprtinami

6.3.2 Klasifikacija pasnice

Klasifikacijo pasnice se vzame iz (SIST EN 1993-1-1:2005; Preglednica 5.2, list 2 in 3).
Generalno se pasnica obravnava kot razred kompaktnosti 1 ali 2.

6.3.3 Klasifikacija stojine

(Feldmann in sod., 2006d)

(ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

Zaradi razvoja Vierendeelovega mehanizma se pojavijo plastični členki nad in pod odprtino. Za neojačano stojino za T prerez nad in pod odprtino se obravnava stojina kot razred 1, 2 ali 3. Stojine z ojačanim T prerezom morajo biti pred ojačitvijo razreda kompaktnosti 1, 2 ali 3. Ojačitev, ki je del prereza, mora biti v razredu kompaktnosti 1 ali 2. Neojačan T prerez nad in pod odprtino se klasificira glede na razmerji širine odprtine l_o in višine zgornjega T prereza b_{wc} (Slika 16).

- Kontrola za stojine kompaktnostnega razreda 2:

$$b_{wc} \leq \frac{10 \cdot t_w \cdot \varepsilon}{\sqrt{1 - \left(\frac{32 \cdot t_w \cdot \varepsilon}{l_o}\right)^2}}, \text{ če je } l_o > 32 \cdot t_w \cdot \varepsilon \quad (6.0)$$

Vsi kompaktnostni razredi 3 stojine se obravnavajo kot razred 2, če je $l_o \leq 32 \cdot t_w \cdot \varepsilon$. Za prereze razreda 2, se sme uporabiti plastične lastnosti T prereza.

- Kontrola za stojine kompaktnostnega razreda 3:

$$b_{wc} \leq \frac{14 \cdot t_w \cdot \varepsilon}{\sqrt{1 - \left(\frac{36 \cdot t_w \cdot \varepsilon}{l_o}\right)^2}}, \text{ če je } l_o > 36 \cdot t_w \cdot \varepsilon \quad (6.1)$$

Vsi kompaktnostni razredi 4 za stojine se obravnavajo kot razred 3, če je $l_o \leq 36 \cdot t_w \cdot \varepsilon$. Za prereze razreda 3, se sme uporabiti elastične lastnosti T prereza.

- Kontrola za stojine kompaktnostnega razreda 4:

Za račun efektivnega prereza se uporabi limitirana vrednost b_{wc} , za stojino razreda 3.

Drugi pogled na dolžino odprtine je prikazan v Preglednici 1, kjer je klasifikaciji stojine avtomatsko zadoščeno za manjše odprtine.

Preglednica 1: Manjša meja l_o , kjer je zadoščeno vsem razredom stojin za b_{wc}

Tip odprtine	Meja razreda	Razredu stojine je zagotovljeno, če je:
Okrogle	2	$l_o \leq 46 \cdot t_w \cdot \epsilon$
Okrogle	3	$l_o \leq 51 \cdot t_w \cdot \epsilon$
Pravokotne	2	$l_o \leq 32 \cdot t_w \cdot \epsilon$
Pravokotne	3	$l_o \leq 36 \cdot t_w \cdot \epsilon$

6.4 Efektivna dolžina odprtine za Vierendeelov moment

(Feldmann in sod., 2006c)

(ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

Za Vierendeelov moment odprtine je efektivna dolžina podana kot:

$$L_T = 0,45 \cdot d_o \quad - \quad \text{okrogle odprtine} \quad (6.2)$$

$$L_T = s_l + 0,5 \cdot d_o \quad - \quad \text{podolgovate odprtine} \quad (6.3)$$

$$L_T = a_o \quad - \quad \text{pravokotne odprtine} \quad (6.4)$$

$$L_T = b_o \quad - \quad \text{poligonalne odprtine} \quad (6.5)$$

kjer je:

L_T efektivna dolžina odprtine za Vierendeelov moment.

7 PROJEKTNO VODILO ZA STOJINE Z LOKALNIMI ODPRTINAMI

7.1 Nosilnost odprtin brez ojačitev med stojinami

Vse stojine, ki prekoračijo $\frac{d_w}{t_w} > 69 \cdot \varepsilon$ (7.0), so strižno vitke in jih je potrebno prečno podpreti. Geometrijske mejne vrednosti se morajo upoštevati, da se ne bi uporabilo prevelikih dimenzij odprtin. Za te odprtine velja, da so definirane v območju z manjšo prečno silo. Pravila se razlikujejo glede na tip odprtine. Pozicije le-teh se kontrolira s kontrolami, ki so navedene v nadaljevanju.

7.2 Pozicije in dimenzije odprtin

(ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

(Feldmann in sod., 2006d)

Maksimalna višina odprtine:

- Za poligonalno odprtino velja: $h_o \leq 0,75 \cdot d_w$ (7.1)

- Za okroglo odprtino velja: $h_o \leq 0,80 \cdot d_w$ (7.2)

Maksimalna širina odprtine:

- Za poligonalno odprtino velja: $a_o \leq 3 \cdot h_o$ (7.3)

- Za okroglo odprtino velja: - (7.4)

Maksimalna višina stojin T prerezov:

- Zgornji T prerez: $d_1 \geq 0,10 \cdot d_w$ (7.5)

- Spodnji T prerez: $d_2 \geq 0,10 \cdot d_w$ (7.6)

Maksimalno razmerje T prerezov:

- Za poligonalno odprtino velja: $\frac{h_2}{h_1} \geq 1; \frac{h_2}{h_1} \leq 2$ (7.7)

- Za okroglo odprtino velja: $\frac{h_2}{h_1} \geq 0,5; \frac{h_2}{h_1} \leq 3$ (7.8)

Nesimetričnost odprtin povzroča momente v stojini. Bolje je, da je odprtina v stojini zgoraj, oziroma, da je pozitivno ekscentrična.

Minimalna širina polne stojine med odprtinami:

- Za poligonalne odprtine velja: $w \geq \frac{a_o \cdot V_{Ed}}{V_{c,Rd} - V_{Ed}}$, vendar $w \geq h_o$ (7.9)

- Za okrogle odprtine velja: $w \geq \frac{d_o \cdot V_{Ed}}{V_{c,Rd} - V_{Ed}}$, vendar $w \geq 1,5 \cdot d_o$ (7.10)

Nosilnost stojine proti strigu $V_{c,Rd}$ ustreza minimalni vrednosti izmed $V_{pl,Rd}$ in $V_{ba,Rd}$.

Kjer je:

w širina polnega dela stojine med robovi odprtin;

V_{Ed} projektna vrednost prečne sile;

$V_{c,Rd}$ projektna strižna nosilnost prereza

$V_{pl,Rd}$ projektna plastična strižna nosilnost prereza;

$V_{ba,Rd}$ projektna nosilnost polne stojine pri lokalni izbočitvi.

Minimalna razdalja roba odprtine do vnosa koncentrirane sile:

- Za poligonalno odprtino brez ojačitve velja: h (7.11)

- Za okroglo odprtino brez ojačitve velja: $0,5 \cdot h$ (7.12)

- Za poligonalno odprtino z ojačitvijo velja: $0,5 \cdot h_o$ (7.13)

- Za okroglo odprtino z ojačitvijo velja: $0,25 \cdot h_o$ (7.14)

Minimalna dolžina med dolžina med skrajno mejo ojačitve in prvo odprtino a_r (Feldmann in sod., 2006d):

- Za poligonalno odprtino z $a_r \geq h$ velja: $a_r \geq h$ (7.15)

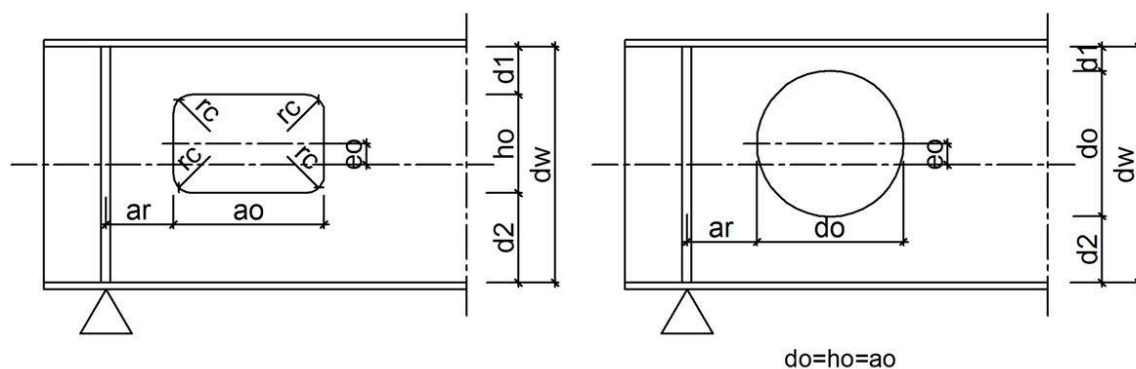
- Za okroglo odprtino z $a_r \geq h$ velja: $a_r \geq 0,5 \cdot h$ (7.16)
- Za poligonalno odprtino z $a_r < h$ velja: $a_r \geq a_o$ (7.17)
- Za okroglo odprtino z $a_r < h$ velja: $a_r \geq 0,5 \cdot h$ (7.18)

V ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N je podano, da je pri oddaljenosti prve odprtine od roba nosilca zadoščeno za poligonalne in za okrogle odprtine z $a_r \geq 0,5 \cdot d_w$. (7.18.1)

Radji zaokrožitve na vogalu pravokotne ali kvadratne odprtine:

$$r_c \geq 2 \cdot t_w, \text{ ampak } r_c \geq 15\text{mm} \quad (7.19)$$

Za geometrijske omejitve se v primerih odprtin, ki niso zajeti na Sliki 11, za vrednost širine odprtine a_o vzame največjo vrednost širine odprtine, za višino pravokotne odprtine se vzame h_o ter za krožne odprtine največja vrednost d_o . Pri ekscentričnosti odprtine e_o velja, da ne sme biti ekscentričnost večja kot $0,125 \cdot d_w$, kar je prikazano na Sliki 17.



Slika 17: Položaj odprtin v stojini in dimenzije

V primerih bližine odprtin v območju podpore, se mora preveriti nosilnost stojine proti vzdolžnemu strigu nosilca med odprtinami in ekstremi v nosilcu.

7.3 Kontrola vnosa koncentrirane sile

(ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

Nosilnost nosilcev brez prečnih ojačitev, ki so obremenjeni s koncentrirano obtežbo, ki se prenaša preko pasnic v stojino se preverja z metodo iz ENV 1993-1-1:1992; točka 5.7. Pri tem

velja, da ni koncentrirane obtežbe v vplivnem območju a_z pri neojačanih stojinah. Celotna dolžina cone vpliva a_z na območju odprtine je enaka izrazu (7.20).

$$a_z = a_o + 2 \cdot a_p \quad (7.20)$$

Za izračun a_z je potrebno določiti dodatno dolžino na coni vpliva odprtine a_p v območju celotne dolžine cone vpliva s pomočjo izrazov (7.21), (7.22), (7.23) in (7.24).

Če je $\frac{d_w}{t_w} \leq 90 \cdot \varepsilon$ potem velja:

- Za pravokotno odprtino: $a_p = h_o$ (7.21)

- Za krožno odprtino: $a_p = 0,9 \cdot d_o$ (7.22)

Če je $\frac{d_w}{t_w} > 90 \cdot \varepsilon$ potem velja:

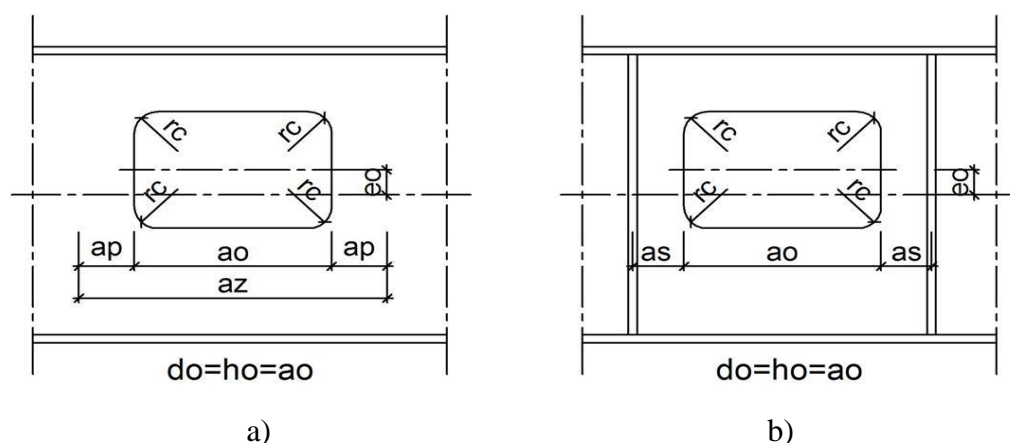
- Za pravokotno odprtino:

$$a_p = \left(\frac{d_w/t_w}{90 \cdot \varepsilon} \right) \cdot h_o, \text{ vendar mora biti } a_p \leq d_w \quad (7.23)$$

- Za krožno odprtino:

$$a_p = \left(\frac{d_w/t_w}{100 \cdot \varepsilon} \right) \cdot d_o, \text{ vendar mora biti } a_p \leq d_w \quad (7.24)$$

Prečno ojačitev je potrebno zagotoviti zaradi reakcije podpore ali drugih koncentriranih sil, ki se uporabljajo na vplivnem območju odprtine a_z . Moramo vedeti, kolikšno je vplivno območje na področju prečnih ojačitev zaradi ENV 1993-1-1:1992; točka 5.7.6(1). Pri uporabi prečnih ojačitev na področju cone vpliva, ne smejo biti ojačitve na večji oddaljenosti od roba odprtine do osi sredine debeline prečne ojačitve a_s , prikazano na Sliki 18 b). Če pa so na coni vpliva še druge prečne sile, se nosilec analizira na dolžini a_z ali pa med prečnimi ojačitvami, če je ta dolžina manjša. Na Sliki 18 a) je prikazana cona vpliva za odprtine brez ojačitve in na Sliki 18 b) za odprtine z ojačitvami.



Slika 18: Cona vpliva odprtine

7.4 Strižna nosilnost prereza z odprtino

Strižna nosilnost jeklenega prereza se močno zmanjša zaradi prisotnosti odprtine. Za velike razpone nosilca je uporaba stojin brez ojačitev relativno majhna. Strižne sile v T prerezi nad in pod odprtino vplivajo na Vierendeelovo upogibno nosilnost.

7.4.1 Kontrola strižne nosilnosti prereza z odprtino

(ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

Redukcijo strižne nosilnosti se naredi zaradi odprtine v območju izoliranega dela stojine. Ta se zanemari na nivo prečnega prereza, ki se nahaja na območju cone vpliva a_z in se poveča še za dodatne dolžine cone vpliva a_p , prikazano na Sliki 18 a) ali na dolžini a_s , prikazano na Sliki 18 b). Strižno nosilnost prečnega prereza z odprtino se lahko poveča z ojačitvijo stojine, kar je pokazano v poglavju 9. Projektno strižno nosilnost prereza z odprtino $V_{o,Rd}$ se določi z uporabo projektne plastične strižne nosilnosti odprtine $V_{o,pl,Rd}$ po izrazu (7.25).

$$V_{o,Rd} = V_{o,pl,Rd}, \text{ vendar mora biti } V_{o,Rd} \geq V_{o,ba,Rd} \quad (7.25)$$

kjer je:

$V_{o,Rd}$ projektna strižna nosilnost prereza z odprtino;

$V_{o,pl,Rd}$ projektna plastična strižna nosilnost prereza z odprtino;

$V_{o,ba,Rd}$ projektna nosilnost stojine z odprtino pri lokalni izbočitvi.

7.4.1.1 Kontrola strižne nosilnosti prereza s pravokotno odprtino

Projektno plastično strižno nosilnost prereza s pravokotno odprtino $V_{o,pl,Rd}$ se dobi z naslednjimi izrazi:

$$V_{o,pl,Rd} = \left(V_{pl,Rd} - \frac{h_o \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} \right) \cdot \sqrt{\frac{\eta}{1+\eta}} \quad (7.26)$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad (7.27)$$

η mora biti:

$$\eta = 0,75 \cdot \left[\frac{(d_w - h_o)^2 + 4 \cdot e_o^2}{a_o \cdot (d_w - h_o)} \right]^2 \quad (7.28)$$

7.4.1.2 Kontrola strižne nosilnosti prereza z okroglo odprtino

Projektno plastično strižno nosilnost prereza z okroglo odprtino $V_{o,pl,Rd}$ se dobi z naslednjimi izrazi:

$$V_{o,pl,Rd} = \left(V_{pl,Rd} - \frac{0,9 \cdot d_o \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} \right) \cdot \sqrt{\frac{\eta}{1+\eta}} \quad (7.29)$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad (7.30)$$

η mora biti:

$$\eta = 3,7 \cdot \left[\frac{(d_w - 0,9 \cdot d_o)^2 + 4 \cdot e_o^2}{d_o \cdot (d_w - 0,9 \cdot d_o)} \right]^2 \quad (7.31)$$

kjer je:

$V_{pl,Rd}$ projektna plastična strižna nosilnost dela stojine brez odprtine;

A_v površina strižnega prereza;

η faktor za strižni prerez z odprtino;

γ_{M0} delni faktor odpornosti prečnega prereza za vse razrede kompaktnosti.

Površina strižnega prereza, brez odprtine A_v iz izraza (7.30) se dobi v standardu SIST EN 1993-1-1:2005; točka 6.2.6(3). Projektno plastično strižno nosilnost dela stojine brez odprtine $V_{pl,Rd}$, iz izraza (7.30) se dobi v standardu SIST EN 1993-1-1:2005, točka 6.2.6(2).

7.4.2 Projektna nosilnost stojine odprtine pri lokalni izbočitvi

Potrebno je preveriti projektno nosilnost polne stojine po standardu ENV 1993-1-1:1992 po enačbi (7.32):

$$V_{ba,Rd} = \frac{d_w \cdot t_w \cdot \tau_{ba}}{\gamma_{M1}} \quad (7.32)$$

kjer je:

$V_{ba,Rd}$ projektno nosilnost polne stojine pri lokalni izbočitvi;

τ_{ba} enostavna postkritična strižna napetost;

γ_{M1} delni faktor odpornosti proti prelomu prereza v nategu.

Dobljen rezultat iz enačbe (7.32) se upošteva v enačbi za nosilnost prereza stojine z odprtino proti lokalnem izbočenju $V_{o,ba,Rd}$, v izrazih (7.33) in (7.34).

Projektna nosilnost stojine s pravokotnimi odprtinami pri lokalni izbočitvi:

$$V_{o,ba,Rd} = V_{ba,Rd} \cdot \left(1 - h_o/d_w + 0,3 \cdot a_o/d_w \right) \quad (7.33)$$

Projektna nosilnost stojine z okroglimi odprtinami pri lokalni izbočitvi:

$$V_{o,ba,Rd} = V_{ba,Rd} \cdot \left(1 - d_o/d_w \right) \quad (7.34)$$

7.4.3 Kontrola strižne nosilnosti prečnega prereza z odprtino

Kontrola strižne nosilnosti prereza z odprtino se dela s pogojem, iz enačbe (7.35):

$$V_{o,pl,Rd} \geq V_{o,ba,Rd} \quad (7.35)$$

Pri kontroli razmaka med odprtinami w se uporabi projektno strižno nosilnost prereza z odprtino $V_{o,Rd}$ iz izraza (7.25) se zanj izbere minimalno vrednost izmed $V_{o,pl,Rd}$ in $V_{o,ba,Rd}$, vendar mora biti minimalna vrednost večja ali enaka V_{Ed} , kot je podano v enači (7.36).

$$V_{Ed} \leq V_{o,Rd} \quad (7.36)$$

7.5 Upogibna nosilnost prereza z odprtino

Upogibna nosilnost T prereza nad in pod odprtino je odvisna od razreda kompaktnosti. Plastično globalno analiza se izvede za prereze razredov kompaktnosti 1 in 2 Elastična globalna analiza se izvede za prereze razreda kompaktnosti 3.

7.5.1 Kontrola upogibne nosilnosti prereza z odprtino

(ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

Redukcija upogibne nosilnosti za odprtino med izoliranimi polnima deloma stojine se zanemari na nivo prečnega prereza, ki se nahaja na območju cone vpliva a_z in se poveča še za dodatne dolžine cone vpliva a_p in se določi po izrazih (7.21), (7.22), (7.23) in (7.24) ali pa preko dolžine a_s . Upogibno nosilnost prereza z odprtino se lahko poveča z ojačitvijo stojine, glej poglavje 9. Projektno upogibno nosilnost prereza z odprtino $M_{o,Rd}$ se z upoštevanjem projektne vrednosti prečne sile V_{Ed} , ki deluje v točki odprtine, se preveri z uporabo naslednjih dveh metod za pravokotne in okrogle prereze.

7.5.1.1 Kontrola upogibne nosilnosti prereza s pravokotno odprtino

- Za prečne prereze za 1. in 2. razred kompaktnosti velja:

$$M_{o,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot \left(1 - \frac{0,25 \cdot t_w \cdot h_o \cdot (h_o + 4 \cdot e_o)}{W_{pl}} - \mu_1 \cdot \frac{V_{Ed}}{V_{o,Rd}} \right) \quad (7.37)$$

- Za prečne prereze za 3. razred kompaktnosti velja:

$$M_{o,Rd} = M_{el,Rd} \cdot \left(1 - \frac{t_w \cdot (h_o + 2 \cdot e_o)^3}{12 \cdot I_y} - \mu_1 \cdot \frac{V_{Ed}}{V_{o,Rd}} \right) \cdot \mu_2 \quad (7.38)$$

s tem:

$$\mu_1 = 0,25 \cdot t_w \cdot d_w^2 \cdot \frac{[1+3 \cdot (0,7 - h_o/d_w) \cdot (a_o/d_w)]}{W_{pl}} \quad (7.39)$$

$$\mu_2 = 1,125 - 0,001 \cdot a_o/t_w \quad \text{za } a_o/t_w > 125 \cdot \varepsilon \quad (7.40)$$

$$\mu_2 = 1 \quad \text{za } a_o/t_w \leq 125 \cdot \varepsilon \quad (7.41)$$

7.5.1.2 Kontrola upogibne nosilnosti prereza z okroglo odprtino

- Za prečne prereze za 1. in 2. razred kompaktnosti velja:

$$M_{o,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot \left(1 - 0,225 \cdot t_w \cdot d_o \cdot \frac{(0,9 \cdot d_o + 4 \cdot e_o)}{W_{pl}} - \mu_1 \cdot \frac{V_{Ed}}{V_{o,Rd}} \right) \quad (7.42)$$

s tem:

$$M_{o,Rd} \leq M_{pl,Rd} \cdot \left(1 - 0,25 \cdot t_w \cdot d_o \cdot \frac{d_o + 4 \cdot e_o}{W_{pl}} \right) \quad (7.43)$$

- Za prečne prereze za 3. razred kompaktnosti velja:

$$M_{o,Rd} = M_{el,Rd} \cdot \left(1 - \frac{t_w \cdot (0,9 \cdot d_o + 2 \cdot e_o)^3}{12 \cdot I_y} - \mu_1 \cdot \frac{V_{Ed}}{V_{o,Rd}} \right) \cdot \mu_2 \quad (7.44)$$

z:

$$M_{o,Rd} \leq M_{el,Rd} \cdot \left(1 - \frac{t_w \cdot (d_o + 2 \cdot e_o)^3}{12 \cdot I_y} \right) \quad (7.45)$$

s tem:

$$\mu_1 = 0,25 \cdot t_w \cdot d_w^2 \cdot \frac{[1+1,35 \cdot (0,7 - 0,9 \cdot d_o/d_w) \cdot (a_o/d_w)]}{W_{pl}} \quad (7.46)$$

$$\mu_2 = 1,125 - 0,001 \cdot a_o/t_w \quad \text{za } a_o/t_w > 125 \cdot \varepsilon \quad (7.47)$$

$$\mu_2 = 1 \quad \text{za } a_o/t_w \leq 125 \cdot \varepsilon \quad (7.48)$$

Elastični moment nosilnosti prereza brez odprtine $M_{el,Rd}$ se izračuna po standardu SIST EN 1993-1-1:2005; točka 6.2.5. Plastični moment nosilnosti prereza brez odprtine $M_{pl,Rd}$ se izračuna po standardu SIST EN 1993-1-1:2005; točka 6.2.5. projektna vrednost upogibnega momenta M_{Ed} mora biti manjša od projektne upogibne nosilnosti prereza z odprtino $M_{o;Rd}$, izraz (7.49).

$$M_{Ed} \leq M_{o;Rd} \quad (7.49)$$

kjer je:

$M_{o;Rd}$ projektna upogibna nosilnost prereza z odprtino;

M_{Ed} projektna vrednost upogibnega momenta;

I_y vztrajnostni moment prereza brez odprtine okoli osi $y - y$;

W_{pl} plastični odpornostni moment prereza brez odprtine;

$M_{el,Rd}$ elastični moment nosilnosti prereza brez odprtine;

$M_{pl,Rd}$ plastični moment nosilnosti prereza brez odprtine;

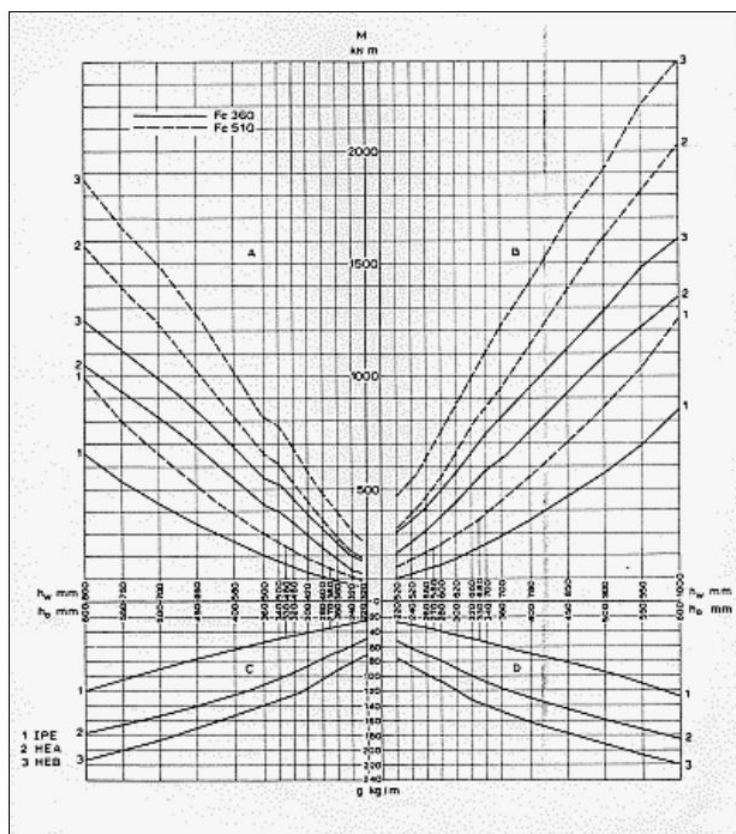
μ_1 koeficient;

μ_2 koeficient.

8 SATASTI NOSILCI

8.1 Razvoj satastih nosilcev skozi zgodovino

Začetek proizvodnje satastih nosilcev (SN) je bil tesno povezan z razvojem električnih varilnih tehnologij na področju jeklenih konstrukcij od konca 20-ih let prejšnjega stoletja. Prvi znani satasti nosilci so bili načrtovani in izdelani v zgodnjih 30-ih s strani tovarne Škoda v Pilsner-ju. To so bili strešni nosilci z razponom 12 metrov, v tovarni v kraju Doudlevec (Češka). Prva prijava patenta za uporabo za sataste nosilce izvira iz leta 1937 iz Velike Britanije. Britanski patentni urad je leta 1939 izdal patent, ki je zelo obsežen, za britanskega prosilca Geoffrey Murray Boyd. Ta je izumil Boydov nosilec, katerega ime se je kasneje spremenilo v satasti nosilec.



Slika 18.1: Diagram za določanje dimenzij odprtin in prereza SN s heksagonalnimi odprtinami (Grünbauer BV)

Začetna spodbuda za elastično metodo izračuna je bila dana v nekdanji Češkoslovaški s strani Františka Faltusa. Leta 1942 je objavil dva članka o svoji metodi izračuna v strokovni reviji *Technický Obzor*. Šele v drugi polovici leta 50-ih je bil v Ameriki in Nemčiji opravljen nadaljni razvoj metode. Elastična metoda izračuna je bila v celoti izpopolnjena v obdobju 1955-1965, plastična metoda pa je bila uvedena v jeklene konstrukcije v zgodnjih 70-ih. Razvoj razunskih metod za sataste nosilce je zahteval precej veliko nadaljnega razvoja, saj odprtine v stojini predstavljajo znatno prekinitev napetosti. Teorija je bila podprta s potrebnimi eksperimentalnimi raziskavami na obnašanje in porušitvenih mehanizmov satastih nosilcev. Do sredine 70-ih je metoda izračuna postala izkristalizirana. *Merkblatt von Beratungsstelle für Stahlverwendung, Düsseldorf*, 3. izdaja (1976), daje popoln pregled, s številnimi diagrami za določanje izbire prereza in geometrijo satastega nosilca, glej Sliko 18.1. Danes se sataste nosilce računa s pomočjo računalniških programov. Različni proizvajalci programske opreme so v ta namen razvili visoko dovršene module in jih vključili v njihove jeklene konstrukcije programske opreme.

8.2 Razvoj proizvodne tehnologije

Drugi pomembni dejavnik pri nastajanju satastih nosilcev je razvoj proizvodne tehnologije. Prvotno so na valjanemu prerezu s plamenskimi rezom izrezali linijo s pomočjo preprostih šablon, kmalu po drugi svetovni vojni je to postalo predrago, zato so avtomatski izrez začeli delati v 50-ih. Hubert Litzka je razvil prvo popolnoma avtomatsko proizvodno linijo za sataste nosilce. Ta se je izkazala za tako uspešno, da so postali satasti nosilci znani tudi pod imenom "Litzka Träger". Litzka Stahlbau Deutschland je razvila način izdelave, s katerim so satasti nosilci postali bolj ekonomični in posledično bolj uporabljani. Boyer (1964) je natančno pregledal proces Litzka, izbral več delov procesa in jih primerjal s toplo valjanimi profili in ugotovil, da so ekonomski prihranki od 11 do 22 %. Toprac, Altfillisch in Cooke (1957) so ugotovili, da s povečanim modelom valjanega prereza nosilec nosi 10% do 35% več momenta. Druga možnost za standardiziran satasti nosilec je izrez s šablono iz hladno valjanih profilov preko težkih stiskalnic. Ta metoda je bila v glavnem uporabljena v Ameriki. V poznih 70-ih so bili predstavljeni popolnoma avtomatski plamenski rezalniki. Strojem za izrez, ki so bili že uvedeni, so sledili stroji na optično branje. Prednost je bila, da so lahko delali neposredno z risbo in so bolj prilagodljivi. Z uvedbo miniračunalnikov in kasneje

osebnih računalnikov, je bila operacija izreza še dodatno optimizirana. Satasti nosilci zahtevajo zaporedje kratkih zvarov. Varjenje tudi danes poteka še vedno večinoma ročno. Avtomatsko varjenje uporabljajo le v tovarnah, ki proizvajajo velike količine standardiziranih satastih nosilcev.

8.3 Prednosti satastih nosilcev

Satasti nosilci imajo številne posebne lastnosti in prednosti. So lahki, močni in poceni. Lahko se jih montira na gradbišču. Odprtine v stojini poenostavijo delo instalaterjev in električarjev, saj potek vodov preko odprtine nosilca ne predstavlja težav. Glavna prednost satastih nosilcev v jeklenih konstrukcijah je tehnična in ekonomska upravičenost uporabe v večetažnih zgradbah. V primerjavi s polnostenskimi nosilci satasti nosilci premoščajo večje razpone in prenesejo večje obremenitve kot navadni polnostenski nosilci, kar pa je odvisno od velikosti odprtin in razmaka med njimi. Odprtine omogočajo nemoten prehod instalacij, s čimer se ne povečuje višina nadstropja.

8.4 Slabosti satastih nosilcev

Prisotnost odprtin v stojini ima za posledico, da se strukturno obnašanje satastega nosilca razlikuje od navadnih nosilcev. Zaradi različnih možnih načinov porušitve je metoda računa komplicirana. Strižna nosilnost satastih nosilcev je omejujoč dejavnik, kar pa vodi do tega, da niso primerni za močno obremenjene daljše razpone. Strižne deformacije v, nad in pod odprtinami so pomembne, zato postane analiza strižnih deformacij bolj zapletena kot v polnostenskih nosilcih. V vogalih pri odprtinah se pojavljajo koncentracije napetosti in omejujejo uporabnost satastih nosilcev v primerih dinamične obtežbe. Na mestih vnosa koncentrirane sile se morajo odprtine ojačati. Vključitev montaže in varjenja v ojačitev v obliki polne pločvine na mestih, kjer je koncentrirana obremenitev, je razmeroma draga. Najboljša tehnična rešitev v takih primerih je, da so odprtine ojačane z obroči, ki se jih vari okoli odprtin, kar pa je tudi najdražja rešitev. Satasti nosilci imajo v primerjavi s polnostenskimi nosilci slabšo požarno odpornost. V primerih zelo visokih zahtev za požarno odpornost, satasti nosilci postanejo manj privlačni, saj je odpornost zaščite proti ognju za

približno 20% debelejša kot pri polnostenskih nosilcih s tem, da bi se dobilo enako požarno odpornost.

8.5 Uporaba satastih nosilcev

Renovacije

Za prikaz arhitekturne dediščine se rabi lahka in fleksibilna konstrukcija, Slika 18.2.



Slika 18.2: Uporaba satastih nosilcev za moderniziranje starih zgradb
(ACB Cellular Beams)

Garažne hiše

(Cellular Beam Design Guide, 2008)

Za garažne hiše se uporabljajo razponi dolžine 16m kot sekundarni nosilci. Satasti nosilci zagotavljajo naslednje pomembne prednosti pri gradnji garažnih hiš:

- Višina nosilca

Dovoljeno višino določita arhitekt in inženir v skladu z dogovorom, nato pa se satasti nosilec dimenzionira na natančno višino.

- Ukrivljeni nosilci

Satasti nosilec je mogoče ukriviti brez dodatnih stroškov med proizvodnjo, o čemer je več zapisano v poglavju 8.14.1. Daljši ukrivljeni nosilci omogočajo naravno odvajanje površinskih voda in odpravljajo potrebo po dodatnih estrihih.

- Videz in osebna varnost

Odprtine v nosilcu zagotavljajo veliko svetlobe in zračnejšo notranjost ter izboljšujejo osebno varnost.

- Daljši razponi

Večina parkirišč v Veliki Britaniji uporablja razpone nosilcev 16m. Kljub temu so satasti nosilci uporabni tudi za večje razpone (Slika 18.3). V ZDA so razponi 28 m nekaj običajnega.

- Naravna frekvenca

Naravna frekvenca za sataste nosilce v garažnih hišah se lahko reducira na 3Hz za posamezne nosilce. Raziskave so pokazale, da daljši razponi satastih nosilcev boljše prenašajo vibracije kot kratki razponi.



Slika 18.3: Uporaba satastih nosilcev v Capitol Car Park, Douglas, Isle of Man
(Cellular Beam Design Guide, 2008)

- Odvod dima

Odprtine v nosilcu povzročajo širjenje dima v primerjavi z navadnimi polnostenskimi nosilci. Z njimi bi se lahko izognilo potrebi po uporabi sistema za prisilno prezračevanje.

- Ekonomičnost

Jeklene garažne hiše so v veliki večini zastopane pri gradnji garažnih hiš, čedalje bolj pa se uporabljajo SN z okroglimi odprtinami v garažnih hišah v ZDA in Veliki Britaniji.

- Višina nosilcev pri garažnih hišah

Standardne višine satastih nosilcev ni. V Preglednici A.2 so napisane vrednosti višin v rangi, ki jih je uporabil proizvajalec Westok.

Preglednica A.2: Razpon višin nosilcev v garažnih hišah proizvajalca Westok
(Cellular Beam Design Guide, 2008)

Satasti nosilci z okroglimi odprtinami	Končna višina [mm]	Satasti nosilci z okroglimi odprtinami	Končna višina [mm]
Oliver Road, Thurrock	474	Crystal Peaks, Sheffield	650
Cambridge	475	Sunderland Sunnyside	650
Scotland Street, Sheffield	500	Newcastle 1&2	691
Douglas, Isle of Man	525	Fairhill, Ballymena	693
Crowne Plaza, Dublin	525	Telford College, Edinburgh	699
Sunwin House, Bradford	536	Buttercrane, Newry	700
Sansburys, Clapham	580	King Street, Belfast	700
Amersham	600	Prospect, Sunderland	700
Ulster Hospital, Belfast	620	Waitrose HO, Barking	700
Buxton Pavilion	650	Ikea, Leeds	775

Satasti nosilci za mednadstropne konstrukcije

Današnji razponi, ki se delajo danes dosegajo velikosti od 12m do 20m in se delajo v isti višini in stroških kot v 80-ih z razponi od 6m do 10m. Njihova najbolj običajna raba je za mednadstropne konstrukcije. Celotna višina mednadstropne konstrukcije je za 25cm do 40cm manjša kot primerljive rešitve s polnostenskimi nosilci. Za stavbe z zahtevanim številom nadstropij (od dva do šest nadstropij) se prihrani pri končni višini stavbe in ekonomiji. S SN pri večetažnih gradnjah se lahko prihrani na teži. Optimalna postavitev satastih nosilcev je, da

se uporabijo kot sekundarni nosilci. Primarni nosilec je lahko satasti ali navaden nosilec, odvisno od tega ali so vodi potrebni v obeh smereh, kot je prikazano na Sliki 3 in Sliki 4 in narejena primerjava v Preglednici A.3. V Preglednici A.4 so podane zahteve za optimalno uporabo satastih nosilcev, glede na razpone in zahteve instalacij.

Preglednica A.3: Primerjava satastih nosilcev z nosilci s posameznimi odprtini
 (Cellular Beam Design Guide, 2008)

Konstrukcijske zahteve	Dolg ali kratek razpon
Višina	Pri SN je višina podobna ali manjša kot pri krajših razponih.
Hitrost gradnje	S SN se prihrani na številu stebrov in gradnja z njimi je hitrejša.
Stroški	Podobni.
Fleksibilnost	Pri SN je fleksibilnost večja kot pri krajših razponih.
Ustreznost	Zgradbe z daljšimi razponi bodo boljše uporabljene spremembe najemnika ali uporabe, izogibanju virov za porabo za rušitev in obnovo.

Preglednica A.4: Zahteve za optimalno gradnjo s satastimi nosilci
 (Cellular Beam Design Guide, 2008)

Zahteve inštalacij	Dovoljen razpon		
	<9 m	<12 m	>12 m
Brez inštalacij	/	✓	✓✓
Posamezne inštalacije	✓	✓✓	✓✓✓
Normalne / težke inštalacije	✓✓	✓✓✓	✓✓✓

Bolnišnice

(Cellular Beam Design Guide, 2008)

Satasti nosilci se zelo pogosto uporabljajo v bolnišnicah, posebej pri gradnji operacijskih dvoran, kot je to prikazano na Sliki 18.4. Nosilci zagotavljajo večje razpone in veliko fleksibilnost za inštalacije v vsakem nadstropju.



Slika 18.4: Bishop Auckland Hospital (Cellular Beam Design Guide, 2008)

Ravne strehe

Satasti nosilci so znani po svoji ekonomičnosti. Pri uporabi strešnih satastih nosilcev je bistveno, da imajo manjšo težo kot primerljivi polnostenski nosilci. Običajni razponi so od 15 do 50m, če so prostoležeče podprti; pri razponih, večjih od 35m, so SN togo vpeti. Običajno so ti nosilci prostoležeči ali kontinuirano podprti. Pri uporabi satastih nosilcev z okroglimi odprtinami lahko premer odprtine doseže 80 % celotne višine, kar je ugodno za zmanjševanje teže strešne konstrukcije..



Slika 18.5: Ravna streha Audi Newport (Cellular Beam Design Guide, 2008)

Športni objekti in stadioni

(Cellular Beam Design Guide, 2008)

Učinkovitost in gospodarnost satastih strešnih nosilcev pri daljših razponih je uporabna v športnih objektih. Satasti nosilci so lažji od navadnih polnostenski nosilcev in veliko cenejši kot paličje. Satasti nosilci z okroglimi odprtinami so bili uporabljeni na večjih stadionih v več kot polovici igrišč v Združenem kraljestvu od zgodnjih 1990, eno od teh je prikazano na Sliki 18.6.



Slika 18.6: Kingston Park Newcastle (Cellular Beam Design Guide, 2008)

Satasti mostovi

(Cellular Beam Design Guide, 2008)

Vse več se satasti nosilci uporabljajo v industriji, namenjeni čistilni dejavnosti, Slika 18.7. Veliki razponi oziroma gradnja mostov preko 15 m je v primerjavi z uporabo drugih metod finančno mnogo ugodnejša. Satasti nosilci imajo pri gradnji satastih mostov imajo večje vrednosti deformacij proti lastni teži, in so estetsko bolj prijetni, kot navadni nosilci. Imajo pa omejeno področje glede veterne obremenitve.



Slika 18.7: Ivinghoe Scraper Bridge (Cellular Beam Design Guide, 2008)

Satasti stebri in fasadni elementi

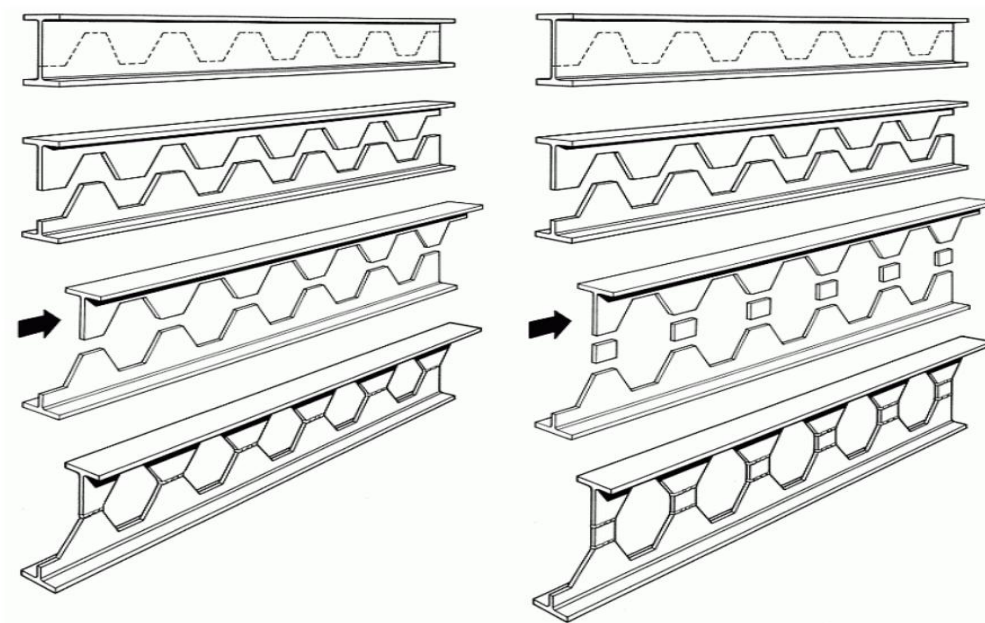
Sataste stebre uporabljamo v primerih, ko je potreben povečan vztajnostni moment nosilca in je dovoljen velik povos. Uporabljajo se pri majhni osni obremenitvi in pri majhni obtežbi vetra (v primeru uporabe v portalnih stebrih, kot to prikazuje Slika 18.8). V primerih, ko je prevladujoča obtežba vetra, se uporabi asimetrični steber s širšo pasnico na neoviranem delu. Začetni razlog za uporabo katerihkoli oblik satastega stebra s spremenljivim prerezom je verjetno estetski.



Slika 18.8: Churchill Court, Trafford Park (Cellular Beam Design Guide, 2008)

8.6 Satasti nosilci s heksagonalnimi in povišanimi oktagonalnimi odprtinami

Satasti nosilci so izdelani iz standardnih vroče valjanih IPE, HEA, HEB, HEM in U profilov ali varjenih I profilov, ko je prikazano na Sliki 19. Stojina profila se razdvoji s plamenskim rezom na dva dela v smeri dolžine profila v obliki oblikovanega vzorca. Tako dobljene polovice se zamaknejo v relaciji druga do druge in potem varijo skupaj na vrhovih stojin. Rezultat je profil z vrsto pravilnih šesterokotnih odprtin v stojini. Ta profil je veliko višji od prvotnega profila iz katerega je narejen, medtem ko ostane teža skoraj enaka. Prav tako je mogoče variti kvadratne ali pravokotne pločevine med izrezanimi deli profila, ki pa dajo nosilce z osmerokotnimi odprtinami in seveda še večjo višino profila. Profil je potrebno na koncih odrezati, kar pomeni izgubo manjše količine materiala in s tem povezane stroške izreza. V primerjavi z izvornimi polnostenskimi nosilci iz katerih so satasti nosilci, prenašajo manjše obremenitve, kar je odvisno od dolžine ter oblike nosilca, velikosti in razporeda odprtin. Odprtine v stojini omogočajo nemoten prehod instalacij znotraj višine nosilca, s čimer se dodatno ne povečuje višina nosilca, zaradi svoje povečane višine pa imajo satasti nosilci večje vztrajnostne momente I_y . Iz tega razloga so ti nosilci primerni za daljše razpone z manjšimi obremenitvami.

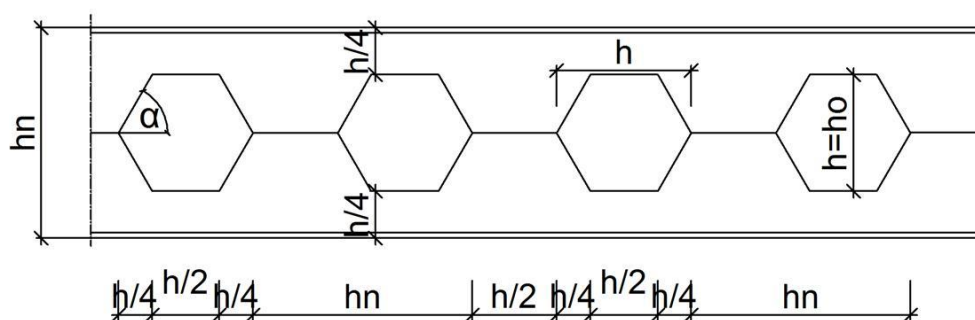


Slika 19: Satasti nosilec s heksagonalnimi in oktagonalnimi odprtinami

8.6.1 Kot izreza pri satastih nosilcih s heksagonalnimi odprtinami

Kot izreza α se giblje od 45° do 70° . Kot 60° je postal standard za izrez pod kotom v industriji. Pri izvedbi satastih nosilcev so bile narejene različne možnosti kota izreza. V Evropi so tradicionalno imenovani Peiner-Schnittführung in se izdelujejo s cik-cak izrezom. Ta vzorec izreza je znan tudi kot Litzka-Schnittführung (Slika 20), zanj pa so značilne naslednje tri predpostavke:

- Razmerje višin $h_n/h = 1,5$.
- Višina je enaka višini h_n satastega nosilca.
- Kot α je določen na 63.5° ($\tan \alpha = 2$).



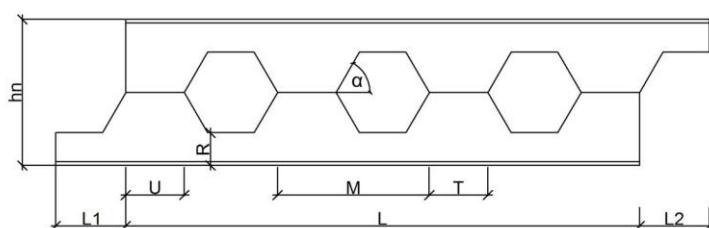
Slika 20: Izrez satastega nosilca z tradicionalnimi dimenzijami

V Angliji, Ameriki in Kanadi je tradicionalna oblika odprtin drugačna. Tam je kot izreza tradicionalno določen na 60° . Višina h_n je določena na 1,08-kratnik višine odprtine. Višina odprtin v stojini je izbrana v Peiner-Schnittführung in sicer je enaka nominalni h višini profila pred rezanjem. Te predpostavke imajo za posledico krajše varilne dolžine. V Peiner-Schnittführung je varilna dolžina enaka $1/3$ višine h_n satastega nosilca, medtem ko je po anglosaški tradiciji varilna dolžina enaka $1/4$ višine h_n . Zavedati se je treba, da je od varilne dolžine odvisna porazdelitev napetosti po nosilcu. Oba vzorca z omejitvami sta za današnje razmere primera zastarelih proizvodnih metod. Z današnjo računalniško tehnologijo ni nobenega razloga za uporabo teh staromodnih rezanj vzorcev in modelov. Danes je mogoče izbrati poljuben vzorec za rezanje in razmerje h_n/h .

8.6.2 Različni zaključki satastih nosilcev s heksagonalnimi odprtinami

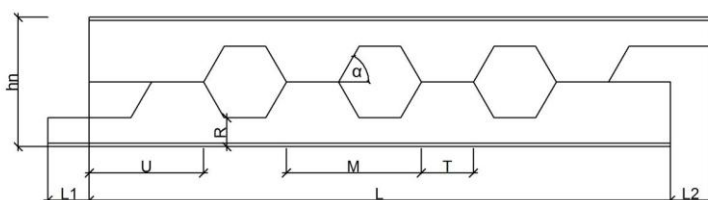
Razmerje dimenzij U (razdalja med koncem profila in začetkom odprtine) in T (razdalja med sosednjima odprtinama) je odločilno, ker vse ostale dimenzije za podan profil izhajajo iz tega. Na Sliki 21, Sliki 22, Sliki 23 in Sliki 24 so še dodatne oznake, ki pomenijo R (višina med vrhom odprtine in pasnice), M (največja širina odprtine s širino polne stojine), $L1$ in $L2$ (širina profila, ki ga je potrebno odrezati).

- Profil, ki se konča z $U = T$ (Slika 21):



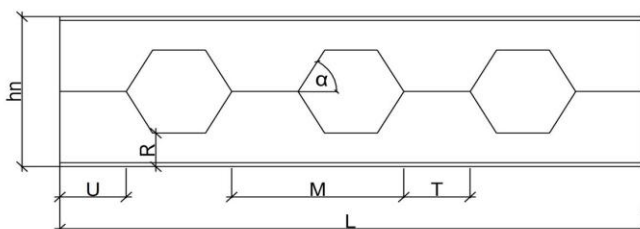
Slika 21: Enostaven in poceni zaključek, vendar ni primeren za uporabo

- Profil, ki se konča z $U > T$ (Slika 22):



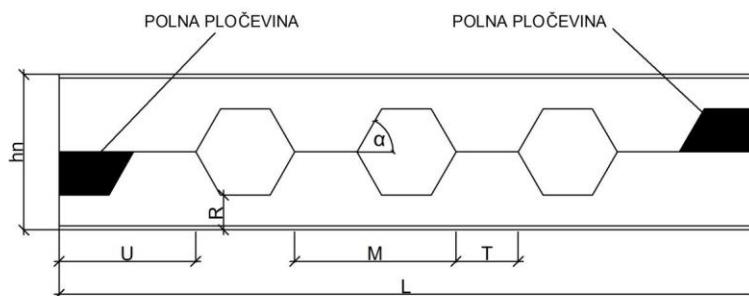
Slika 22: Daljši zaključek, vendar ni zelo učinkovit

- Profil se konča z $U = T$ (Slika 23):



Slika 23: Dober zaključek, brez dodatnega rezanja in odpadnega materiala

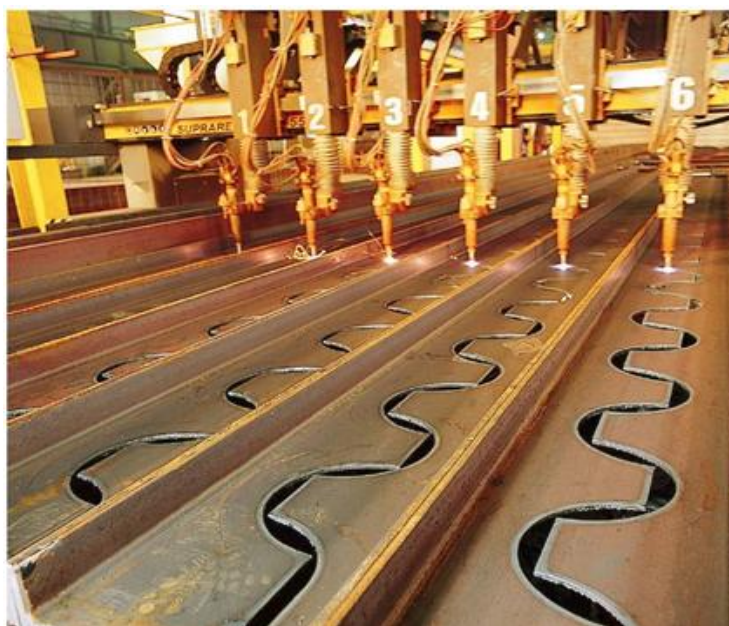
- Profil se konča z polno pločevino z $U > T$ (Slika 24):



Slika 24: Zaključek je tog in drag

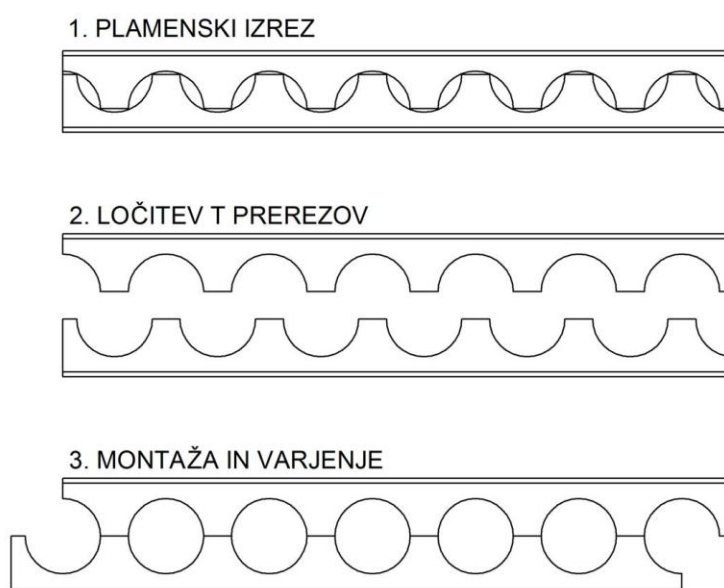
8.7 Satasti nosilci z okroglimi odprtinami in povišanimi okroglimi odprtinami

Satasti nosilci z okroglimi odprtinami so modernejša izvedba satastih nosilcev s šesterokotnimi odprtinami, predstavljeni so bili leta 1987. Poleg tega so satasti nosilci z okroglimi odprtinami privlačnejši, ker imajo obliko vodov, ki potekajo skozi njih. Patentirana metoda za izdelavo ACB satastih nosilcev z odprtinami temelji na vroče valjanih profilih. Dvojini izrez je narejen po stojini profila s plinskim izrezom s kisikom, kar se vidi na Sliki 24.1.



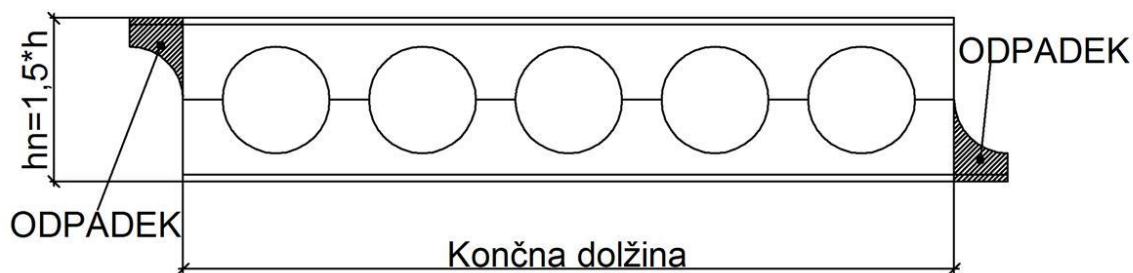
Slika 24.1: Plamenski izrez s kisikom z vzporednim izrezom večih vročevaljanih prezezi (ACB Cellular Beams)

Po izrezu se oba T prereza profila zamakneta in varita po stojini. S tem se dobi povečano višino, kot je to prikazano na Sliki 25. Proces izreza je digitalno kontroliran in z vzporedno izdelavo profilov z odprtinami omogoča manjše stroške produkcije. Med dele stojin med odprtinami se lahko privari pravokotne ali kvadratne jeklene pločevine in s tem se še lahko poveča višina profila. Pri SN z okroglimi odprtinami se pogosto vključijo podolgovate odprtine med okrogle odprtine, o čemer je več povedano v poglavju 8.14.3.



Slika 25: Prikaz izdelave satastega nosilca z okroglimi odprtinami

Višina satastih nosilcev z okroglimi odprtinami je večja od 40 do 60% v primerjavi z izvornimi polnostenski nosilci, kar je prikazano na Sliki 26. Premeri odprtin in razmak med odprtinami je spremenljiv, kar je predstavlja prednost v primerjavi s satastimi nosilci s heksagonalnimi odprtinami.



Slika 26: Končna geometrija satastega nosilca z okroglimi odprtinami

8.7.1 Izbira premera in razmaka med okroglimi odprtinami

Za jeklene nosilce z okroglimi odprtinami je zahtevan dvojni simetrični prerez in s tem isti zgornji in spodnji T prerez z isto kvaliteto jekla. Obstajajo mnoge kombinacije odprtin in razmakov med odprtinami. Končna odločitev ACB profilov je podana v Preglednici A.5:

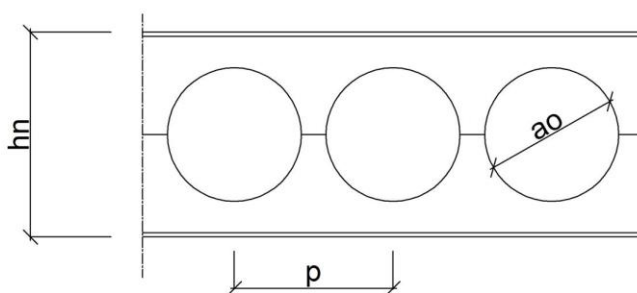
Preglednica A.5: Izbira satastih okroglih profilov(ACB Cellular Beams)

Optimizacija glede na odnos višine in teže. $a_o = 1,0 \text{ do } 1,3 \cdot h$ $p = 1,1 \text{ do } 1,3 \cdot d_o$ $h_n = 1,4 \text{ do } 1,6 \cdot h$	Optimizacija glede na odnos obtežbe in teže. $a_o = 0,8 \text{ do } 1,1 \cdot h$ $p = 1,3 \text{ do } 1,7 \cdot d_o$ $h_n = 1,3 \text{ do } 1,4 \cdot h$
Uporaba za: strešne konstrukcije, prehodi, brvi za pešce, daljši razponi	Uporaba za: medetažne konstrukcije, garažne hiše, naftne ploščadi, stebri
Kvaliteta jekla: S235, S355	Kvaliteta jekla: S355, S460

8.7.2 Primerjava satastih nosilcev z okroglimi in heksagonalnimi odprtinami

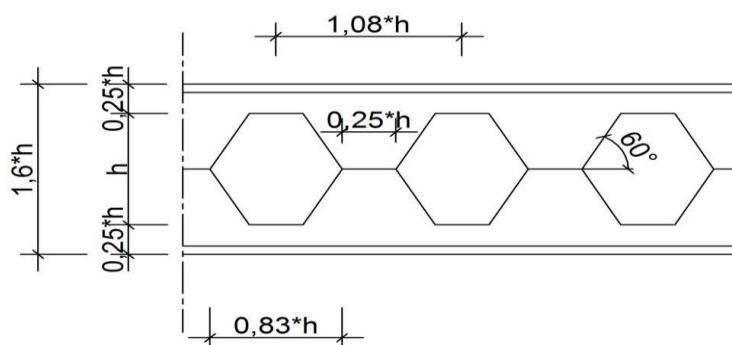
Satasti nosilci z okroglimi odprtinami so bolj ekonomična rešitev kot satasti nosilci s heksagonalnimi odprtinami. Pri izrezu SN z okroglimi odprtinami nastane odpadni material, medtem ko pri SN s heksagonalnimi odprtinami odpadnega materiala med postopkom izreza ni. Pri satastemu nosilcu z okroglimi odprtinami (Slika 27) so prilagodljive vse tri dimenzije:

- Višina satastega nosilca h_n .
- Višina odprtine a_o .
- Osni razmak med odprtinami p .



Slika 27: Satasti nosilec s spremenljivimi dimenzijami odprtin

SN se optimizira glede na zahteve projekta, estetske zahteve, velikosti odprtin in poteka vodov. Ti lahko potekajo skozi heksagonalne ali okrogle odprtine, vendar je pri okroglih odprtinah za 30% več uporabnega prostora kot pri heksagonalnih. Oblika odprtin satastega nosilca s heksagonalnimi odprtinami je standardizirana (Slika 28).

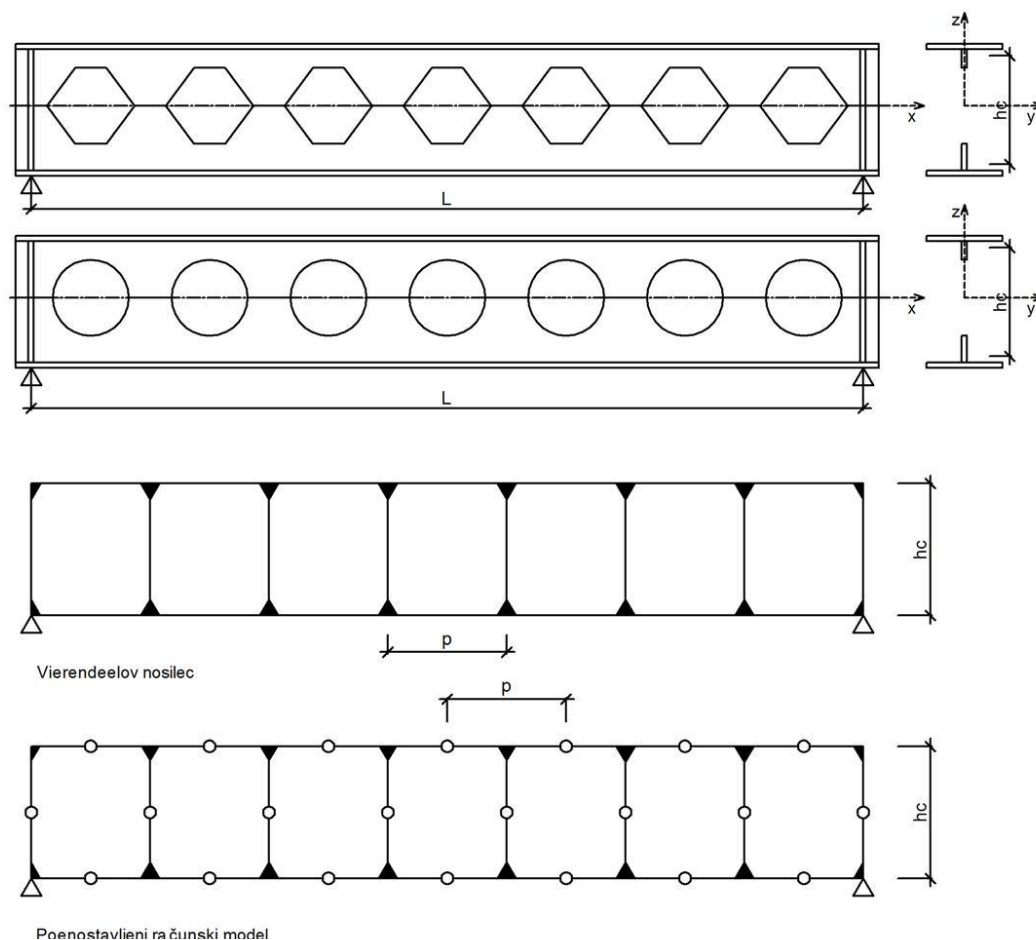


Slika 28: Standardni satasti nosilec s heksagonalnimi odprtinami

8.8 Statična presoja satastega nosilca

8.8.1 Splošno o statični analizi satastega nosilca

Zaradi odprtin v stojini je mehanizem porušitve drugačen kot v običajnih polnostenskih I nosilcih. Tudi odpornost satastih nosilcev proti bočni zvrnitvi se dokazuje drugače kot pri polnostenskih nosilcih. Pogosta napaka je, da se upogibno in strižno nosilnost računa tako, da se dva T prereza gleda kot eden edinstveni prerez, saj to daje napačne rezultate. Najboljša rešitev za račun momentov in notranjih sil je izbira Virendeelovega nosilca (Slika 28.1).



Slika 28.1: Model za analizo Vierendeelovega nosilca
(ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

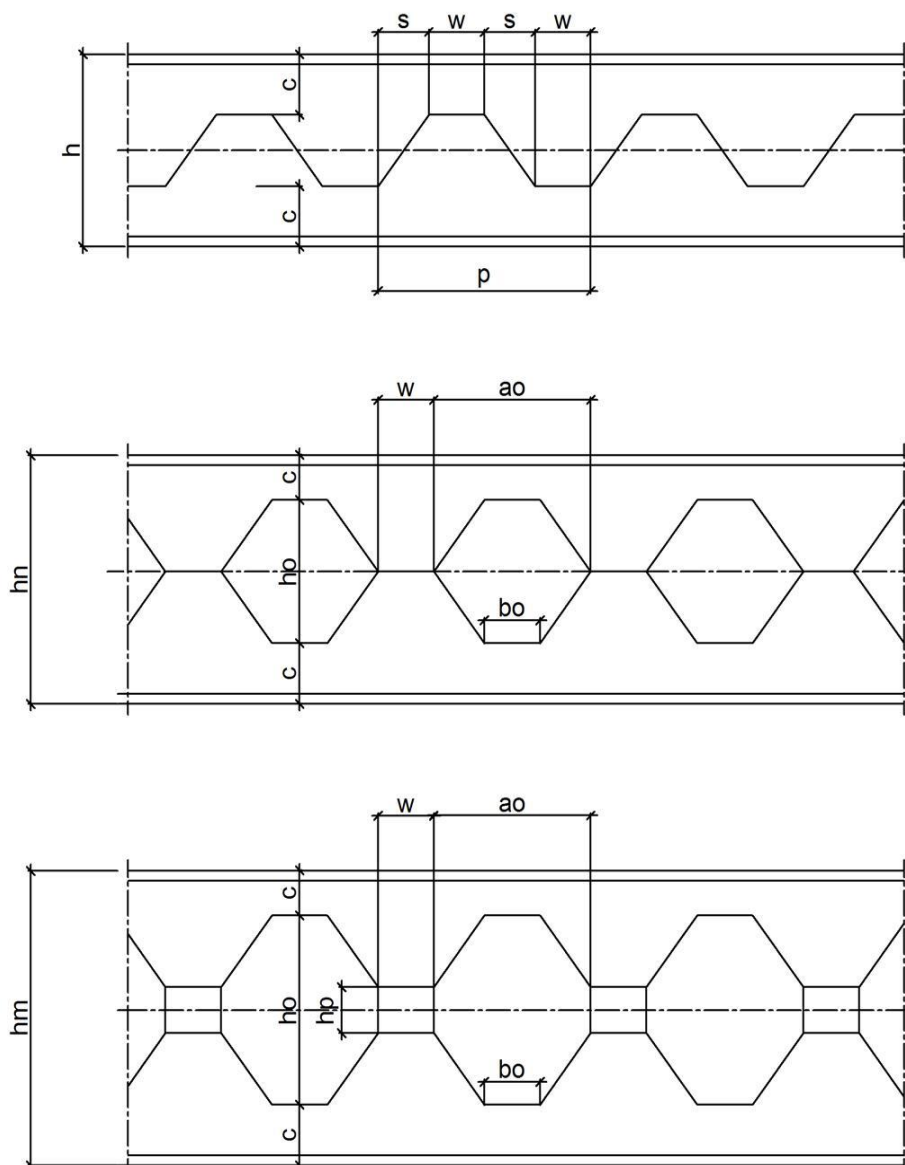
Razporeditev notranjih sil in momentov je taka, da so momenti v sredini vertikal in horizontal približno enaki nič, s tem, da se na teh mestih dajo členki in se na ta način eliminira notranjo statično nedoločenoost Vierendeelovega nosilca. Na ta način se računa vzdolžne sile nad in pod odprtino, kot posledica delovanja upogibnega momenta v nosilcu in momente v T prerezih, ki nastanejo zaradi delovanja prečne sile v T prerezu nad in pod odprtino.

8.8.2 Analiza in načrtovanje satastih nosilcev

(ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

8.8.2.1 Geometrijski pogoji za sataste nosilce

Odprtine SN morajo ustrezati geometriji na Sliki 28.2 in Sliki 28.3, ne glede nato ali so okrogle ali so poligonalne, pravilne ali nepravilne oblike.



Slika 28.2: Geometrija satastih nosilcev s poligonalnimi odprtini
 (ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

Geometrijski karakteristike, ki so pokazane na Sliki 28.2 za poligonalne odprtine se določa z naslednjimi izrazi:

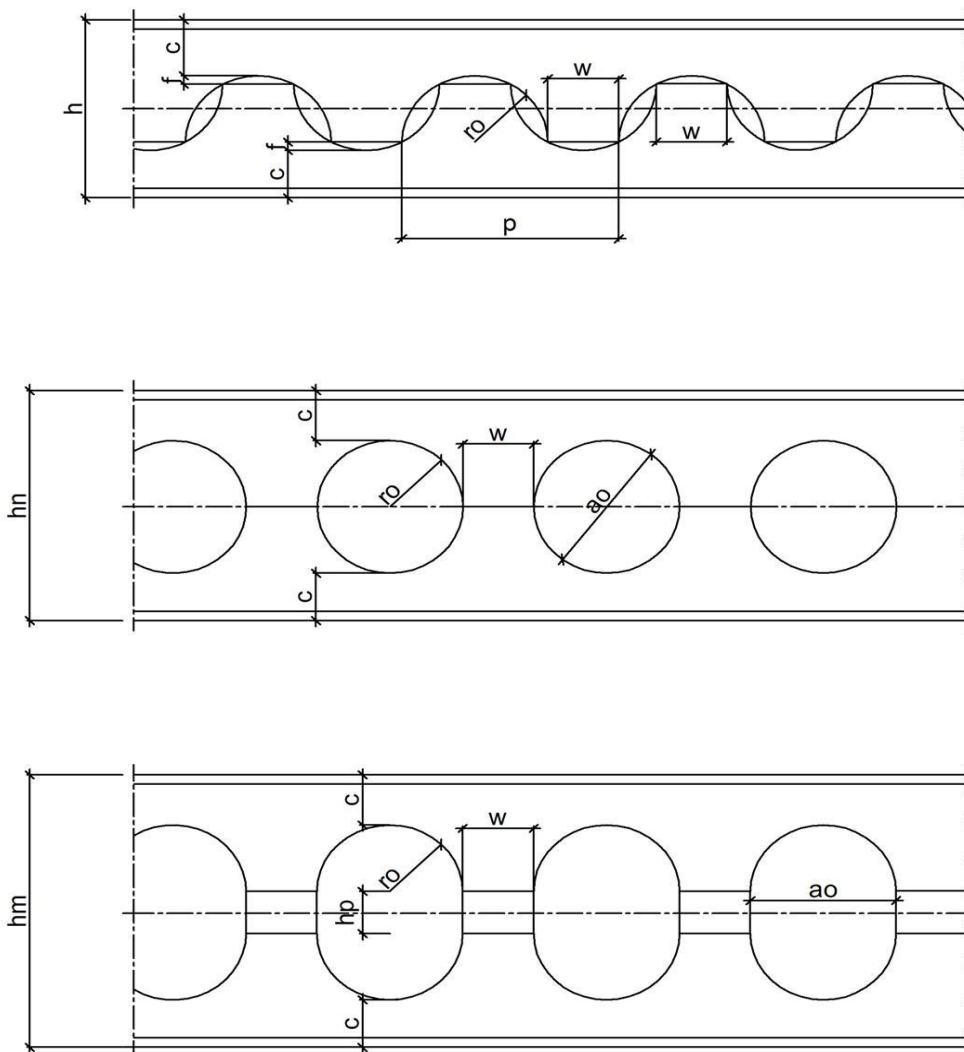
$$p = 2 \cdot (w + s) \quad (8.0)$$

$$a_o = w + 2 \cdot s \quad (8.1)$$

$$b_o = w \quad (8.2)$$

$$h_n = 2 \cdot (h - c) \quad (8.3)$$

$$h_m = 2 \cdot (h - c) + h_p \quad (8.4)$$



Slika 28.3: Geometrija satastih nosilcev z okroglimi odprtinami
 (ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

Geometrijske karakteristike, ki so pokazane na Sliki 28.3 za okrogle odprtine se določa z naslednjimi izrazi:

$$p = w + 2 \cdot r_o \quad (8.5)$$

$$f = r_o - \sqrt{r_o^2 - \left(\frac{w}{2}\right)^2} \quad (8.6)$$

$$c = \frac{h - r_o - f}{2} \quad (8.7)$$

$$a_o = 2 \cdot r_o \quad (8.8)$$

$$h_n = 2 \cdot (r_o + c) \quad (8.9)$$

$$h_m = 2 \cdot (r_o + c) + h_p \quad (8.10)$$

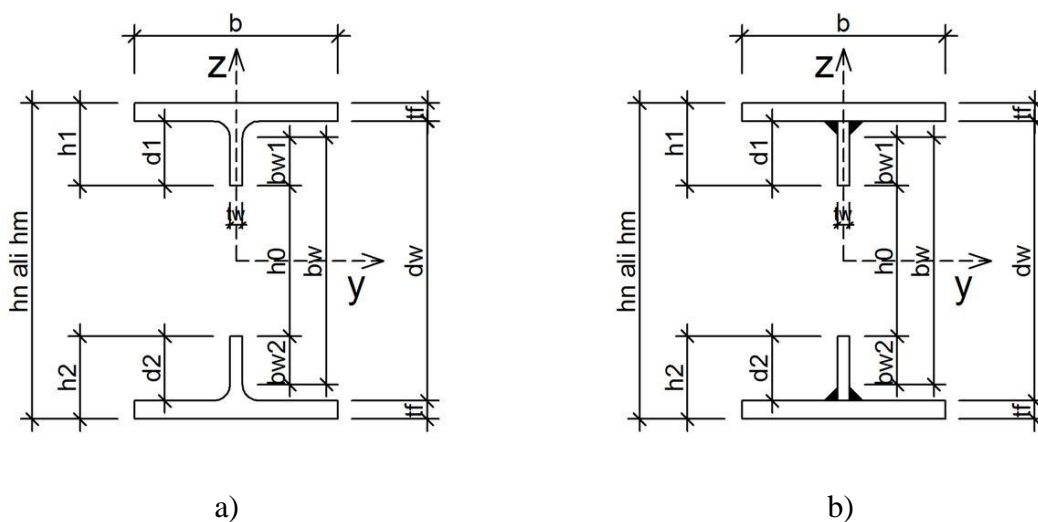
kjer je:

- h izvorna višina profila;
- p osni razmik med odprtinami;
- c višina med vrhom odprtine in pasnice;
- h_n višina prereza satastega nosilca;
- h_m višina povišanega prereza satastega nosilca.

8.8.2.2 Dimenzije in razpored odprtin pri satastih nosilcih

Geometrija prečnega prereza satastega nosilca velja za:

- Vroče valjane prereze, Slika 29 a).
- Varjene prereze, Slika 29 b).



Slika 29: Prečni prerez satastih nosilcev

Mere odprtin v satastih nosilcih so podane na Sliki 30 v skladu z omejitvami:

$$h_o \leq 0,75 \cdot d_w \quad - \text{ za poligonarne odprtine} \quad (8.11)$$

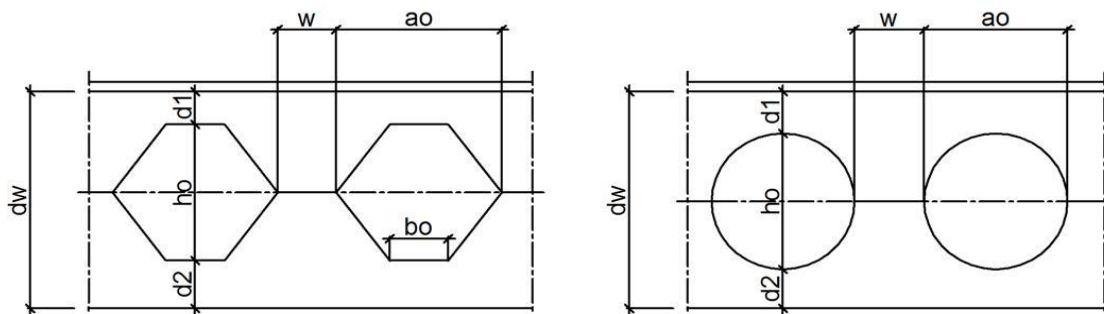
$$h_o \leq 0,80 \cdot d_w \quad - \text{ za okrogle odprtine} \quad (8.12)$$

$$d_1 = d_2 \geq 0,10 \cdot d_w \quad (8.13)$$

$$a_o \leq h_o \quad (8.14)$$

$$b_o = w \quad (8.15)$$

$$0,25 \cdot a_o \leq w \leq 0,50 \cdot a_o \quad (8.16)$$



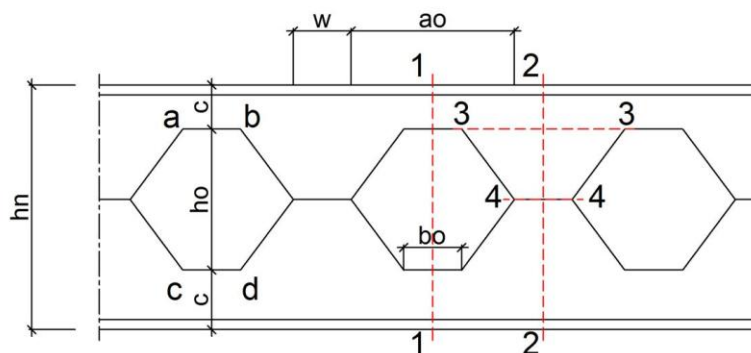
Slika 30: Dimenzije in geometrija odprtin satastih nosilcev

8.8.3 Kontrole nosilnosti za MSN

(Tkačević in sod., 2006a)

Za sataste nosilce je potrebno preveriti naslednje načine porušitve:

- a) Kontrola nosilnosti spodnjega in zgornjega T preseza na mestu odprtine, glej prerez 1-1, Slika 31, zaradi:
 - Projektne prečne sile V_{Ed} na satastemu nosilcu.
 - Projektne osne sile T preseza $N_{T,Ed}$ zaradi delovanja projektne vrednosti upogibnega momenta M_{Ed} .
 - Projektne vrednosti upogibnega momenta na Vierendeelovemu nosilcu $M_{V,Ed}$ zaradi delovanja V_{Ed} .
- b) Kontrola nosilnosti polnega dela stojine zaradi kombinacije delovanja, glej prerez 2-2, Slika 31, zaradi:
 - Projektne prečne sile na Vierendeelovem nosilcu $V_{V,Ed}$ zaradi delovanja projektne prečne sile na nosilcu V_{Ed} .
 - Projektne vrednosti upogibnega momenta na Vierendeelovemu nosilcu $M_{V,Ed}$ zaradi delovanja V_{Ed} .
 - Projektne vzdolžne sile $N_{F,Ed}$ zaradi delovanja zunanje projektne prečne sile F_{Ed} .
- c) Kontrola nosilnosti satastega nosilca zaradi bočne zvrnitve.
- d) Lokalna porušitev zaradi vnosa koncentrirane sile.



Slika 31: Model za analizo satastega nosilca

8.9 Kontrola nosilnosti prečnega prereza na mestu odprtine

8.9.1 Poligonalne odprtine

(Tkačević in sod., 2006a)

Za prereze na mestu odprtine v stojini v prerezu 1-1 na Sliki 31 se delajo kontrole zaradi delovanja M_{Ed} in V_{Ed} .

8.9.1.1 Kontrola osne nosilnosti T prereza

M_{Ed} se razstavi na dvojico sil $N_{T,Ed}$, ki delujeta v težišču zgornjega in spodnjega T prereza (Slika 13) tako, da je:

$$N_{T,Ed} = \frac{M_{Ed}}{h_c} \quad (8.17)$$

Projektna osna nosilnost delov prečnega T prereza na tlačno in odnosno na natezno silo $N_{T,Rd}$ mora biti večja od projektne osne sile $N_{T,Ed}$ zaradi vpliva M_{Ed} :

$$N_{T,Ed} \leq N_{T,Rd} \quad (8.18)$$

kjer je:

- h_c dolžina med težiščema zgornjega in spodnjega T prereza;
- $N_{T,Ed}$ projektna vrednost osne sile na T prerezu;
- $N_{T,Rd}$ projektna osna nosilnost T prereza.

8.9.1.2 Kontrola strižne nosilnosti T prereza

Preverja se pas T prereza, ki prevzame polovico projektne prečne sile V_{Ed} (Slika 12), da bo zadovoljeno izrazoma:

$$V_{T,Ed} \leq V_{T,Rd} \quad (8.19)$$

$$V_{T,Ed} = 0,5 \cdot V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{T,Rd} \quad (8.20)$$

kjer je:

$V_{T,Ed}$ projektna vrednost prečne sile v T prerezu;

$V_{T,Rd}$ projektna strižna nosilnost v T prerezu.

Projektna strižna nosilnost v T prerezu $V_{T,Rd}$ se preveri po SIST EN 1993-1-1:2005, točka 6.2.6. vzdolžne ojačitve se lahko vključijo v prečne prereze zgornjega in spodnjega T prereza vendar pod pogojem, da so v celoti sidrane.

8.9.1.3 Kontrola nosilnosti T prereza zaradi interakcije delovanja M-V-N

Če je projektna vrednost prečne sile $V_{T,Ed}$, ki pada enemu T prerezu manjša ali enaka od polovice projektne nosilnosti prečnega prereza na strižno silo $V_{T,Rd}$ oziroma po enačbi (8.20) se projektna upogibna nosilnost T prereza $M_{T,NV,Rd}$ dokazuje po naslednjem postopku.

Za T prerez brez ojačitev velja:

$$M_{T,NV,Rd} = M_{T,V,Rd} \cdot \left(1 - \left(\frac{N_{T,Ed}}{N_{T,Rd}} \right)^2 \right) \quad (8.21)$$

Za T prerez z ojačitvami velja:

$$M_{T,NV,Rd} = M_{T,V,Rd} \cdot \left(1 - \left(\frac{N_{T,Ed}}{N_{T,Rd}} \right) \right) \quad (8.22)$$

$$M_{T,V,Ed} \leq M_{T,NV,Rd} \quad (8.23)$$

Če je projektna prečna sila $V_{T,Ed}$ večja od polovice projektne nosilnosti prečnega T prereza $V_{T,Rd}$, je potem $V_{T,Ed} > 0,5 \cdot V_{T,Rd}$ (8.24) se $M_{T,NV,Rd}$ dokazuje z uporabo manjše vrednosti meje plastičnosti $f_{y,V}$ na stojini T prereza z izrazom (8.25).

$$f_{y,V} = [1 - \rho] \cdot f_y \quad (8.25)$$

Mora se upoštevati redukcija upogibne nosilnosti v izrazih (8.21) in (8.22). Redukcija upogibne nosilnosti je podana v izrazoma:

$$\rho = \left(\frac{2 \cdot V_{T,Ed}}{V_{T,Rd}} - 1 \right)^2 \quad (8.26)$$

$$M_{T,V,Rd} = M_{T,f,Rd} + (M_{T,V,pl,Rd} - M_{T,f,Rd}) \cdot (1 - \rho) \quad (8.27)$$

kjer je:

$f_{y,V}$ zmanjšana meja plastičnosti jekla;

ρ redukcijski faktor za določanje projektne upogibne nosilnosti, zmanjšane zaradi vpliva prečnih sil;

$M_{T,V,Rd}$ reducirana upogibna nosilnost T prereza zaradi interakcije enosnega upogiba in striga;

$M_{T,V,Ed}$ projektna vrednost upogibnega momenta T prereza;

$M_{T,V,pl,Rd}$ plastična upogibna nosilnost T prereza;

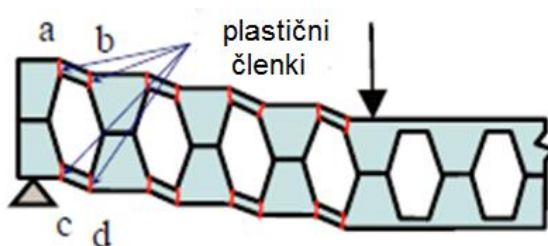
$M_{T,f,Rd}$ upogibna nosilnost pasnice T prereza;

$M_{T,Rd}$ upogibna nosilnost T prereza;

$M_{T,NV,Rd}$ reducirana upogibna nosilnost T prereza zaradi interakcije upogiba, striga in osne sile.

8.9.1.4 Kontrola upogibne nosilnosti T prereza

Satasti nosilci se analizirajo kot Vierendeelovi nosilci, saj se v točkah a, b, c in d (Slika 31.1) pojavijo upogibni momenti zaradi delovanja V_{Ed} .



Slika 31.1: Deformacija Vierendeelovega nosilca (Tkačević in sod., 2006)

Pri tem je potrebno je preveriti pogoj, da je vsota projektnih upogibnih momentov na Vierendeelovem nosilcu $\sum M_{V,Ed}$ manjša ali enaka projektni upogibni nosilnosti momentov na Vierendeelovem nosilcu $\sum M_{V,Rd}$, po enačbi (8.28).

$$\sum M_{V,Ed} \leq \sum M_{V,Rd} \quad (8.28)$$

s tem, da je:

$$\sum M_{V,Ed} = L_T \cdot V_{Ed} \quad (8.29)$$

$$\sum M_{V,Rd} = M_{1c,Rd} + M_{1t,Rd} + M_{2c,Rd} + M_{2t,Rd} = 4 \cdot M_{T,Rd} \cdot \left(1 - \left(\frac{N_{T,Ed}}{N_{T,Rd}}\right)^2\right) \quad (8.30)$$

kjer je:

$\sum M_{V,Ed}$	celotna vrednost projektnega upogibnega momenta na Vierendeelovemu nosilcu;
$\sum M_{V,Rd}$	celotna vrednost projektne upogibne nosilnosti na Vierendeelovemu nosilcu;
$M_{1c,Rd}$	projektna upogibna nosilnost zgornjega T prereza stojine z ekstremom tlaka;
$M_{1t,Rd}$	projektna upogibna nosilnost zgornjega T prereza stojine z ekstremom natega;
$M_{2c,Rd}$	projektna upogibna nosilnost spodnjega T prereza stojine z ekstremom tlaka;
$M_{2t,Rd}$	projektna upogibna nosilnost spodnjega T prereza stojine z ekstremom natega;
$M_{T,Rd}$	projektna upogibna nosilnost na enem T prerezu.

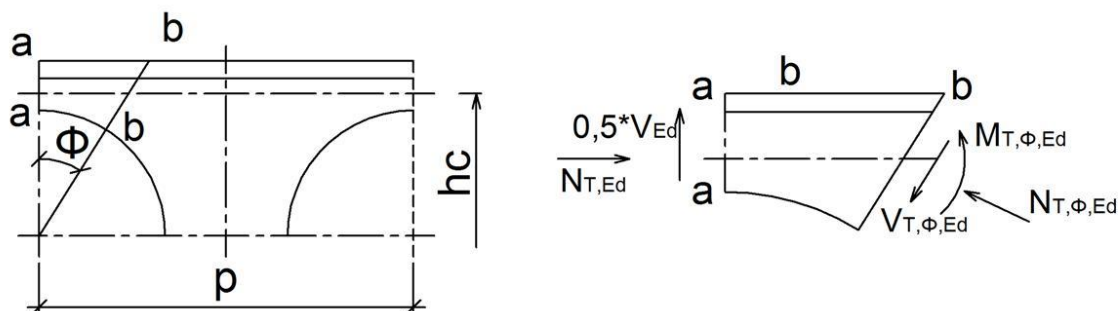
8.9.2 Krožne odprtine

(ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

Kontrola pri krožnih odprtinah za kritični T prerez se dela po naslednjih dveh predpostavkah:

- Pri nosilcih, ki so sestavljeni iz večjih krožnih odprtin, je potrebno preveriti globalno nosilnost nosilca, glej prerez a-a na Sliki 31.2. Vzdolžno ojačitev je mogoče imeti v prečnih T prerezih, ampak pod pogojem, da je odprtina pri podpori polno zaprta, vendar se pri kontroli ne upošteva ojačitev v obliki obroča. Ta se dela enako kot pri določitvi nosilnosti zgornjega in spodnjega T prereza, glede na pravila za poligonalne odprtine iz poglavja 8.9.1.

b) Naredi se kontrolo za vsako kritično odprtino zaradi efekta Vierendeelovega momenta na ravnini vzdolžnega prereza, glej prerez b-b na Sliki 31.2. Vzdolžno ojačitev je mogoče imeti v prečnih T prerezih, pod pogojem, da je odprtina polno zapolnjena pri podpori. Pri tem preverjanju se tudi krožna ojačitev, ki se nahaja okoli odprtine vključi v T prerez. To je odvisno od vrednosti kritičnega kota Φ , ki mu ustreza kritični prerez, glej prerez b-b na Sliki 31.2.



Slika 31.2: Kontrola kritičnega prereza pri krožnih odprtinah
 (ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

Zaradi poenostavitve pri računu se začne delati kontrola pri kotu 25° v korakih po $\pm 5^\circ$ na obeh straneh odprtine. Narediti se mora interpolacija diagrama rezultatov tako, da se najde najbolj neugoden primer. Lahko se uporabi tudi drugo možnost, tako da se preveri nosilnost po korakih, po največ 1° . Vrednost kritičnega kota zaradi efekta Vierendeelovega momenta, glej prerez b-b na Sliki 31.2, ki mora izpolnjevati naslednje kriterije:

$$\frac{N_{T,\Phi,Ed}}{N_{T,\Phi,Rd}} + \frac{M_{T,\Phi,Ed}}{M_{T,\Phi,Rd}} \leq 1,0 \quad (8.31)$$

kjer je:

- Φ vrednost kritičnega kota;
- $M_{T,\Phi,Rd}$ projektna upogibna nosilnost T prereza v prerezu b-b;
- $M_{T,\Phi,Ed}$ projektna vrednost upogibnega notranjega momenta v T prerezu v prerezu b-b;
- $N_{T,\Phi,Rd}$ projektna osna nosilnost normale T prereza pravokotno na prerez b-b;
- $N_{T,\Phi,Ed}$ projektna vrednost normale sile T prereza pravokotno na prerez b-b;
- $V_{T,\Phi,Ed}$ projektna prečna sila v T prerezu, ki je vzporedna prerezu b-b.

Pri kontroli kritičnega T prereza se naredi kontrola v prerezu b-b s tem, da se v račun vzame polovico višine nad odprtino, gledano v vzdolžni strani v prerezu a-a. Če se opravi kontrola ob uporabi prevojnih točk, se vzame v račun napetosti prerez a-a na Sliki 33.1. $M_{T,\Phi,Rd}$ se naredi ob upoštevanju klasifikacije prerezov. Poleg tega je potrebno določiti projektne nosilnosti $M_{T,\Phi,Rd}$ in $N_{T,\Phi,Rd}$ ob upoštevanju $V_{T,\Phi,Ed}$, ki se dobi v SIST EN 1993-1-1; točka 6.2.6.

8.10 Kontrola nosilnosti polnega prereza stojine med odprtinami

(Tkačević in sod., 2006a)

8.10.1 Splošno o nosilnosti polnega prereza stojine

V polnem delu stojine med odprtinami se pojavijo velike napetosti zaradi:

- Horizontalne strižne sile med odprtinami.
- Tlačne napetosti zaradi prenosa prečne sile.
- Prenosa sil iz koncentrirane obremenitve.

Interakcija je bolj kompleksna, ker je možnost lokalnega izbočenja zaradi vseh teh naštetih efektov.

8.10.2 Kontrola upogibne nosilnosti polnega prereza stojine med odprtinami

Če je lokalna vitkost stojine $\frac{h_o}{t_w} \leq 60 \cdot \varepsilon$ (8.32) je nosilnost polnega dela stojine proti lokalni izbočitvi primerna. Pri tem morajo biti izpolnjeni naslednji dve zahtevi (8.33) in (8.34)

$$M_{wp,Ed} \leq (C_1 \cdot \alpha - C_2 \cdot \alpha^2 - C_3) \cdot M_{wp,el,Rd} \quad (8.33)$$

$$M_{wp,Ed} \leq 0,6 \cdot M_{wp,el,Rd} \quad (8.34)$$

kjer je:

$M_{wp,el,Rd}$ elastična upogibna nosilnost polnega dela stojine med odprtinami;

$M_{wp,Ed}$ projektna vrednost upogibnega momenta polnega dela stojine med odprtinami.

Zaradi velike lokalne vitkosti dela prečnega prereza 3-3, prikazano na Sliki 32 se upogibna nosilnost kritičnega prereza stojine dokazuje po teoriji elastičnosti. V zgoraj naštetima izrazoma se projektni moment polnega dela stojine $M_{wp,Ed}$ na prerezu 3-3 dokazuje po izrazu (8.35).

$$M_{wp,Ed} = \frac{V_{wp,Ed} \cdot h_c}{2} \quad (8.35)$$

Ostale vrednosti se dokazujejo po:

$$\alpha = \frac{p}{h_o} \quad (8.36)$$

$$\beta = \frac{h_o}{t_w} \quad (8.37)$$

$$C_1 = 5,097 + 0,1464 \cdot \beta - 0,00174 \cdot \beta^2 \quad (8.38)$$

$$C_2 = 1,441 + 0,0625 \cdot \beta - 0,000683 \cdot \beta^2 \quad (8.39)$$

$$C_3 = 3,645 + 0,0853 \cdot \beta - 0,00108 \cdot \beta^2 \quad (8.40)$$

Za poligonalne in podolgovate odprtine ustreza, da se vzame kritični prerez v stojini v vzdolžnem prerezu, ki se nahaja na vrhu odprtine. Za krožne odprtine velja, da se pri vzdolžnem prerezu vzame kritični prerez v stojini pri višini enaki $0,9 \cdot h_o$. Če bi bila prečna ojačitev v polnem delu stojine ali če bi bil obroč okoli odprtine, se to lahko vključi v kritični prerez stojine.

8.10.3 Kontrola strižne nosilnosti prereza polne stojine med odprtinami

Z analizo Vierendeelovega nosilca se dobi projektno horizontalno strižno silo v polnem delu stojine $V_{wp,Ed}$, ki deluje na sredini celotne višine odprtine, glej prerez 4-4 na Sliki 32:

$$V_{wp,Ed} = \frac{V_{T,Ed} \cdot p}{h_c/2} \quad (8.41)$$

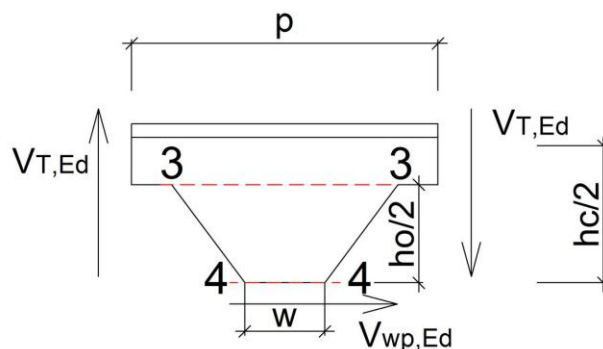
s tem, da velja:

$$V_{wp,Ed} \leq V_{wp,Rd} = \frac{w \cdot t_w \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad (8.42)$$

kjer je:

$V_{wp,Ed}$ projektna vrednost horizontalne strižne sile v polnem delu stojine;

$V_{wp,Rd}$ projektna horizontalna strižna nosilnost v polnem delu stojine.



Slika 32: Model za dokazovanje prečne sile na zgornji polovici SN

8.11 Varilna procedura pri satastih nosilcih

(Feldmann in sod., 2006b)

Raziskave so pokazale, da se lahko uporablja enostransko varjenje za sataste nosilce. Vendar zaradi majhnega prostora, ki bo ostal v primeru enostranskega varjenja, bo prišlo do oksidacije v tej coni. Drugi razlog, ki se ob tem postavlja je, kako bi se počutili v primeru, da bi stali pod nosilcem, ki je varjen po eni strani. Obstajajo naslednji načini varjenja satastih nosilcev:

- Varjenje eni strani s pripravo žleba (Slika 32.1).
- Varjenje eni strani brez priprave žleba.
- Standardno varjenje na dveh straneh, brez priprave žleba.

Izoginiti se je treba pripravi žleba, saj je proces izdelave žleba pri SN drag. Pri enostranskem varjenju se povečuje globina vara. Žleb postane širši s povečanjem v globino, kar posledično pomeni, da se porabi več dodatnega materiala za varjenje.



Slika 32.1: Varjenje na eni strani s pripravo žleba (Feldmann in sod., 2006b)

Če je korenska mera zvara 10 mm var zavzame večjo površino v primerjavi z varjenjem na dveh smereh s korensko mero 2·5 mm na obeh smereh. Varjenje na obeh straneh bo bolj učinkovito, venadar mora pri tem varilna konfiguracija omogočiti, da bi se izognilo varjenju s pripravo žleba. To pa je mogoče do debeline korenske mere zvara 12 mm, z 2·6 mm in varjenjem brez priprave žleba (Slika 32.2). Za polno penetrirani zvar je potrebno uporabiti računske metode za korensko mero zvara. Bolj realistično in ekonomsko je, da se uporabi delno- kot pa polnopenetrirani zvar, čeprav je običajna praksa v industriji, da se zahteva polno penetrirani zvar na mestih med odprtini. Zahtevi za polno penetrirani zvar se je potrebno izogniti, ker povečuje stroške proizvodnje. Polnopenetrirane zve se mora uporabiti v primeru dinamične obremenitve. Zahteve za čelne zve so opredeljene z vzdolžnimi strižnimi silami v stojinah med odprtini. Minimalna korenska mera zvara se računa za dva kontinuirana zvara na stojini s širino w . Minimalno korensko mero zvara se izračuna po izrazu (8.43).

$$a = \frac{|V_{wp,Ed}| \cdot \beta_w \cdot \sqrt{3}}{2 \cdot w \cdot f_u / \gamma_{Mw}} \quad (8.43)$$

kjer je:

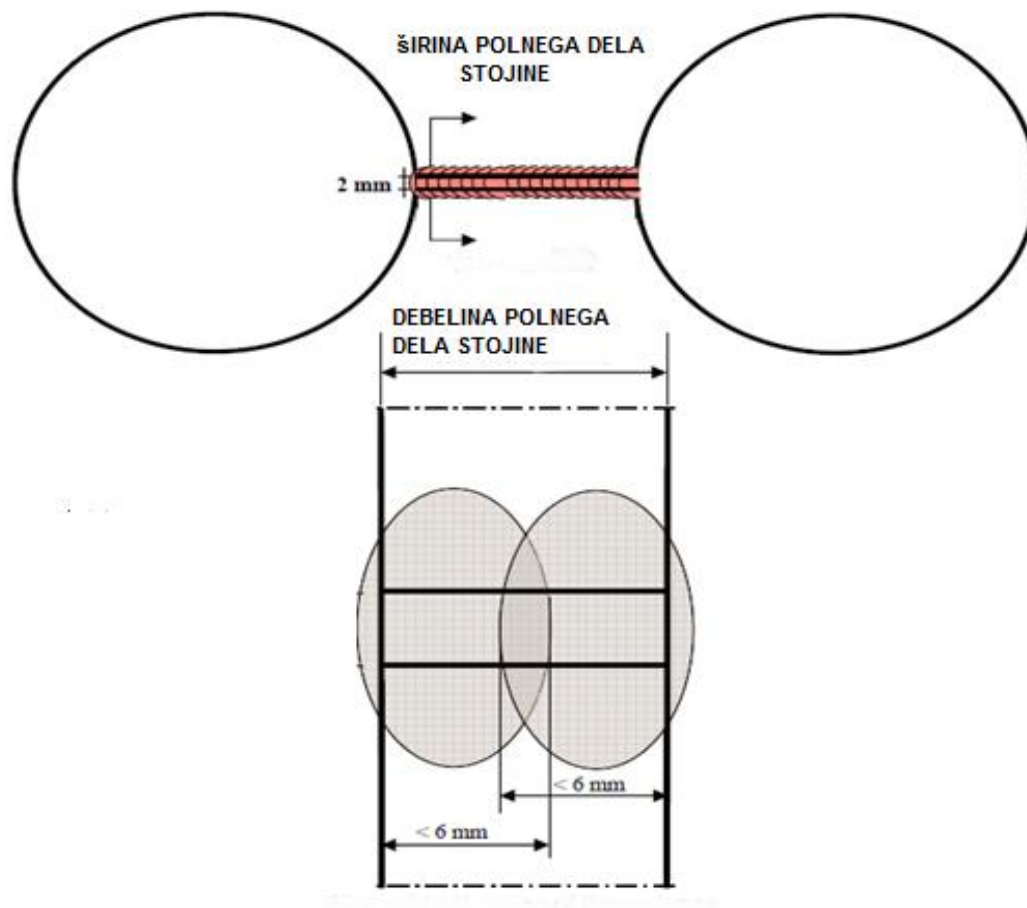
a korenska mera zvara;

β_w koleracijski kofecient;

f_u nominalna natezna trdnost osnovnega materiala;

γ_{Mw} nosilnost tornih spojev.

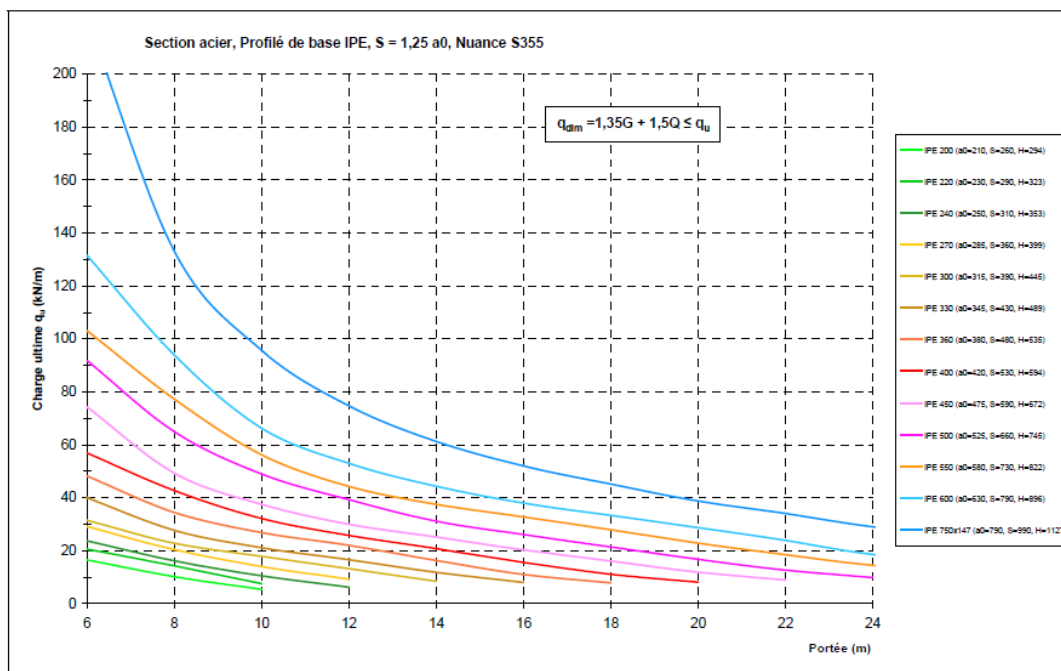
Zvare se računa po SIST EN 1993-1-8:2005, po poglavju 4. Koleracijski koeficient β_w se določa po SIST EN 1993-1-8:2005; Preglednica 4.1.



Slika 32.2: Varjenje polnega dela stojine (Feldmann in sod., 2006b)

8.12 Primer tabel za sataste nosilce z okroglimi odprtinami

Za sataste nosilce s heksagonalnimi in okroglimi odprtinami, kot tudi druge oblike satastih nosilcev, obstajajo tabele, ki se jih uporablja, preden se gre dimenzionirati nosilec. Primer za sataste nosilce z okroglimi odprtinami, kjer se za različne rešitve iz osnovnega profila dobi premer odprtin in osno razdaljo med odprtinami za različne razpone, glede na enakomerno porazdeljeno linijsko obtežbo q [kN/m] za MSN je prikazano na Sliki 32.3.



Slika 32.3: Prednačrtovanje jeklenega satastega nosilca z okroglimi odprtinami (IPE - S235) (Feldmann in sod., 2006a)

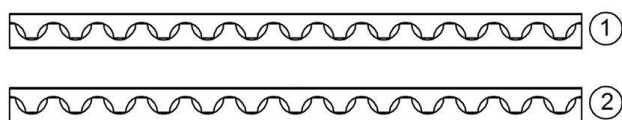
8.13 Analize nosilnosti satastih nosilcev

Z analizami, ki so bile narejene za sataste nosilce glede na odvisnosti relativne vitkosti med dolžino nosilca L in višino izvirnega profila h . Ta predpostavka je za prostoležeče nosilce z bočnimi podporami. Pri majhnih relativnih vitkosti je zaradi prečne sile nosilnost satastih nosilcev manjša glede na izvorne polnostenske nosilce. S povečevanjem relativne vitkosti, se povečuje nosilnost satastih nosilcev za približno 50 %, glede na polnostenske nosilce. S povečevanjem velikosti odprtin in z daljšimi razponi kontinuirano raste nosilnost satastega nosilca. Ekonomsko gledano se satasti nosilci z majhnimi odprtinami ne splačajo delati. Za ekonomsko primerjavo satastih nosilcev mora biti relativna vitkost $L/h \geq 24$, da bo uporaba upravičena; po starem je bila relativna vitkost $L/h \geq 15$. Glede na MSU, satasti nosilci prevzamejo večje obremenitve kot izvorni polnostenski nosilci.

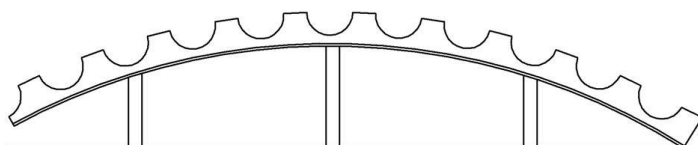
8.14 Izbira vzdolžnega profila

8.14.1 Ukrivljeni satasti nosilci

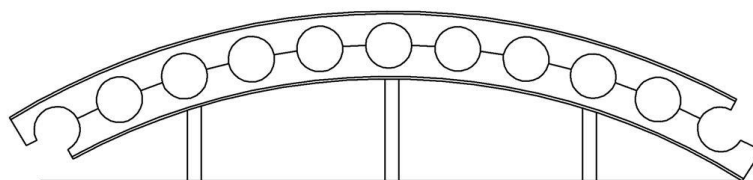
Tekom izdelave satastega nosilca je mogoče, da se pred varjenjem dva T prereza ukrivi (Slika 33). Izdelujejo se iz neukrivljenih profilov v katerih se izrežejo odprtine. Satasti nosilci so odlična rešitev za ukrivljene konstrukcije streh, ker zmanjšujejo težo konstrukcije do 40 % v primerjavi z navadnimi polnostenskimi nosilci in so poleg tega še bolj konstrukcijsko učinkoviti. Oblika odprtin ukrivljenih satastih nosilcev je na voljo v številnih oblikah, kot so na primer šesterokotna, krožna, eliptična in parabolna oblika. Uporabljajo se S oblike krivulj ali obrnjene S krivulje. S krivulja nastane s pridružitvijo dveh posameznih krivulj z enakimi ali različnimi polmeri. Večino ukrivljenih satastih nosilcev se dimenzionira kot prostoležeče nosilce. Ekonomski razpon ukrivljenih satastih nosilcev z okroglimi odprtinami je odvisen od obtežbe in težišča. Preglednica A.6 pove, da je z daljšimi razponi večja ekonomska upravičenost ukrivljenih SN glede na izbran konstrukcijski sistem.



Za zgornji T prerez se uporablja (1), za spodnji T prerez se uporablja (2).



Spodnji T prerez (2) se ukrivi na željen radij.



Zgornji T prerez (1) je ukrivljen in privarjen na spodnji T prerez (2).
S procesom se lahko nadaljuje.

Slika 33: Proces ukrivitve satastega nosilca z okroglimi odprtinami

Preglednica A.6: Izbira tipa ukrivljene strehe, glede na razpon
 (Cellular Beam Design Guide, 2008)

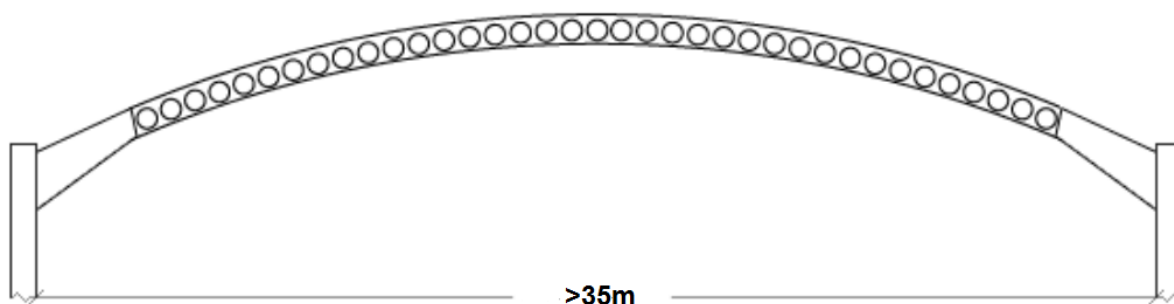
Tip strehe	<20 m	20-40 m	>40 m
Ukrivljen nosilec	✓	✓✓	✓✓✓
Ukrivljen nosilec, prostoležeče podprt	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓

Razlika v stroških med ravno streho in ukrivljeno strešno konstrukcij je, da je ekonomska upravičenost ukrivljene sterehe pri uporabi radija okoli 150 m. V izdelavi ukrivljenega satastega nosilca sta najbolj kritična razpon in zahtevani radij. V Preglednici A.7 so prikazani dolžine razponov glede na uporabo radijev za izgradnjo.

Preglednica A.7: Primerjava polnostenskih nosilcev in ukrivljenih nosilcev
 (Cellular Beam Design Guide, 2008)

Razponi	Manjši radiji	Srednji radii	Veliki radiji
Do 16m	Polnostenski nosilci	Polnostenski nosilci in Satasti nosilci	Satasti nosilci
>16m	Polnostenski nosilci in Satasti nosilci	Satasti nosilci	Satasti nosilci

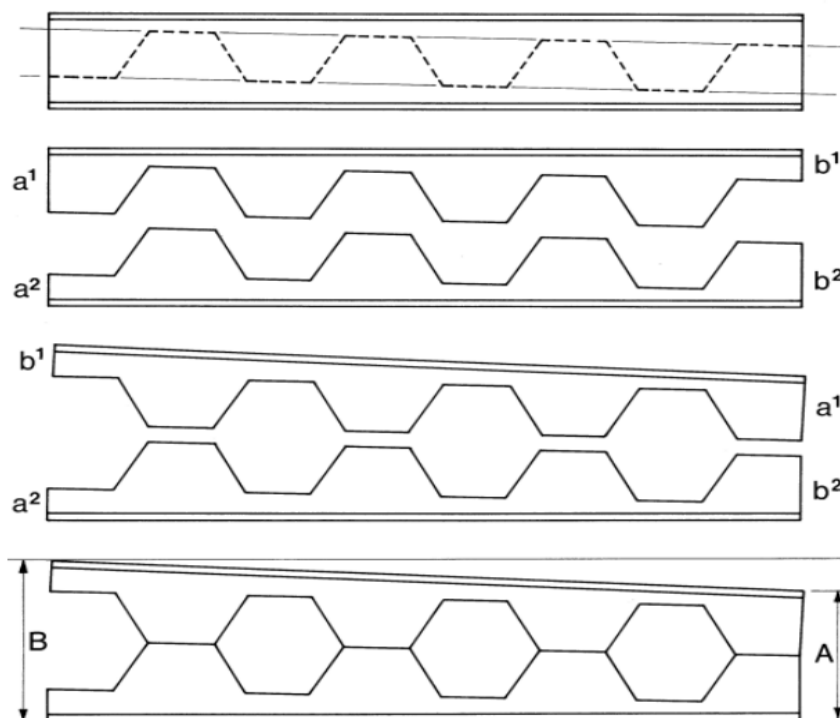
Pri kontinuirnih okvirjih ukrivljenih nosilcev je potrebno vpeti ukrivljene nosilce na stebre, kot je prikazano na Sliki 34.



Slika 34: Vpetje ukrivljenega nosilca pri kontinuirnih okvirjih.

8.14.2 Satasti nosilci s spremenljivim prečnim prerezom

Satasti nosilci ponujajo različne možnosti oblikovanja. Višino se lahko določi s spremembo vzorca rezanja. Na ta način se napetosti v nosilcu ujemajo z pripadajočo obtežbo, kar pa je rešitev za optimalno gradnjo. Satasti nosilci s spremenljivim prečnim prerezom se naredijo tako, da izrezani vzorec ni vzporeden dolžini nosilca, ampak je pod kotom. Po rezanju ene od dveh polovic profila se obrne zgornji profil za 180°, kar je prikazano na Sliki 35, potem se polovici profila zamaknejo in varijo po polnih delih stojine. Na enem koncu sta nizki strani profila skupaj, na drugem koncu pa visoki strani.

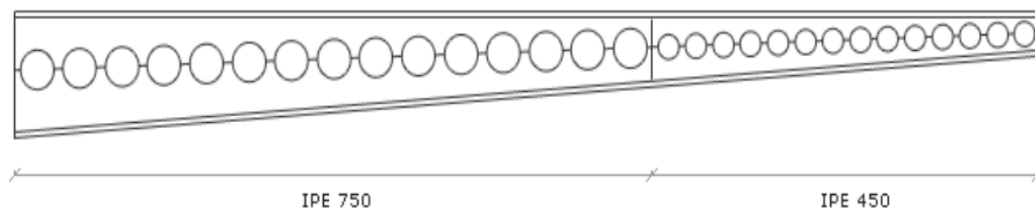


Slika 35: Postopek izdelave SN s heksagonalnimi odprtinami s spremenljivim prečnim prerezom

Tovrstni nosilci imajo lahko odprtine enotne velikosti ali različne velikosti. Satasti nosilci z spremenljivim prerezom bodo pri uporabi konzole dosegli:

- Velike višine prereza in velik vztrajnosti moment na območju podpore.
- Minimalno višino in minimalno težo na prostem delu nosilca.

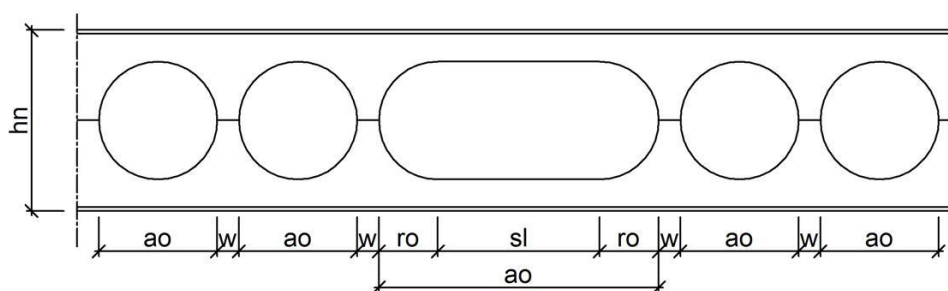
Pri dolgih nosilcih se uporablja dve ali tudi tri različne velikosti presežkov za nosilec, s čimer se reducira skupna teža, kot je prikazano na Sliki 36.



Slika 36: Satasti nosilec s spremenljivim prečnim presežkom z reducirano težo

8.14.3 Podolgovate odprtine

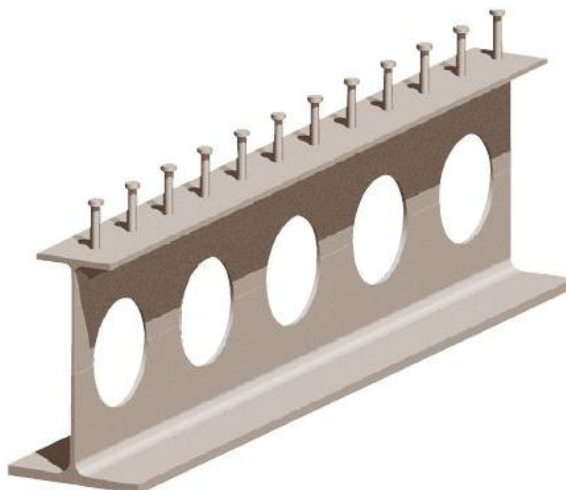
Včasih je potrebno povečati odprtino med dvema odprtinama. Z združitvijo dveh krožnih odprtin se dobi podolgovato odprtino (Slika 37). Če je le mogoče se mora podolgovata odprtina pozicionirati v središču razpona nosilca oziroma v coni, kjer so majhne prečne sile. V primerih, da se mora izvesti v bližini podpor, je potrebno odprtino ojačati. Podolgovate odprtine se uporabljajo prevsem zaradi pravokotnih ali podolgovatih cevi, pri tem pa postane korist podogovah odprtin vprašljiva. Krožne cevi so cenejše in bolj učinkovite kot podolgovate saj je izdelava podolgovatih odprtin v nosilcih velik strošek. Cenejša je izdelava nosilcev z okroglimi odprtinami brez podolgovatih odprtin.



Slika 37: Satasti nosilec s podolgovato odprtino

8.14.4 Asimetrični nosilci

Asimetrični nosilci (Slika 37.1) so primerni za sovprežne konstrukcije in so narejeni z varjenjem T prerezov, ki so različni kot je lahko tudi kvaliteta jekla. Pri asimetričnih nosilcih je potrebno narediti izračun velikosti odprtin in razmaka med njimi.

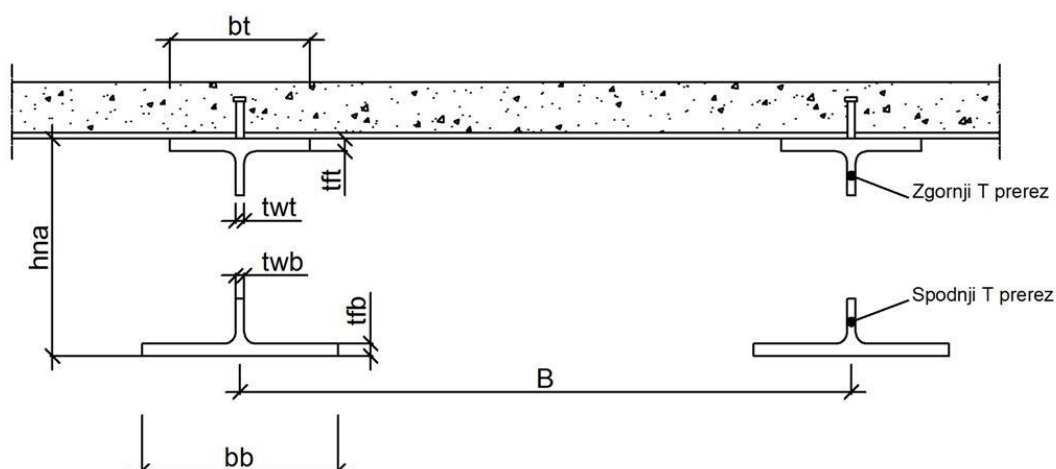


Slika 37.1: Asimetrični sovprežni nosilec (Feldmann in sod., 2006b)

Za ohranjanje minimalnih mehanskih obnašanj, razmerje za asimetrijo prereza med površino zgornjega T prereza in površino spodnjega T prereza ne sme preseči vrednosti 4,5. S tem se površina in povišana trdnost spodnjega nateznega prereza povečajo. Razponi za asimetrične nosilce dosegaajo od 8 do 30 m, za mednadstropne konstrukcije za pisarne se npr. uporabljajo razponi okoli 18 m. V sovprežnih satastih nosilcih z odprtinami vpliv sovprežja koristi Vierendeelovemu upogibu v zgornjem T prerezu (Slika 38).

Uporaba različnih prerezov z odprtinami v sovprežnem nosilcu je v naslednjih kombinacijah:

- IPE za zgornji T prerez in HEA za spodnji T prerez;
- IPE za zgornji T prerez in HEB za spodnji T prerez;
- HEA za zgornji T prerez in HEB za spodnji T prerez.



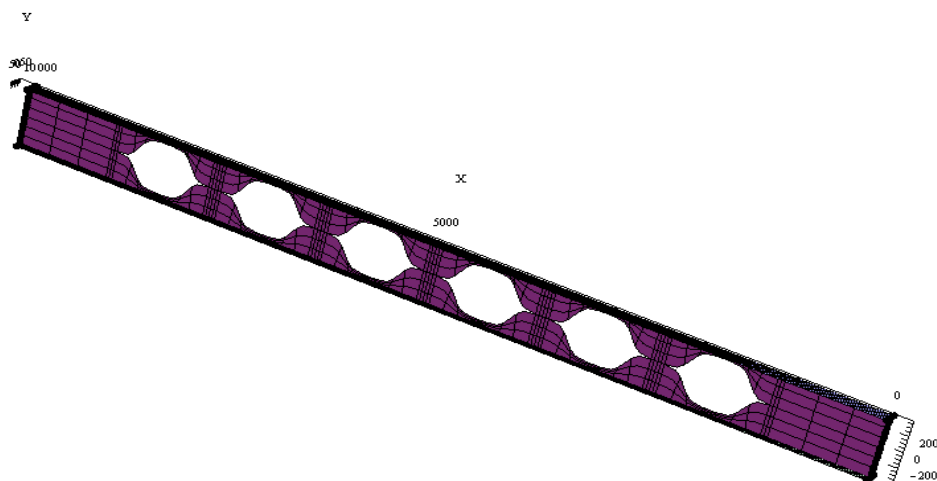
kjer je:

- b_b širina spodnje pasnice;
- b_t širina zgornje pasnice;
- t_{wt} debelina zgornje stojine T prereza;
- t_{fb} debelina spodnje pasnice T prereza;
- t_{ft} debelina zgornje pasnice T prereza;
- t_{wb} debelina spodnje stojine T prereza;
- B osna razdalja med nosilci;
- h_{na} višina asimetričnega SN.

Slika 38: Sovprežni asimetrični satasti nosilec

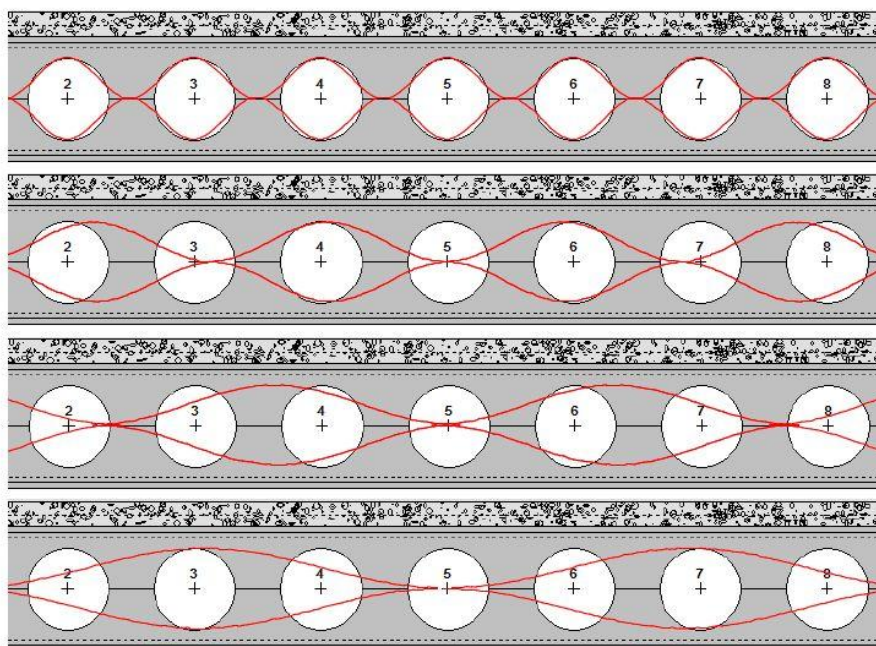
8.14.5 Angelina nosilec

Nov tip odprtin z imenom Angelina (Slika 39) omogoča, da je proizvodni proces izdelave nosilcev bolj učinkovit za vročevaljane profile zaradi izreza iz stojine in zmanjšane varilne dolžine.



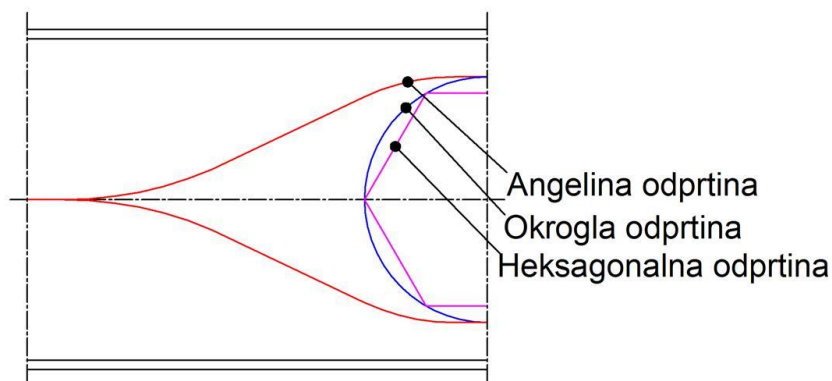
Slika 39: Angelina nosilec

Iz satastega nosilca z okroglimi odprtinami je bila razvita nova oblika odprtin z imenom Angelina, glej Slika 39.1.



Slika 39.1: Optimizacija satastega nosilca z okroglimi odprtinami v Angelina nosilec
(Zanon, in sod., M. 2009)

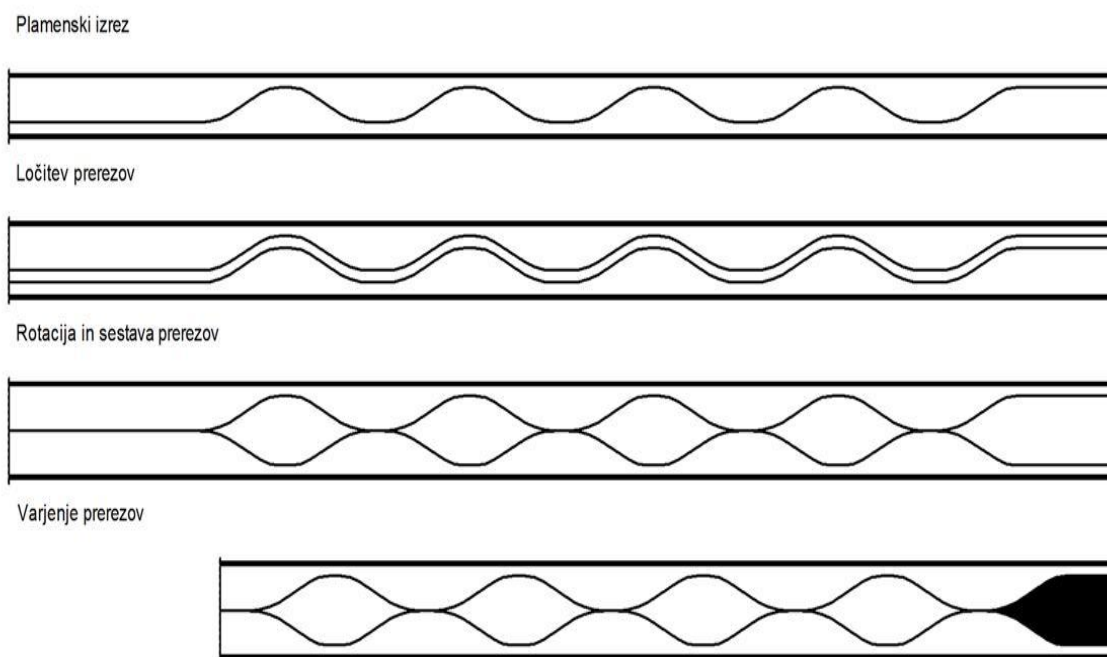
Ta vrsta nosilca ima boljše izkoriščeno površine odprtin v primerljivi z satastimi nosilci z okroglimi ali heksagonalnimi odprtinami, prikazano na Sliki 40.



Slika 40: Primerjava med oblikami odprtin

Optimizacija procesa izdelave

Angelina nosilce se izdeljuje iz HEA, HEB, HEM ali IPE profilov z vodoravnim plamenskim izrezom po stojini v obliki sinusoidne črte. Zatem se oba prereza obrne in povari po polnem delu stojine, prikazano na Sliki 41.



Slika 41: Proces izdelave Angelina nosilca

Prednosti Angelina nosilcev

- Estetska oblika

S svojimi velikimi odprtinami daje nosilec veliko možnosti za oblikovanje in izognitev tehničnim oviram pri vodenju intalacij preko odprtin. Zmanjšuje težo jekla v poslovnih stavb na manj kot 30 kg/m².

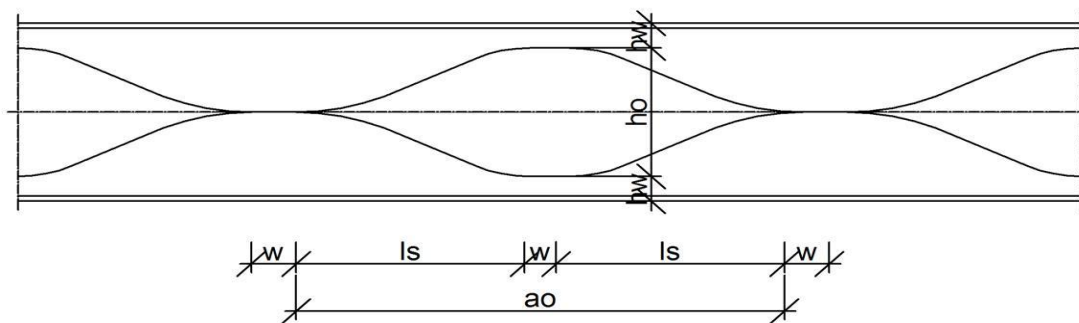
- Ekonomičnost

Nosilci Angelina so ekonomični, kar se tiče izreza, prihranka na teži, optimalne višine in kratke varilne dolžine. Velike odprtine omogočajo namestitve širših vodov.

- Fleksibilnost

Angelina nosilci se primerni za vse vrste vodov in za zelo velike pravokotne prezračevalne vode dimenzij do 70·40 cm.

Geometrijske karakteristike Angelina nosilca je podana na Sliki 42.



kjer je:

w širina stojine med odprtinami;

l_s dolžina sinusoide;

a_o širina odprtine;

h_o višina odprtine;

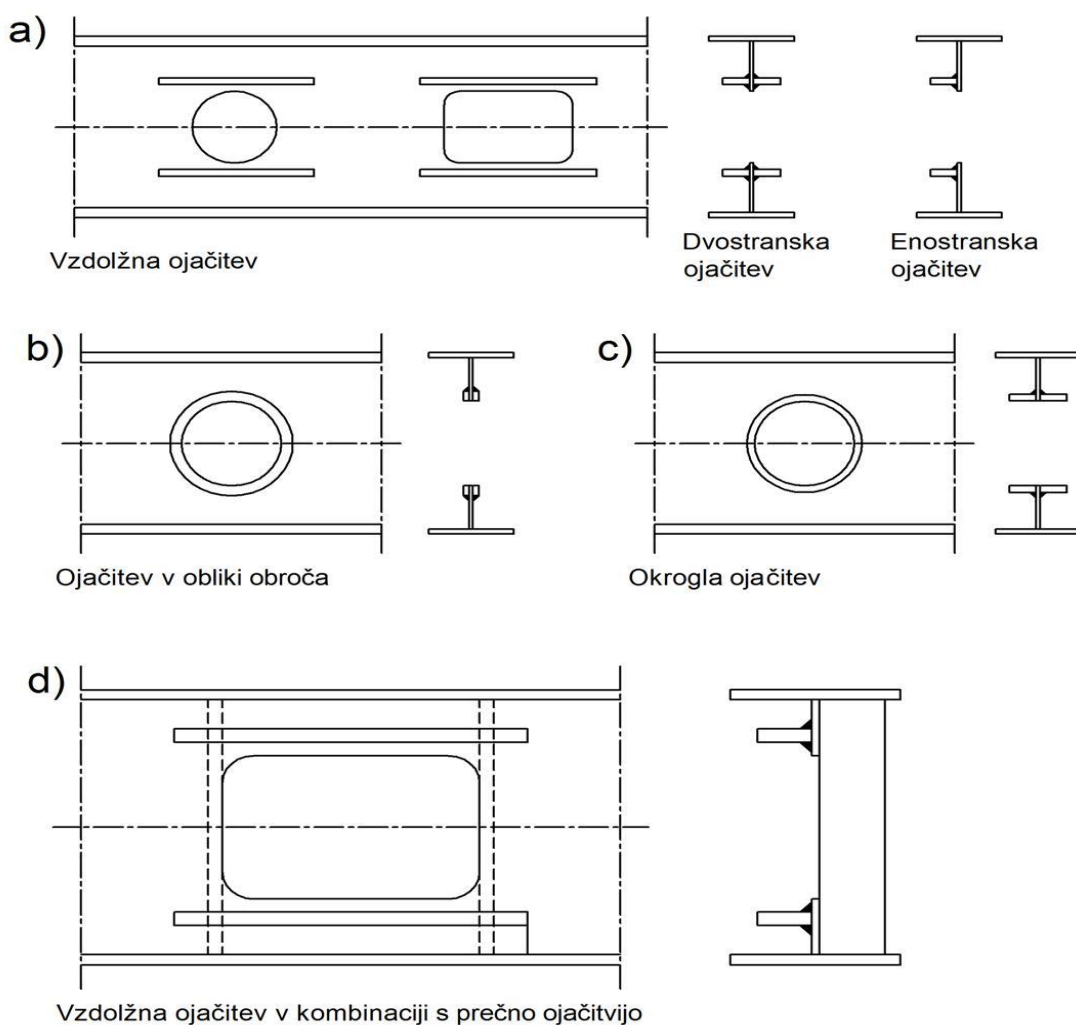
h_w višina stojine nad odprtino.

Slika 42: Geometrijske oznake Angelina nosilca

9 OJAČITEV ODPRTIN V STOJINI

9.1 Tipi ojačitev odprtin

Pri načrtovanju odprtin je v stojini je potrebno izbrati lokacijo odprtin, ki ni v coni velikih lokalnih obremenitev. Zaradi vnosa koncentriranih sil ali zaradi zahtev požarne varnosti se pojavi potreba po ojačitvi nekaterih odprtin. To se izvede s polnimi jeklenimi pločevinami ter z njihovim varjenjem na obeh straneh. Debeline pločevin in zvari so optimizirani v odnosu z lokalnimi napetostmi. Pri tem se odprtine v stojini ojača tako, da se prepreči izbočitev stojine.



Slika 43: Ojačitev odprtin v stojini

Ojačitev je lahko enostranska ali dvostranska, Slika 43 a), v obliki obroča, Slika 43 b) ali v obliki krožne ojačitve, Slika 43 c), mora pa biti simetrična glede na vzdolžno srednjico odpiranja. Vzdolžna ojačitev v kombinaciji z prečno ojačitvijo je lahko na eni ali na dveh straneh. Če se uporabi prečna ojačitev, se vzdolžno in prečno ojačitev uporabi vsako na svoji strani, v tej kombinaciji je potrebo podaljšati vzdolžno ojačitev, Slika 43 d). Varjeni nosilci, ki imajo tanko stojino se morajo ojačati, da ne pride do izbočenja stojine pri odprtini, glej Sliko 43.1. Velike odprtine povzročajo pomembno redukcijo v strižni nosilnosti pri velikih odprtinah in majhno pri upogibni nosilnosti. Strižni prenos preko odprtine je pomemben, zato so odprtine nameščene izven velike strižne cone v stojini.



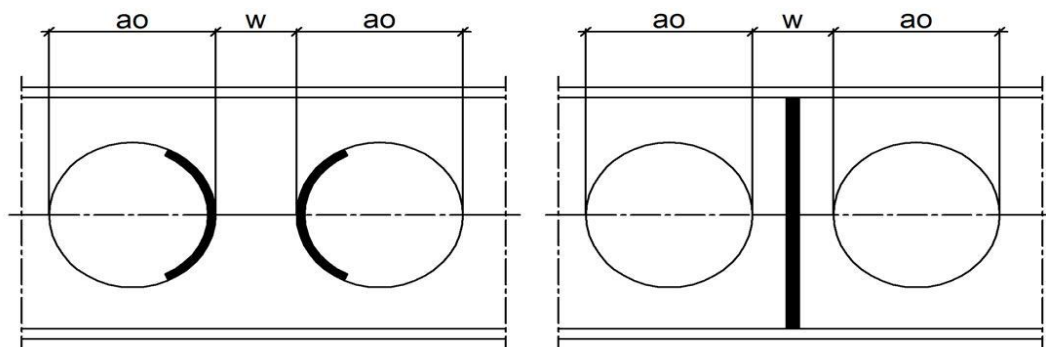
Slika 43.1: Velika ojačana lokalna odprtina v nosilcu v Frankfurt Commerz Bank
(Feldmann in sod., 2006d)

9.2 Ojačitev polnega dela stojine pri satastih nosilcih in nosilcih s posameznimi odprtinami

Merilo za dobro izvedbo na meji MSN zahteva ustrezno upogibno togost za zmanjšanje deformacij in vibracij. Optimizacija ojačitev se lahko izvede z večjim vztrajnostnim momentom v kombinaciji z manjšo debelino stojine. Pogosta je izvedba :

- zapolnitev odprtin, kar pa predstavlja problem zaradi izgube prostega prehoda za instalacije;
- ojačitev odprtine z obroči;
- izbira močnejšega prereza;
- izbira višjega razreda jekla.

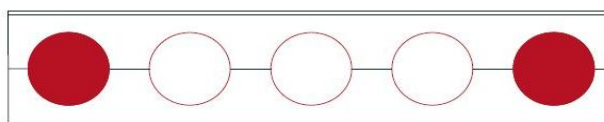
Možnost ojačitve je, da se privari togo pločevino na stojino, lahko se tudi uporabi dva polovična obroča, kot je prikazano na Sliki 44.



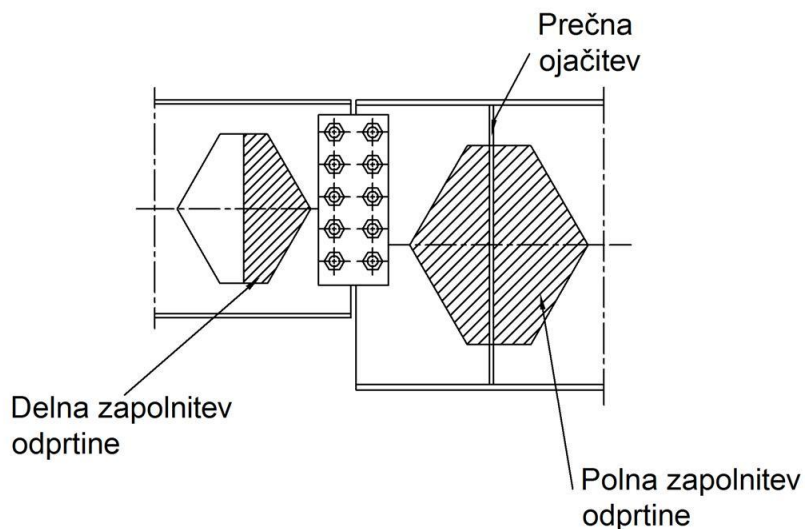
Slika 44: Ojačitev polnega dela stojine

9.3 Zapornitev odprtin v stojini z diski

Da bi se podprlo velike prečne sile blizu priključkov ali zaradi zahtev požarne varnosti postane potrebno zapolniti nekatere odprtine. To se izvede z polnimi jeklenimi pločevinami v obliki diska ter njihovim varjenjem na obeh straneh. Debelina pločevine in zvari so optimizirani v odnosu z lokalnimi napetostmi. Robove odprtin v stojini se ojača tako s tem, da se prepreči izbočenje stojine. Za ojačitev v obliki diska se izberejo prerezi razreda kompaktnosti 1 ter 2.



Slika 44.1: Nosilec z polno zapolnjeno odprtino (Feldmann in sod., 2006b)

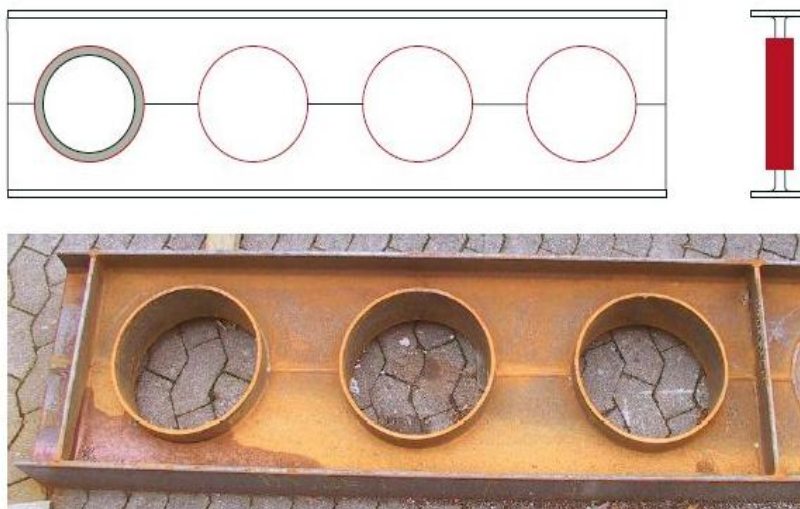


Slika 45: Zapolnitev odprtine

Tipi povezav so odvisni ali je SN povezan na steber ali na drug nosilec (Slika 44.1). Pri uporabi delne zapolnitve odprtine se glede na konstrukcijski sistem se ojača odprtino z enim ali dvema polovičnima diskoma ali z uporabo kombinacij (Slika 45).

9.4 Okrogle ojačitve

Okrogle ojačitve se vari na eni ali na obeh straneh odprtine. Na Sliki 45.1 je prikazana ojačitev odprtine z jeklenim okroglim obročem na obeh straneh odprtine. Pri satastih nosilcih okrogle ojačitve povečujejo nosilnost polnega dela stojine.



Slika 45.1: Satasti nosilec z okroglimi ojačitvami odprtine (Feldmann in sod., 2006b)

9.5 Kontrola izbočenja tlačene pasnice v ravnini stojine

(ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

Da se prepreči izbočitev tlačene pasnice v ravnini stojine je potrebno dati na vsako stran odprtine prečno ojačitev, na območju najmanj $0,1 \cdot d_w \cdot t_w$ (Slika 48.1) razen, če je zadoščeno pogojem:

- Za pravokotne odprtine:

$$d_w/t_w \leq 0,4 \cdot \left(E/f_{yf} \right) \cdot \left[1 - \frac{0,5 \cdot a_o}{d_w} \right] \cdot \left[\frac{A_w}{A_{fc}} \right]^{0.5} \quad (9.0)$$

- Za okrogle odprtine:

$$d_w/t_w \leq 0,4 \cdot \left(E/f_{yf} \right) \cdot \left[1 - \frac{0,45 \cdot d_o}{d_w} \right] \cdot \left[\frac{A_w}{A_{fc}} \right]^{0.5} \quad (9.1)$$

kjer je:

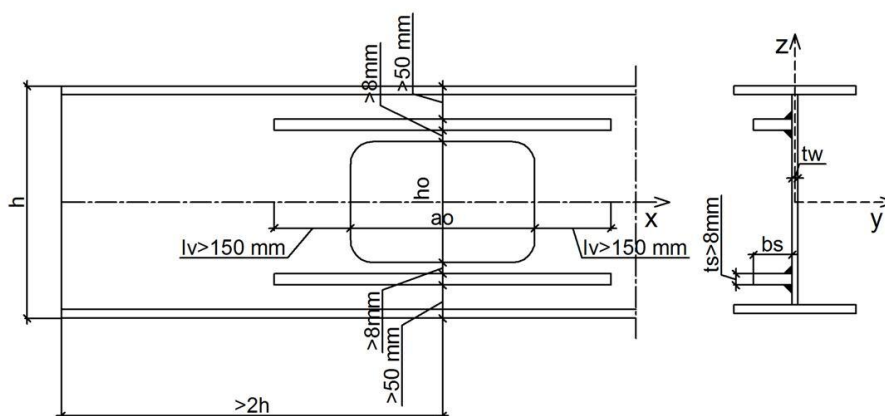
- E modul elastičnosti;
- f_{yf} meja tečenja pasnice;
- A_{fc} površina tlačene pasnice;
- A_w površina polnega dela stojine.

9.6 Vzdolžne ojačitve

Vzdolžne ojačitve (Slika 46) so narejene iz pravokotnih pločevin, ki so varjene nad in pod odprtino, na eni ali na obeh straneh stojine.

Vzdolžne ojačitve omogočajo:

- Povečanje upogibne nosilnosti stojine pri Vierendeelovemu momentu.
- Preprečitev izbočitve stojine.



Slika 46: Geometrijske omenjitve za pravokotne odprtine

Za vzdolžne ojačitve se vzamejo ojačitve katerih razmerje med širino in debelino ne preseže meje za 3. razred kompaktnosti. Pri plastični analizi se širina ojačitev zunaj 2. razreda obravnavajo kot neefektivne. Maksimalna velikosti ojačitve so odvisne od tega, da se stojina upira lokalnim silam, ki nastanejo s prenosom sil med zvarom med ojačitvijo in stojino. Velikost vzdolžne ojačitve se izbere po sledečih izrazih (Feldmann in sod., 2006c):

- Za ojačitve na obeh straneh nosilca, maksimalna debelina vzdolžne ojačitve t_s ne sme preseči velikosti debeline stojine t_w :

$$\frac{t_w}{t_s} \leq 1.2 \cdot \left(\frac{l_v}{2 \cdot b_s} \right) \quad (9.2)$$

- Za ojačitve na eni strani velja:

$$\frac{t_w}{t_s} \leq 1.2 \cdot \left(\frac{l_v}{2 \cdot b_s} \right) \cdot 0.8 \quad (9.3)$$

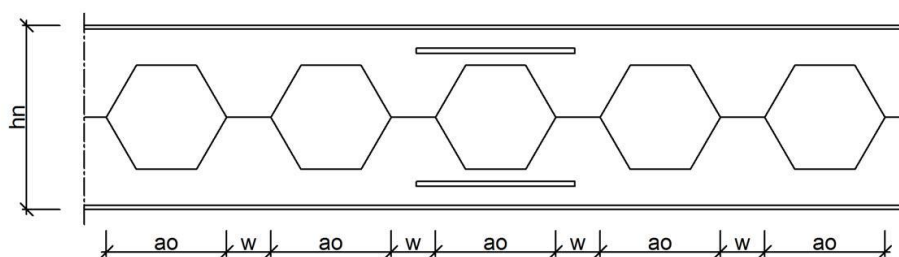
- Sidrna dolžina vzdolžne ojačitve l_v mora biti manjša od $2 \cdot b_s$, kjer je b_s širina vzdolžne ojačitve. Za minimalno vrednost l_v se vzame 150 mm v meji, ko je $l_v = 2 \cdot b_s$ (9.4), pri čemer je $t_s < 1.2 \cdot t_w$ (9.5).
- Za kotne zvara znaša korenska mera kotnega zvara vsaj polovico debeline ojačitve. Delna penetracija zvara je primerna razvoj polne nosilnosti ojačitve preko sidrne dolžine l_v .
- Za ojačitve, ki so samo na eni strani, se vrednost t_s poveča, kar pa ni enako dvokratniku vrednosti za zvar.

V praksi horizontalne ojačitve odprtin z dimenzijami preko 200mm·20mm niso priporočene. Velikost kotnega zvara se računa po:

$$a = \frac{b_s \cdot t_s \cdot \beta_w \cdot f_y \cdot \gamma_{Mw}}{2 \cdot l_v \cdot f_u \cdot \gamma_{M1}} \quad (9.6)$$

9.6.1 Podpiranje koncentrirane obremenitve pri satastih nosilcih

Lokalnim plastičnim deformacijam pri odprtini, ki so blizu koncentriranih obremenitev ali na mestih, kjer so največje napetosti se je mogoče izogniti z varjenjem pločevine nad in pod odprtino (Slika 47).



Slika 47: Vzdolžna ojačitev pri SN za izogibanje lokalnim plastičnim deformacijam

9.7 Prečne ojačitve

Prečne ojačitve se običajno ne zahtevajo v kompaktnostnih razredih 1 in 2. Lahko pa se zahtevajo v kompaktnostnem razredu 4, zlasti v primeru pozicije ojačitve pod točkovno obtežbo. V primeru zahtev morajo biti prečne ojačitve po višini prereza polne.

9.8 Kontrola nosilnosti prereza odprtine z vzdolžno ojačitvijo

(ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

9.8.1 Kontrola strižne nosilnosti prereza z ojačitvijo pravokotne odprtine

Projektno strižno nosilnost prereza ojačane ene pravokotne odprtine $V_{o,Rd}$ se dobi z nižjo vrednostjo izmed $V_{o,ba,Rd}$, ki se računa po izrazu (7.33) in projektno strižno nosilnostjo prereza pravokotne odprtine $V_{o,pl,Rd}$:

$$V_{o,pl,Rd} = \left(V_{pl,Rd} - \frac{h_0 \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} \right) \cdot \mu_3 \quad (9.7)$$

s tem:

$$\mu_3 = \frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot A_r}{h_0 \cdot t_w} \text{ in } \mu_3 \leq 1,0 \quad (9.8)$$

kjer je:

A_r površina ojačitve;

μ_3 koeficient.

9.8.2 Kontrola strižne nosilnosti prereza z ojačitvijo okrogle odprtine

Projektno strižno nosilnost prereza ojačane ene okrogle odprtine $V_{o,Rd}$ se dobi z manjšo vrednostjo izmed $V_{o,ba,Rd}$, ki se računa po izrazu (7.34) in projektno strižno nosilnostjo prereza okrogle odprtine $V_{o,pl,Rd}$:

$$V_{o,pl,Rd} = \left(V_{pl,Rd} - \frac{d_o \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} \right) \cdot \mu_3 \quad (9.9)$$

s tem:

$$\mu_3 = \frac{7.7 \cdot A_r}{d_o \cdot t_w} \text{ in } \mu_3 \leq 1.0 \quad (9.10)$$

9.8.3 Kontrola upogibne nosilnosti prereza z ojačitvijo odprtine

Kontrolo upogibne nosilnosti prereza z ojačitvijo ene odprtine $M_{o,Rd}$, ki je pravokotne ali okrogle oblike se naredi na sredini odprtine ob upoštevanju projektne prečne sile V_{Ed} v točki odprtine z enačbo (9.11).

$$M_{o,Rd} = M_{1,Rd} - \left(\frac{V_{Ed}}{V_{o,Rd}} \right) \cdot (M_{1,Rd} - M_{2,Rd}) \quad (9.11)$$

s tem:

$$M_{2,Rd} = \frac{(A_f - A_r) \cdot d_w \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (9.12)$$

kjer je:

$M_{o,Rd}$ projektna upogibna nosilnost prereza z ojačitvijo;

$M_{1,Rd}$ projektna vrednost upogibne nosilnosti prereza z ojačitvijo, brez upoštevanja striga;

$M_{2,Rd}$ projektna vrednost upogibne nosilnosti prereza z ojačitvijo, brez upoštevanja striga;

Vrednost upogibne nosilnosti $M_{1,Rd}$, brez upoštevanja striga se določuje z naslednjimi izrazi:

- če je $A_r \leq t_w \cdot e_o$:

$$M_{1,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot \left(1 - \frac{0,25 \cdot t_w \cdot \left(h_0 - \frac{2 \cdot A_r}{t_w} \right) \cdot \left(h_0 - \frac{2 \cdot A_r}{t_w} + 4 \cdot e_o \right)}{V_{pl,Rd}} \right) \quad (9.13)$$

- če je $A_r > t_w \cdot e_o$:

$$M_{1,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot \left(1 - \frac{t_w \cdot (0,25 \cdot h_o^2 + h_o \cdot e_o - e_o^2) - A_r \cdot h_o}{V_{pl,Rd}} \right) \quad (9.14)$$

Celotna dožina horizontalne ojačitve gre preko roba odprtine z namenom, da se sidra. Horizontalna ojačitev se lahko uporabi na eni ali na dveh straneh, kot je to prikazano na Sliki 48. Na horizontalno ojačitev deluje projektna horizontalna osna sila $F_{r,Ed}$. Vrednost projektne osne sile v ojačitvi $F_{r,Ed}$ se določi iz momenta nosilnosti iz T prereza ojačitve s poenostavitvijo, da se vzame namesto $F_{r,Ed}$ vrednost projektne nosilnosti $F_{r,Rd}$. Nosilnost T prerezov nad in pod odprtino za Vierendeelov upogibni moment. Polni del stojine mora biti dovolj močan, da prenese obremenitev, ki se prenaša iz ojačitve. Sidrna dolžina ojačitve l_v , ki je prikazana na Sliki 48 mora zadovoljiti sledečim kriterijem (Feldmann in sod., 2006d):

- Sidrna dolžina ojačitve pri četrtini širine odprtine:

$$l_v \geq 0,25 \cdot a_o \quad (9.15)$$

- Sidrna dolžina ojačitve zaradi strižne nosilnosti kotnega zvara:

$$l_v \geq \frac{F_{r,Ed}}{2 \cdot n \cdot a \cdot f_{vw,d}} \quad (9.16)$$

- Sidrna dolžina ojačitve zaradi nosilnosti ojačitve:

$$l_v \geq \frac{F_{r,Ed}}{n \cdot t_r \cdot f_{yr} / (\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3})} \quad (9.17)$$

- Sidrna dolžina ojačitve zaradi strižne nosilnosti stojine:

$$l_v \geq \frac{F_{r,Ed}}{2 \cdot n \cdot t_w \cdot f_{vr} / (\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3})} \quad (9.18)$$

kjer je:

a korenska mera zvara;

A_r prečni prerez ojačitve na eni strani ali na dveh straneh prereza;

n število ojačitev, vzame se 1 za enostransko ojačitev in 2 za dvostransko ojačitev;

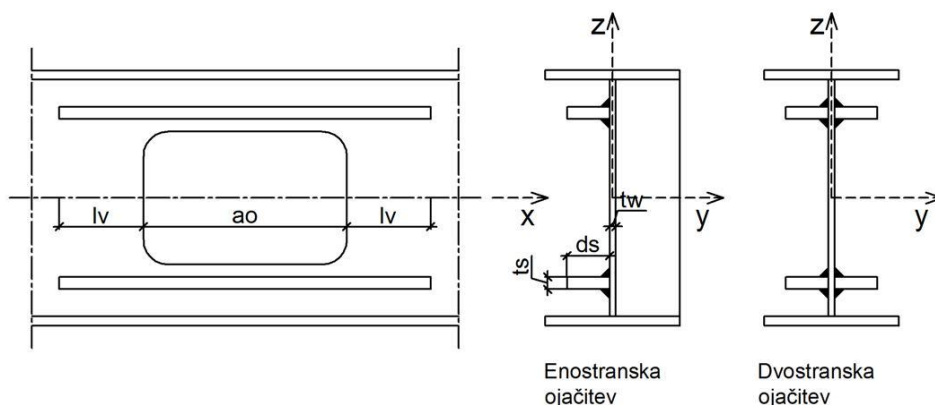
f_{yr} meja tečenja ojačitve;

$f_{vw,d}$ projektna strižna trdnost v zvaru.

Projektno osno silo v ojačitvi se vzame v izrazih (9.16), (9.17) in (9.18) kot:

$$F_{r,Ed} = A_r \cdot f_{vr,d}$$

Projektno strižno trdnost v zvaru $f_{vw,d}$ se vzame po izrazu iz SIST EN 1993-1-8:2005, točka 4.7.3.3(3).



Slika 48: Kriterij za povečanje dolžine ojačitve

9.9 Kontrola nosilnosti nosilcev z vmesnimi prečnimi ojačitvami odprtin

(ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

Stojine s prečnimi ojačitvami ne smejo preseči razmerja d_w/t_w preko $390 \cdot \varepsilon$. Primeren prostor za odprtino v stojini mora biti odmaknjen najmanj $0,1 \cdot d_w$. Ta odmik je oddaljenost od vrha zgornje in dna spodnje pasnice do začetka horizontalnega dela odprtine ter oddaljenost od osi prečne ojačitve do začetka vertikalnega dela odprtine, kot je to prikazano na Sliki 48.1. To oddaljenost odprtine se upošteva zaradi prečne ojačitve in diagonalnih nateznih napetosti v polju ENV 1993-1-1:1992, točka 5.6.4. Iz tega sledi, da mora razmak med prečnima ojačitvama zadoščati pogoju $1,0 \cdot d_w \leq a \leq 3,0 \cdot d_w$ (9.19). Pri določitvi nosilnosti panela stojine ustreza zmanjšanje območja nateznega polja, ki se ga dobi z dimenzijo D , ki ustreza premeru okrogle odprtine d_o . S to predpostavko se pravokotno odprtino obravnava kot okroglo odprtino, glej Sliko 48.2 s sledečim izrazom:

$$D = \sqrt{a_o^2 + h_o^2} \cdot \sin(\Phi + \theta_o) \quad (9.20)$$

Naklon nateznega polja Φ varira med minimumom $\frac{\theta_o}{2}$ in maksimumom θ_o , njegova vrednost je:

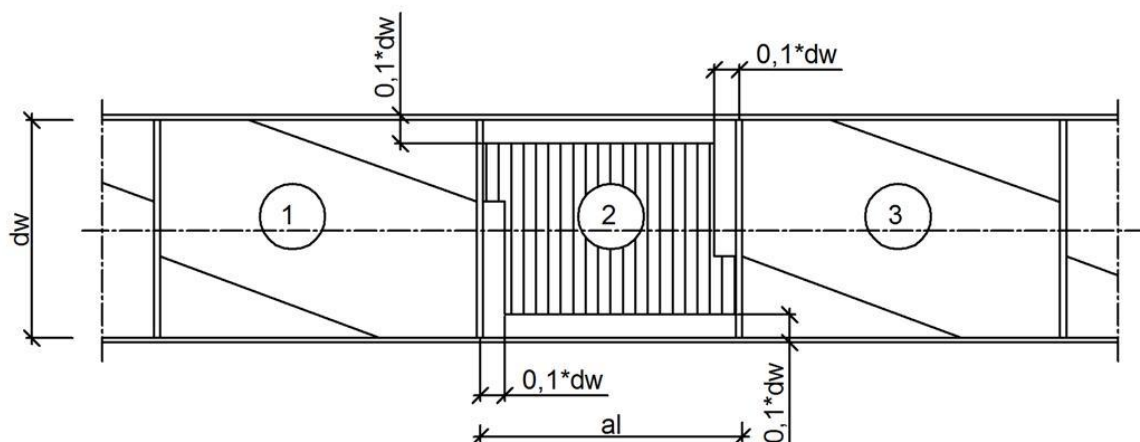
$$\theta_o = \tan^{-1} \left(\frac{h_o}{a_o} \right) \quad (9.21)$$

Velikost dimenzije okrogle odprtine D mora biti manjša, po izrazu (9.19):

$$D \leq d_w \cdot \cos \Phi - a \cdot \sin \Phi \quad (9.22)$$

kjer je:

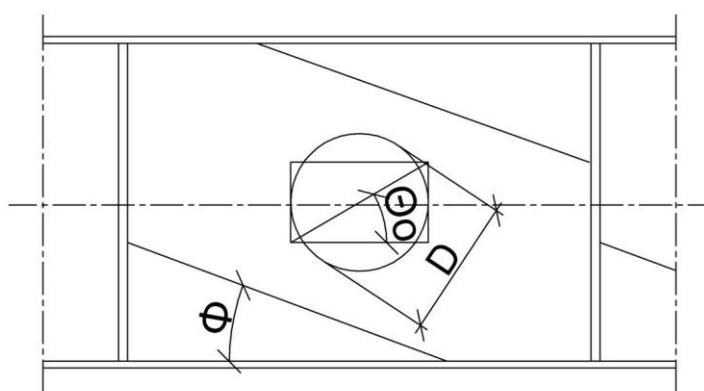
- D dimenzija okrogle odprtine;
- Φ naklon nateznega polja v panelu stojine z odprtino;
- θ_o naklon diagonale v panelu stojine z odprtino.



kjer je :

- a_1 osna razdalja med prečnima ojačitvama;
- 1 področje diagonalnega nateznega polja v sosednjem panelu;
- 2 cona v kateri je dovoljena odprtina;
- 3 področje diagonalnega nateznega polja v sosednjem panelu.

Slika 48.1: Cona v panelu, kjer je dovoljena odprtina
(ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)



Slika 48.2: Enakovreden premer odprtine k pravokotni odprtini
(ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

9.9.1 Strižna nosilnost panela stojine z odprtino

(ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

Projektno strižno nosilnost prereza panela stojine s prečno ojačitvijo $V_{o,Rd}$ se določi z uporabo naslednjih izrazov:

$$V_{o,Rd} = V_{o,bb,Rd} \quad (9.23)$$

vendar mora biti:

$$V_{o,Rd} \leq V_{o,pl,Rd} \quad (9.24)$$

Pri teh pogojih se projektno plastično strižno nosilnost prereza odprtine $V_{o,pl,Rd}$ dobi z enačbami, ki so podane v poglavju 7.4.1 medtem, ko se projektna strižna nosilnost prereza panela stojine z odprtino $V_{o,bb,Rd}$ določi v izrazih, ki so napisani v poglavjema 9.9.1.1 in 9.9.1.2.

9.9.1.1 Določitev projektne strižne nosilnosti panela stojine z odprtino v središču panela stojine

(ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

Pri določitvi projektne strižne nosilnosti panela stojine z odprtino $V_{o,bb,Rd}$ je potrebno upoštevati efekt odprtine locirane v težišču panela na potek polja nateznih napetosti, ki se upošteva po nosilnosti polnega dela stojine proti ukrivljenju zaradi striga po sledečem izrazu:

$$V_{o,bb,Rd} = \frac{[(d_w - D) \cdot t_w \cdot \tau_{bb} + 0,9 \cdot (g - D) \cdot t_w \cdot \sigma_{bb} \cdot \sin \Phi]}{\gamma_{M1}} \quad (9.25)$$

kjer je:

$V_{o,bb,Rd}$ projektna strižna nosilnost prereza panela stojine z odprtino;

g širina nateznega polja;

σ_{bb} napetost v nateznem polju;

τ_{bb} strižna napetost zaradi lokalnega izbočenja.

V izrazu (9.23) se širino nateznega polja g določa po standardu ENV 1993-1-1:1992; po točki 5.4.6.1(3), kot tudi napetost v nateznem polju σ_{bb} , po ENV 1993-1-1:1992; po točki 5.6.4.1(1). Strižno nosilnost zaradi lokalne izbočitve τ_{bb} se določa po ENV 1993-1-1:1992; točka 5.6.4.1(2). Pri določitvi vrednosti σ_{bb} in τ_{bb} ustreza, da se upošteva V_{cr} , ki je dana z izrazom $(d_w - D) \cdot t_w \cdot \tau_{cr}$, kjer se vrednost τ_{cr} dobi z izrazom v ENV 1993-1-1:1992; točka 5.6.3(3).

kjer je:

V_{cr} kritična nosilnost proti strigu;

τ_{cr} enostavna postkritična strižna napetost.

Za določitev naklona nateznega polja Φ se uporabi v enačbi (9.25) za določitev $V_{o,bb,Rd}$ izraz (9.26).

$$\Phi = 0,67 \cdot \left(1 - \frac{D}{d_w}\right) \cdot \theta \quad (9.26)$$

kjer je θ :

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{d_w}{a_l}\right) \quad (9.27)$$

9.9.1.2 Določitev projektne strižne nosilnosti panela stojine z ekscentrično nameščeno odprtino

(ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

Povečan $V_{o,bb,Rd}$ za panel stojine, ki ima ekscentrično nameščeno odprtino se upošteva v izračunu le, če je zadoščeno sledečim kriterijem:

- Dimenzija D ne sme biti večja od $0,3 \cdot d_w$.
- Za osni razmak med prečima ojačitvama a_l mora biti zadoščeno pogoju:

$$1,0 \cdot d_w \leq a_l \leq 1,25 \cdot d_w \quad (9.28)$$

V primeru, da so izpolnjene zahteve za ekscentrično nameščeno odprtino v stojini se izračuna $V_{o,bb,Rd}$ po izrazu:

$$V_{o,bb,Rd} = V_{oc,Rd} + \left(r_e / r_{e,max} \right) \cdot (0.9 \cdot V_{bb,Rd} - V_{oc,Rd}) \quad (9.29)$$

s tem, da:

$$V_{o,bb,Rd} \geq V_{oc,Rd} \quad (9.30)$$

kjer je:

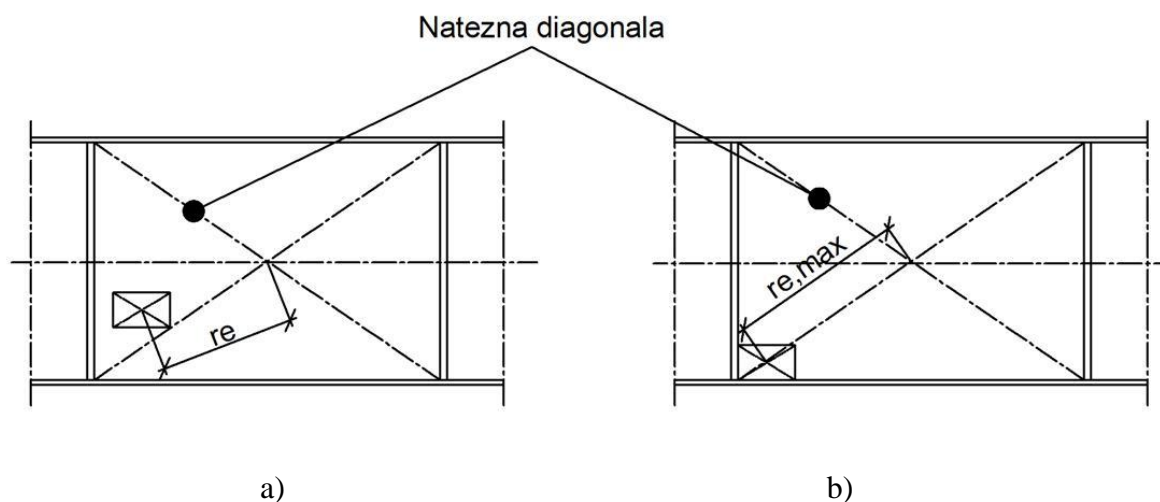
$r_{e,max}$ mera po podobni (teoretični) diagonali, ki predstavlja ekstremni kot v panelu stojine;

r_e razdalja med centrom odprtine in centrom panela, merjena po tlačni diagonali stojine panela;

$V_{oc,Rd}$ vrednost od $V_{o,bb,Rd}$ za podobni panel, vključno z odprtino v središču panela;

$V_{bb,Rd}$ projektna nosilnost stojine pri lokalnem izbočenju.

Razdalja med centrom odprtine in centrom panela r_e je prikazana na Sliki 48.3 a) in razdalja po teoretični diagonali $r_{e,max}$ je prikazana na Sliki 48.3 b). Vrednost $r_{e,max}$ predstavlja ekstremni kot v panelu in se upošteva brez omejitev na Sliki 48.3. b) Projektno nosilnost panela stojine pri lokalnem izbočenju se dobi v standardu ENV 1993:-1-1:1992; točka 5.6.4 (1).



Slika 48.3: Ekscentrično podana odprtina v panelu stojine
(ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

9.9.1.3 Panel stojine z ojačano odprtino

(ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

Za alternativo pri računu se uporabijo enačbe iz poglavja 9.9.1.1 in 9.9.1.2. Panel stojine se mora ojačati zaradi učinka odprtine v stojini v nateznem polju in kritične nosilnosti proti lokalnem izbočenju. Ojačitev v panelu stojine mora zadovoljiti sledečim kriterijem, ki so napisani v nadaljevanju, s tem, da se za $V_{o,bb,Rd}$ v enačbah za račun nosilnosti proti lokalnemu izbočenju vzame na polnem prerezu za $V_{bb,Rd}$, kot je to prikazano v standardu ENV 1993-1-1:1992; točka 5.6.4(1). Projektna plastična strižna nosilnost prereza odprtine $V_{o,pl,Rd}$ se v računu za $V_{o,bb,Rd}$, podana v enačbi (9.23) ne spremeni. Pri vzdolžni ojačitvi ali ojačitvi v obliki obroča se nadomesti efekt odprtine v nateznem polju vzame, kot je to pokazano na Sliki 48.4. Plastični odpornostni moment ojačitve mora zadostiti kriteriju iz enačbe (9.31):

$$M_{pl,r,Rk} \geq M_{r,Sk} \quad (9.31)$$

$$M_{pl,r,Rk} = 0,25 \cdot b_r \cdot d_r^2 \cdot f_{yr} \quad (9.32)$$

Pri tem je notranji moment v ojačitvi je podan z naslednjimi izrazi:

- Za pravokotno odprtino:

$$M_{r,Sk} = \frac{(h_o \cdot \cos \Phi_n + a_o \cdot \sin \Phi_n)^2 \cdot t_w \cdot \sigma_{bb}}{16} \quad (9.33)$$

- Za okroglo odprtino:

$$M_{r,Sk} = \frac{d_o^2 \cdot t_w \cdot \sigma_{bb}}{16} \quad (9.34)$$

kjer je:

$M_{pl,r,Rk}$ projektna plastična odpornost prereza ojačitve na upogib;

$M_{r,Sk}$ projektna vrednost notranjega momenta v ojačitvi;

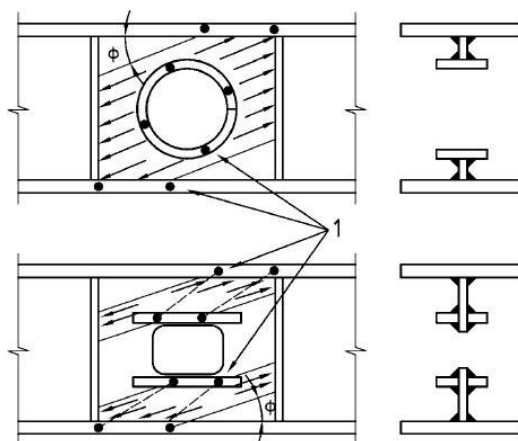
b_r skupna širina ojačitve, vključno z debelino stojine;

d_r višina ojačitve;

σ_{bb} napetost v nateznem polju;

Φ_n naklon nateznega polja za prerez brez odprtine.

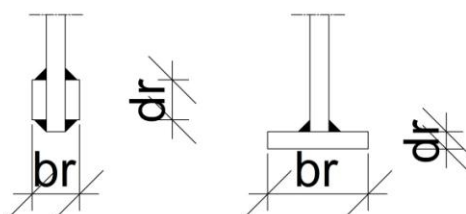
Naklon nateznega polja za prerez brez odprtine se določa po ENV 1993-1-1:1992; točka 5.6.4.2.



kjer je:

1 položaj plastičnih členkov.

Slika 48.4: Model izračuna ojačitve (ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)



Slika 48.5: Dimenzije ojačitev (ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

Dimenzije ojačitev za nadomestni efekt odprtine pri računu kritične nosilnosti proti izbočitvi, (Slika 48.5) mora zadovoljiti sledečim kriterijim:

- Za pravokotne odprtine:

$$\frac{d_r}{d_w} \cdot \left(\frac{b_r}{t_w}\right)^2 \cdot \sqrt{\frac{d_w \cdot a_r}{h_o \cdot a_o}} \geq 2,76 \quad (9.35)$$

- Za okrogle odprtine:

$$\left(1 - \frac{1,5 \cdot d_o}{\sqrt{a_r^2 + d_w^2}}\right) \cdot \left[1 + \frac{6 \cdot d_r}{d_w} \cdot \left(\frac{b_r}{t_w}\right)^2 \cdot \sqrt{\frac{d_o}{\sqrt{a_r^2 + d_w^2}}}\right] \geq 1,0 \quad (9.36)$$

Pri pravokotnih odprtinah mora biti vzdolžna ojačitev pravilno sidrana izven konca odprtine. Poleg štirih meril, podanih v enačbah (9.15), (9.16), (9.17) in (9.18), mora ojačitev izpolnjevati naslednji kriterij za dolžino sidranja:

$$l_v \geq 0,5 \cdot (\sqrt{a_o^2 + h_o^2} - a_o) \quad (9.37)$$

Pri računu zvarov se pri pravokotnih odprtinah zware računa tako, da ojačitev prenese projektno osno silo $F_{r,Ed}$, ki deluje enako kot projektna osna nosilnost $F_{r,Rd}$. Medtem se pri okroglih odprtinah projektna nosilnost na enoto ojačitve $F_{w,Rd}$ ENV 1993-1-1:1992; točka 6.6.5.3(3), izračunajo, da ustrezajo kriteriju:

$$F_{w,Rd} \geq t_w \cdot \sigma_{bb} \quad (9.38)$$

kjer je:

$F_{r,Ed}$ projektna osna sila v ojačitvi;

$F_{r,Rd}$ projektna osna nosilnost ojačitve;

$F_{w,Rd}$ projektna osna nosilnost na enoto ojačitve;

9.9.2 Kontrola momenta nosilnosti za stojino z odprtino

(ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N)

Pri projektni upogibni nosilnosti momenta za stojino z prečno ojačitvijo $M_{o,Rd}$ se upošteva prečno silo V_{Ed} , ki delujejo v tej točki odprtine kot:

$$M_{o,Rd} = M_{f,Rd} + (M_{o,pl,Rd} - M_{f,Rd}) \cdot \left(1 - \frac{V_{Ed}}{V_{o,Rd}}\right) \quad (9.39)$$

kjer je:

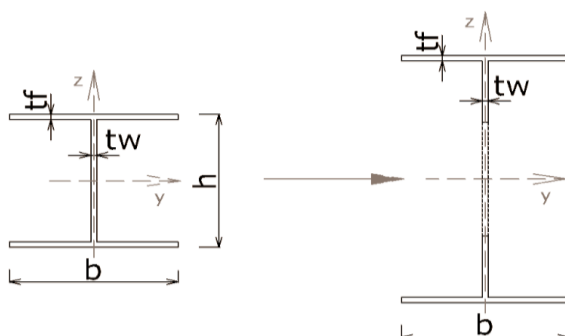
$M_{f,Rd}$ projektna plastična upogibna nosilnost prereza samo iz ene ojačitve;

$M_{o,pl,Rd}$ projektna plastična upogibna nosilnost prereza z odprtino.

10 NOSILNOST ELEMENTOV

10.1 Splošno o bočni zvrnitvi nosilcev z odprtinami

Račun satastih nosilcev in nosilcev z odprtinami na bočno zvrnitev se dela na isti način, kot pri polnostenskih nosilcih. Pri tem pa se mora upoštevati geometrijske karakteristike in statične karakteristike prečnega prereza na mestu odprtine. Nosilnost nosilcev z odprtinami proti bočni zvrnitvi je problem zaradi nekonstantnosti prečnega prereza na mestu odprtine preko celotne dolžine nosilca. Zaradi povečane višine satasti nosilci (Slika 49) omogočajo večje vztrajnostne momente okoli močne osi I_y . Vztrajnostni moment okoli šibke osi I_z je isti kot pri izvornem profilu, če je prečni prerez simetričen. Prisotnost odprtin zmanjšuje vztrajnostni moment za neovirano torzijo prereza I_T , povečuje pa se vztrajnostni moment za ovirano torzijo I_w .



Slika 49: Prečni prerez satastega nosilca

Na bočno zvrnitev upogibo obremenjenih nosilcev z odprtinami vplivajo:

- Oblika prečnega prereza.
- Kontinuirnost podpor.
- Prisotnost ojačitev na kritičnih mestih upogiba.
- Lastnosti materiala.
- Interakcije lokalne in celotne izbočitve.
- Nezveznosti prereza zaradi prisotnosti odprtin.
- Začetna geometrijska nepopolnost in izbočne sile.
- Obseg in pristnost zaostalih napetosti.

10.2 Nosilnost na bočno zvrnitev nosilcev z odprtini

Kontroli nosilnosti na bočno zvrnitev satastih nosilcev in nosilcev z lokalnimi odprtini morajo zadovoljiti z enačbami iz (Tkačević in sod., 2006b):

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (10.0)$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_{o,y} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = \chi_{LT,mod} \cdot W_{o,y} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (10.1)$$

kjer je:

$W_{o,y}$ elastični ali plastični odpornostni moment na sredini širine odprtine nosilca z odprtino;

χ_{LT} redukcijski faktor pri bočni zvrnitvi;

$M_{b,Rd}$ projektna upogibna nosilnost pri bočni zvrnitvi;

$\chi_{LT,mod}$ prilagojen redukcijski faktor bočne zvrnitve;

10.3 Izbira uklonske krivulje za bočno zvrnitev nosilcev z odprtini

Uklonska krivulja je odvisna od tipa profila in razmerja med višino profila in širino pasnice. Pri satastih nosilcih se variro polni deli stojin med odprtini, kar pomeni po eni strani, da bi se lahko prištevali k varjenim nosilcem. Pri satastih nosilcih ima mesto varjenja drugačne učinke kot pri polnostenskih I profilih, ki so varjeni skupaj. Problem bočne zvrnitve je tudi v večjih napetostih, kot pri polnostenskih prerezih. Geometrijske imperfekcije so zaradi načina izdelave satastih profilov večje, kot pri valjanih profilih in so bližje imperfekcijam varjenih I profilov.

Redukcijski faktor χ_{LT} se izračuna po izrazu:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq \begin{cases} \chi_{LT} \leq 1,0 \\ \chi_{LT} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{cases} \quad (10.2)$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \cdot [1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (10.3)$$

Vrednosti parametrov za vročevaljane in varjene prereze:

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \quad (10.4)$$

$$\beta = 0,75 \quad (10.5)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{0,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} \quad (10.6)$$

Elastični kritični moment za bočno zvrnitev M_{cr} za enojnosimetrične prereze nosilce z odprtini in za sataste nosilce se izračuna po:

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k \cdot L_c)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \cdot L_c)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}} + [C_2 \cdot z_g]^2 - [C_2 \cdot z_g] \right] \quad (10.7)$$

Rezultati M_{cr} so zelo občutljivi na faktorja k in k_w .

Faktor nepopolnosti α_{LT} se dobi v standardu SIST EN 1993-1-1:2005; Preglednica 6.3 in je odvisen od tipa in geometrijskih karakteristik prečnega prereza.

$$\bar{\lambda}_{LT} \leq \bar{\lambda}_{LT,0} \quad (10.8)$$

$$\chi_{LT,mod,1} = \frac{\chi_{LT}}{f} \quad (10.9)$$

$$\chi_{LT,mod,2} \leq 1,0 \quad (10.10)$$

$$\chi_{LT,mod} = \min(\chi_{LT,mod,1}, \chi_{LT,mod,2}) \quad (10.11)$$

$$f_1 \leq 1,0 \quad (10.12)$$

$$f_2 \leq 1 - 0,5 \cdot (1 - k_c) \cdot \left[1 - 2 \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2\right] \quad (10.13)$$

$$f = \min(f_1, f_2) \quad (10.14)$$

kjer je:

Φ_{LT} pomožna količina za določanje χ_{LT} ;

$\bar{\lambda}_{LT}$ relativna vitkost pri bočni zvrnitvi;

α_{LT} faktor nepopolnosti;

M_{cr} elastični kritični moment bočne zvrnitve;

C_1 koeficient oblike momentne linije;

C_2 koeficient oblike momentne linije;

- L_c sistemska dolžina elementa;
- I_z vztrajostni moment okoli šibke osi;
- k koeficient uklonske dolžine elementa za uklon okoli šibke osi;
- k_w koeficient uklonske dolžine elementa glede na robe pogoje;
- I_w vzbočitveni torzijski vztrajnostni moment;
- I_t torzijski vztrajnostni moment pri neovirani torziji;
- $\bar{\lambda}_{LT,0}$ dolžina platoja uklonske krivulje pri bočni zvrnitvivočevaljanih prerezov;
- β koleracijski faktor uklonske krivulje pri bočni zvrnitvi vročevaljanih prerezov;
- f faktor poteka upogibnega momenta pri računu $\chi_{LT,mod}$;
- k_c koleracijski faktor za potek upogibnega momenta;

Raziskave satastih nosilcev glede na bočno zvrnitev so pokazale:

(Tkačević in sod., 2006b)

- za sataste nosilce s $h_n/b > 2$ se vzame uklonska krivulja c;
- za sataste nosilce s $h_n/b \leq 2$ se vzame uklonska krivulja b.

Raziskave nosilcev z odprtini glede na bočno zvrnitev so pokazale:

(Feldmann in sod., 2006d)

- za nosilce z odprtini s $h/b > 2$ se vzame uklonska krivulja b;
- za nosilce z odprtini s $h/b \leq 2$ se vzame uklonska krivulja c.

11 KONTROLA VNOSA KONCENTRIRANE SILE

11.1 Kontrola vnosa koncentrirane sile pri nosilcih z odprtinami

Nosilnost stojine s prečnimi ojačitvami, ki je obremenjena s koncentrirano obtežbo, ki se prenaša preko pasnic na stojino, se preverja z metodo iz ENV 1993-1-1:1992; po točki 5.7 s tem, da se koncentrirana obtežba ne uporablja v območju cone vpliva a_z . Prečno ojačitev je potrebno zagotoviti zaradi podporne reakcije ali drugih pomembnih koncentriranih sil. Poleg tega je potrebno upoštevati efektivno širino odprtine v stojini s prečnimi ojačitvami po ENV 1993-1-1:1992; točka 5.7.6(1). V primeru, da so še druge prečne sile na območju cone vpliva se analizira kot vitek prerez stojine panela med prečnimi ojačitvami.

11.2 Kontrola vnosa koncentrirane sile pri satastih nosilcih

Satasti nosilci niso ugodni za vnos koncentriranih sil v področje odprtin brez dodatnih konstrukcijskih zahtev. Če je stojina obremenjena z enolično porazdeljeno obremenitvijo, nastane potreba po dokazu za vnos koncentrirane sile na mestu podpore. Nosilnost nosilca z več enakomerno porazdeljenimi odprtinami, če je obremenjen s koncentrirano obtežbo se dokazuje po ENV 1993-1-1:1992; točka 5.7 pod pogojem, da je obremenitev na območju cone vpliva a_z , iz poglavja 7.3. Zaradi vnosa reakcije ali druge koncentrirane obremenitve na območju a_z v stojino je potrebno zagotoviti prečno ojačitev. Pri računu uklonske nosilnosti v področju sodelujoče širine stojine na območju prečnih ojačitev po ENV 1993-1-1:1992; točka 5.7.6(1) ne sme preseči širine odprtine v stojini. V primeru, da je nanešenih več prečnih sil satasti nosilec, se mora pri računu upoštevati napetosti v polnem delu stojine.

12 KONTROLA POMIKOV NOSILCEV Z ODPRTINAMI

12.1 Kontrola pomikov nosilcev z odprtinami

(Feldmann in sod., 2006d)

Pri kontroli vertikalnega pomika nosilca z enojno odprtino ali posameznimi odprtinami, se deformacijam upogiba nosilca brez odprtin doda dodatne deformacije z upoštevanjem odprtin.

Pri določitvi dodatnih deformacij z upoštevanjem odprtin se doda k izračunu:

- Efekt globalnega povesa z upoštevanjem odprtin v prerezu.
- Efekt deformacij zaradi lokalnega upogiba T prereza.
- Efekt deformacij zaradi prečnih sil v T prerezu.

Celotni upogibek nosilca brez odprtin se naredi, po standardu SIST EN 1990:2004 po enačbi:

$$\delta_{tot} = \delta_1 + \delta_2 \quad (12.0)$$

kjer je:

δ_{tot} celotni upogibek, kot vsota δ_1 in δ_2 ;

δ_1 upogibek zaradi stalne obtežbe;

δ_2 upogibek zaradi spremenljive obtežbe;

Za dodatne upogibke pri lokalni enojni odprtini v nosilcu v poziciji odprtine na x je dana enačba:

$$\frac{\delta_{add}}{\delta_{tot}} = k_o \cdot \left(\frac{a_o}{L}\right) \cdot \left(\frac{h_o}{L}\right) \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right), \text{ za pozicijo odprtine } x \leq 0,5 \cdot L \quad (12.1)$$

Za dodatne upogibke pri posameznih odprtinah je dana enačba:

$$\frac{\delta_{add}}{\delta_{tot}} = 0,5 \cdot n_o \cdot k_o \cdot \left(\frac{a_o}{L}\right) \cdot \left(\frac{h_o}{L}\right) \quad (12.2)$$

kjer je:

L razpon nosilca;

x osna oddaljenost središča odprtine od koordinatnega izhodišča;

n_o število odprtin vzdolž nosilca.

Za vrednost koeficienta k_o se v izrazih (12.1) in (12.2) vzame:

- $k_o = 2,0$ za neojačano odprtino;
- $k_o = 1,5$ za ojačano odprtino.

Pri večih odprtinah se vzame v izrazu (12.2) faktor 0.5, ki predstavlja kombinaciji efekta porazdelitve momenta in striga vzdolž nosilca.

Za celotni upogibek se izračuna po izrazu:

$$\delta_{max} = \delta_{tot} + \delta_{add}$$

kjer je:

δ_{max} končni upogibek z upoštevanjem odprtin;

δ_{add} dodatni upogibek zaradi odprtin.

12.2 Kontrola pomikov satastih nosilcev

12.2.1 Splošno o kontroli pomikov na satastih nosilcih

Kontrolo pomikov satastih nosilcev se dela po istem principu kot pri polnostenskih nosilcih. V izrazu za upogibek satastega nosilca se upošteva odpornostni moment prečenega prereza na mestu odprtine. Pri določanju dodatnih deformacij satastega nosilca z odprtinami se upošteva:

- Efekt upogibnih deformacij prereza z odprtino.
- Efekt upogibnih deformacij z T prerezov nad in pod odprtino.
- Efekt upogibnih deformacij polnega dela stojine.
- Efekt strižnih deformacij T prerezov nad in pod odprtino.
- Efekt strižnih deformacij polnega dela stojine.

Pri določanju pomikov se točni račun se naredi na Vierendeelovemu nosilcu.

12.2.2 Kontrola pomikov s pomočjo virtualnega dela

(Kržič, 1994)

Pri računu upogibkov se upošteva vse obremenitve palic prereza SN z enačbo virtualnega dela:

$$\delta = \int \frac{N \cdot N^v}{E \cdot A} \cdot dx + \int \kappa \cdot \frac{Q \cdot Q^v}{G \cdot A} \cdot dx + \int \frac{M \cdot M^v}{E \cdot I} \cdot dx \quad (12.2)$$

kjer je:

δ virtualno delo;

N osna sila;

N^v virtualna osna sila;

E elastični modul;

A površina prečnega prereza;

Q prečna sila;

Q^v virtualna prečna sila;

M upogibni moment;

M^v virtualni upogibni moment;

I vztrajnostni moment;

G strižni modul;

$\kappa = \frac{A_p}{A_s}$ faktor vpliva strižnih sil na deformacije za pasove;

$\kappa = 1$ faktor vpliva strižnih sil na deformacije za vertikale.

12.2.3 Analitični model za določanje upogibkov pri satastih nosilcih z dolgimi razponi

(Raftoyiannis in sod., 2006)

V SIST EN 1993-1-1:2005 ni pravil za določanje upogibkov satastih nosilcev. V nadaljevanju je prikazan analitični model za račun upogibkov SN ima dolžino razpona L . Celotni upogibek $\delta_{max,SN}$ se računa z upoštevanjem vpliva čistega upogiba $\delta_{b,max}$ in vpliva strižne akcije $\delta_{s,i}$ po:

$$\delta_{max,SN} = \delta_{b,max} + \delta_{s,i} = k_1 \cdot \frac{P_{Ed} \cdot L^3}{E \cdot I_{eff}} + k_2 \cdot \frac{P_{Ed} \cdot L}{G \cdot A_{eff}} \quad (12.3)$$

kjer je:

- $\delta_{max,SN}$ celotni upogibek satastega nosilca;
 $\delta_{b,max}$ upogibek z upoštevanjem akcije momenta;
 $\delta_{s,i}$ upogibek z upoštevanjem akcije prečne sile;
 P_{Ed} projektna vrednost točkovne obtežbe na satastemu nosilcu;
 k_1 porazdelitveni faktor odvisen od tipa obtežbe in podpornih pogojev;
 k_2 porazdelitveni faktor odvisen od tipa obtežbe in podpornih pogojev;
 I_{eff} efektivni vztrajnostni moment na mestu odprtine, prerez 1-1, Slika 31;
 A_{eff} efektivna strižna površina.

Za upogibek $\delta_{b,max}$ za prostoležeči nosilec se upošteva:

$$\delta_{b,max} = \frac{5 \cdot q_{Ed} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_{eff}} \quad (12.4)$$

$$I_{eff} = \frac{1}{12} \cdot t_w \cdot h_n^3 + \frac{1}{2} \cdot b \cdot t_f \cdot h_n^2 - \frac{1}{24} \cdot t_w \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot h_n\right)^2 \quad (12.5)$$

Za sataste nosilce z n odprtini je vertikalni upogibek i -te odprtine zaradi strižne akcije enak:

$$\delta_{s,i} = \frac{p}{G \cdot A_{eff}} \sum_{j=1}^i V_j \quad (12.6)$$

z strižno trdnostjo:

$$G \cdot A_{eff} = \frac{3 \cdot E \cdot I_m \cdot p}{c^3} \quad (12.7)$$

$$c = \frac{3}{8} \cdot p \quad (12.8)$$

kjer je:

- q_{Ed} projektna vrednost enakovredne porazdeljene obtežbe na osni razdalji med odprtini
 p ;
 V_j vrednost prečne sile na diagramu notranjih sil, ki ustreza centru odprtine;

A_{eff} efektivna strižna površina na mestu odprtine;

I_m vztrajnostni moment vsakega T prereza.

Uporaba analitičnega modela za račun upogibkov:

- Pristop za račun upogibkov za sataste nosilce je enostaven.
- Metoda za račun upogibkov je primerna le za račun upogibkov na posameznih nosilcih z daljšim razponom in ne za nosilce, ki imajo kratke razpone ali pa so kontinuirano podprti.
- Metoda je uporabna za koncentrirano ali zvezno porazdeljeno linijsko obtežbo.
- Analitična rešitev te metode temelji na principu Vierendeelovega nosilca.
- Upogibek zaradi prečnih sil je vzet iz porazdelitve prečnih sil na nosilcu.
- Ta metoda je dobra za sataste nosilce z različnimi geometrijskimi in obtežbenimi karakteristikami.

12.3 Naravna frekvenca

(Feldmann in sod., 2006d)

Naravna frekvenca nosilcev z odprtinami in satastih nosilcev se računa z naslednjo aproksimacijo:

$$f = \frac{18}{\sqrt{\delta_{tot}}} [Hz] \quad (12.9)$$

13 PROGRAM ACEGIRDER

13.1 Predstavitev programa AceGirder

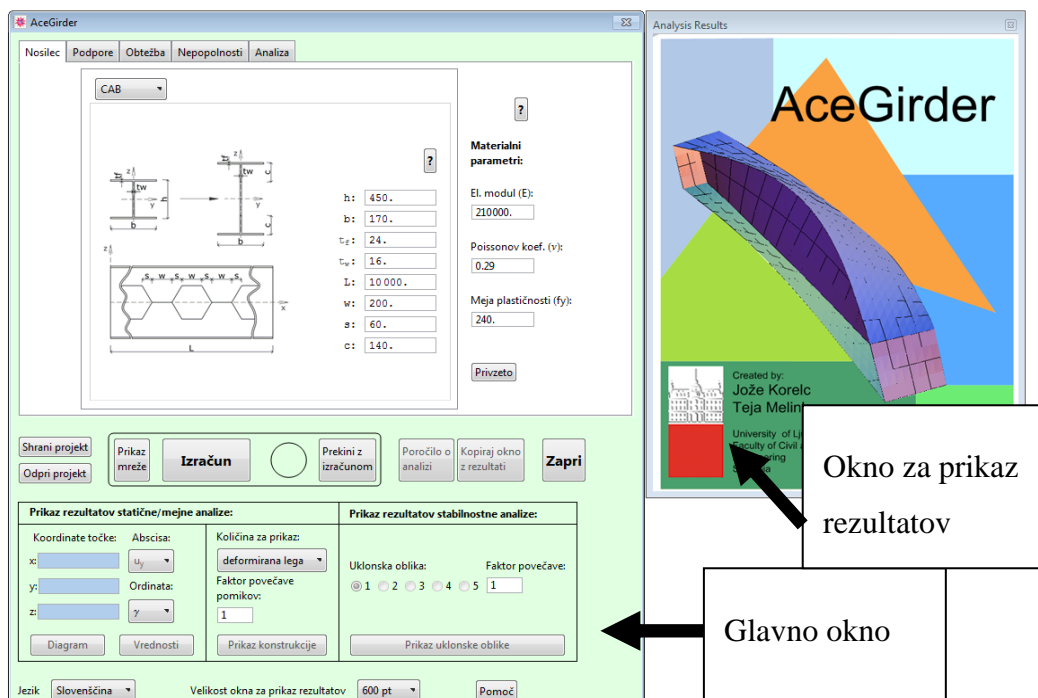
AceGirder je računalniški program, ki se uporablja za 3D numerično analizo izoliranih nosilcev. Z njim se dela analiza idealnih ali geometrijsko nepopolnih nosilcev s poljubnimi robnimi pogoji in različnimi obtežbami. Program je namenjen analizi jeklenih nosilcev brez odprtin in z njimi. Nosilec z ali brez odprtin je modeliran in analiziran po metodi končnih elementov, za diskretizacijo so uporabljeni lupinasti elementi.

V programu je mogoče izbirati med naslednjimi analizami:

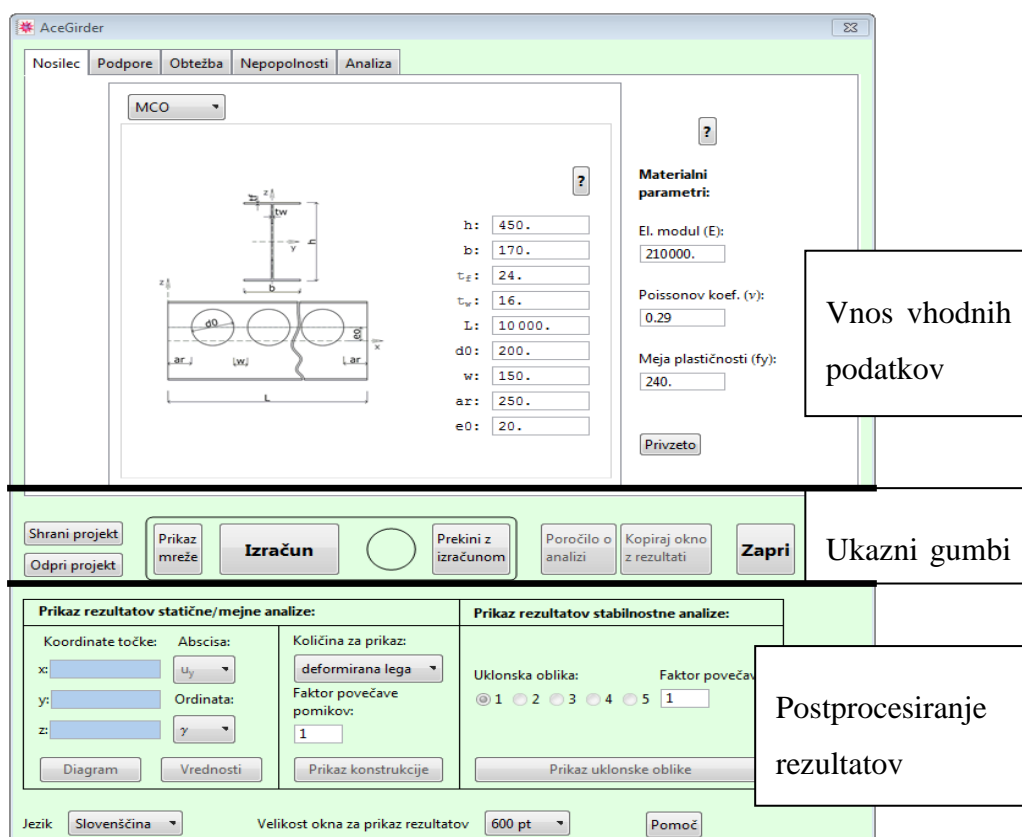
- Stabilnostna analiza, kjer je rezultat kritični obtežni faktor z grafičnim prikazom pripadajočih uklonskih oblik.
- Analiza mejnega stanja nosilnosti, kjer je rezultat mejni obtežni faktor in grafični prikazi pomikov, zasukov, napetosti in deformacij ter izpis mejnih vrednosti.
- Statična analiza pri dani obtežbi, kjer je rezultat kritični obtežni faktor, analitični kritični moment za bočno zvrnitev.

13.2 Uporaba programa AceGirder

Po zagonu AceGirderja se odpreta glavno okno ter okno za prikaz rezultatov (Slika 50). Glavno okno (Slika 51) je razdeljeno na "zgornji del" z zavihki, kjer se vnašajo vhodni podatki, "srednji del" z ukaznimi gumbi, kjer se požene analiza ter na "spodnji del", ki omogoča postprocesiranje rezultatov.



Slika 50: Program AceGirder



Slika 51: Razdelitev glavnega okna programa AceGirder

13.3 Vnos vhodnih podatkov

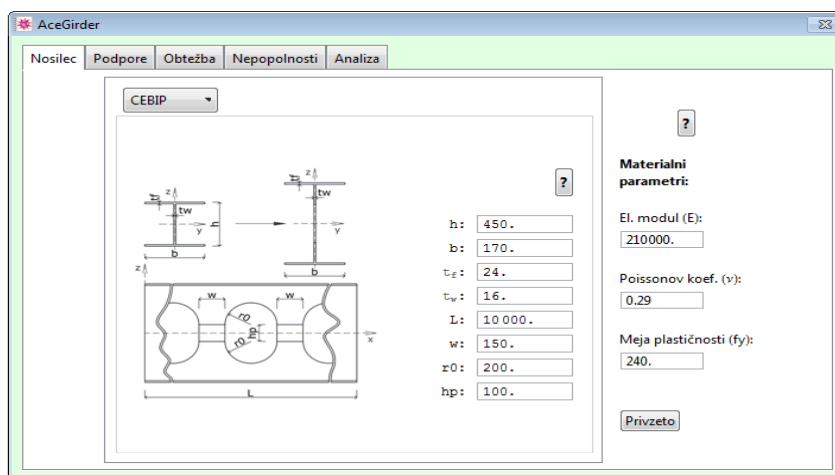
13.3.1 Splošno

V ta del uporabnik vnese vhodne podatke po zavihkih:

- Nosilec (geometrija in dimenzije prereza, materialne lastnosti);
- Podpore (podpore na obeh krajiščih nosilca);
- Obtežba;
- Nepopolnosti (izračun morebitnih začetnih geometrijskih nepopolnosti);
- Analiza (izbira želene analize, formulacije elementa, parametrov inkrementne rešitve in mreže končnih elementov).

13.3.2 Zavihek nosilec

V zavihku "Nosilec" (Slika 52) se vnesejo geometrijske lastnosti profila, glede na izbrano vrsto prereza z odprtinami ali brez njih. V vnosna polja se vnašajo podatki, ki so na skici poleg vnosnega polja. V primeru nejasnosti pri opisu profilov, vnosu obtežbe,... lahko uporabnik klikne na gumb za pomoč "?".

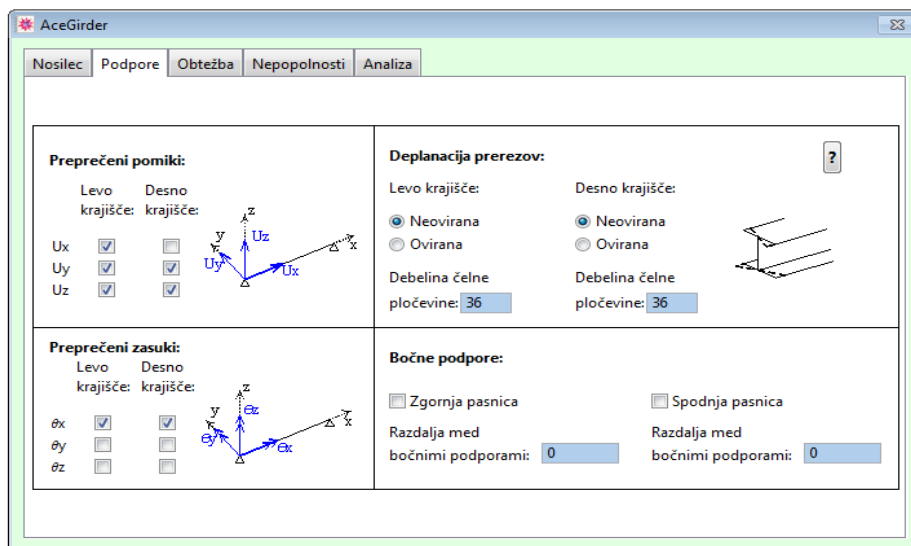


Slika 52: Zavihek nosilec v programu AceGirder

Za izbran profil se poleg geometrijskih podatkov vnesejo materialni podatki, kot so elastični modul, Poissonov količnik in meja plastičnosti. Uporabniku je omogočeno tudi, da s klikom na gumb "Privzeto" povrnejo privzete vrednosti.

13.3.3 Podpore

V zavihku "Podpore" (Slika 53) uporabnik vnaša robne pogoje in s tem omogoči ali prepreči pomike oziroma zasuke.



Slika 53: Zavihek podpore v programu AceGirder

Program omogoča, da se lahko deplanacijo prereza v krajiščih nosilca upošteva ali ne. Uporabnik ima naslednje možnosti izbire deplanacij:

- neovirana deplanacija;
- ovirana deplanacija, pri čemer se mora podati debelina čelne pločevine.

V zavihku "Podpore" je uporabniku omogočeno, da vključi v nosilec bočne podpore.

13.3.4 Obtežba

V zavihku "Obtežba" (Slika 54) je obtežba razdeljena v 4 kategorije: osna sila, moment v krajiščih nosilca, točkovne sile in zvezne sile. Pred vsako vrsto obtežbe se nahaja kvadratak, v katerem uporabnik označi ali posamezna vrsta ali skupina sil deluje na nosilec. Pri tem, ko se obkljukajo kvadratki, se za izbrane sile vrednosti nastavijo na 0.

- **Osna sila**

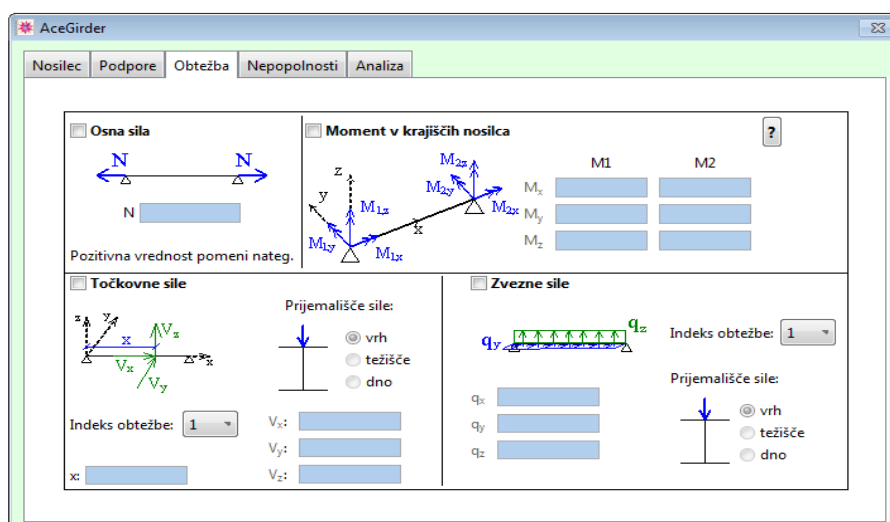
V polje se vpiše osno silo, ki deluje na nosilec v obeh krajiščih. Pozitivna vrednost osne sile pomeni nateg.

- **Moment v krajiščih nosilca**

V polja se vpiše momente, ki delujejo v krajiščih nosilca. Kot prikazuje slika, predstavlja M_1 moment v levem, M_2 pa moment v desnem krajišču nosilca. Pozitiven predznak pomeni, da moment deluje v pozitivni smeri okrog izbrane koordinatne osi.

- **Točkovne sile**

Na prerez lahko uporabnik poda do 5 točkovnih sil. Za vsako točkovno silo se v polje vpiše komponente točkovne sile vzdolž vseh treh koordinatnih osi ter prijemašče sile.



Slika 54: Zavihek obtežba v programu AceGirder

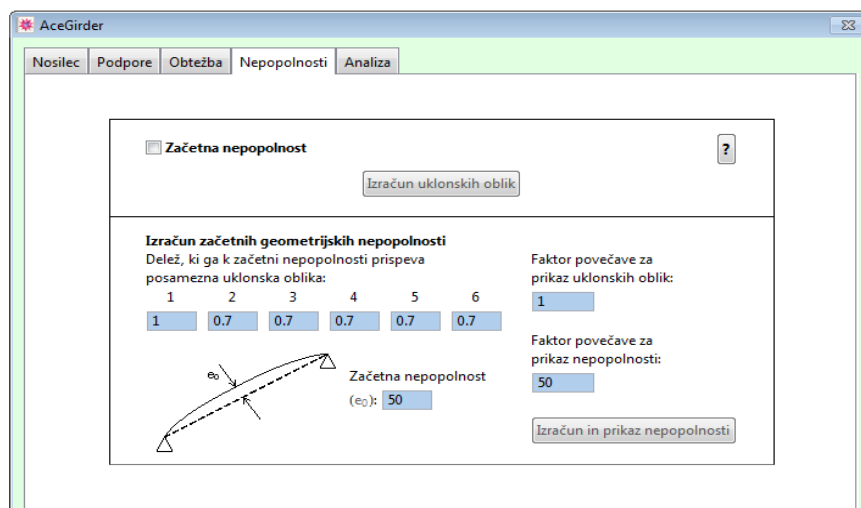
- **Zvezne sile**

V polja se vpiše zvezne sile in njihova prijemašča, ki delujejo enakomerno vzdolž celotne dolžine nosilca. Možno je podati do 5 zveznih sil. Za vsako se poda komponente sile vzdolž vseh treh koordinatnih osi. Pozitiven predznak pomeni, da sila deluje v pozitivni smeri koordinatne osi.

Koordinate točk v kateri deluje obtežba v smeri x od koordinatnega izhodišča na levi strani. Prijemašče sile pri satastih nosilcih in nosilcih z odprtinami je možno le na vrhu

in dnu prereza in ne v njegovem težišču. Pozitivna vrednost sile deluje v pozitivni smeri koordinatne osi.

13.3.5 Nepopolnosti



Slika 55: Zavihek nepopolnosti v programu AceGirder

V zavihku "Nepopolnosti" (Slika 55) v primeru analize mejnega stanja nosilnosti se lahko upošteva začetne nepopolnosti, če jih uporabnik obkljuka in po pritisku na gumb "Izračun uklonskih oblik" se izračuna prvih 6 uklonskih oblik.

Izračun začetnih geometrijskih nepopolnosti

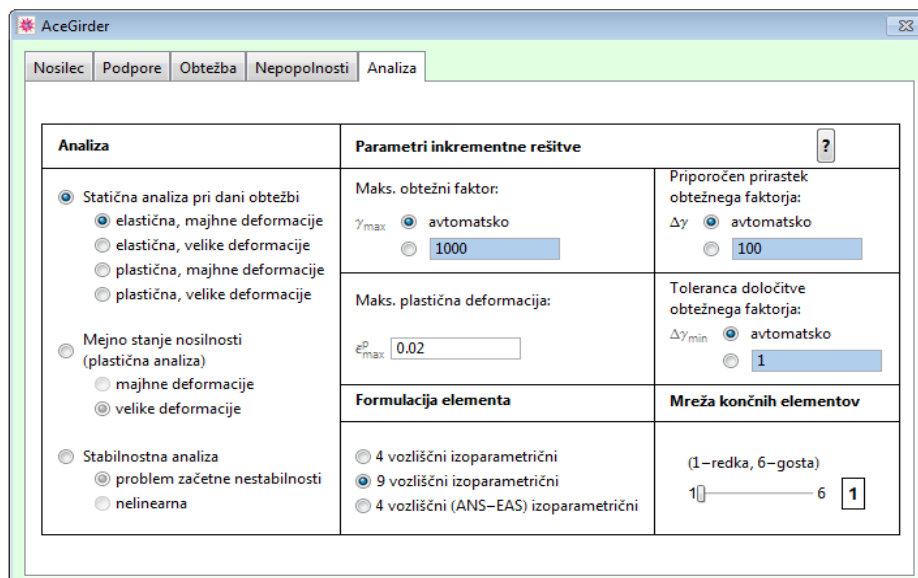
V ustrezna polja se poda prispevek posamezne uklonske oblike k začetni geometrijski nepopolnosti. Začetna nepopolnost se izračuna tako, da je največji odmik nosilca od njegove idealne lege enak vrednosti e_0 , ki jo glede na tip nosilca in obtežbo določa Evrokod. Za prikaz posameznih uklonskih oblik se poda poljuben faktor povečave. Izračun in prikaz začetnih geometrijskih nepopolnosti se izvede s pritiskom na gumb. V zgornjem delu okna za prikaz rezultatov se prikaže prvih 6 uklonskih oblik, pod njimi pa izračunane začetne nepopolnosti. Pred izračunom začetnih nepopolnosti je potrebno izračunati uklonske oblike.

13.3.6 Analiza

V zavihku "Analiza" (Slika 56) je pri analizi je možno izbirati med:

- statično analizo pri dani obtežbi;

- analizo mejnega stanja nosilnosti;
- stabilnostno analizo.



Slika 56: Zavihek analiza v programu AceGirder

Pri statični analizi pri dani obtežbi je možno izbirati kako se naj analiza izvede:

- teorija majhnih deformacij ob elastičnem materialu;
- teorija velikih deformacij ob elastičnem materialu;
- teorija majhnih deformacij ob elasto-plastičnem materialu;
- teorija velikih deformacij ob elasto-plastičnem materialu.

Pri analizi mejnega stanja nosilnosti je material elasto-plastičen, možno izbirati med analizami:

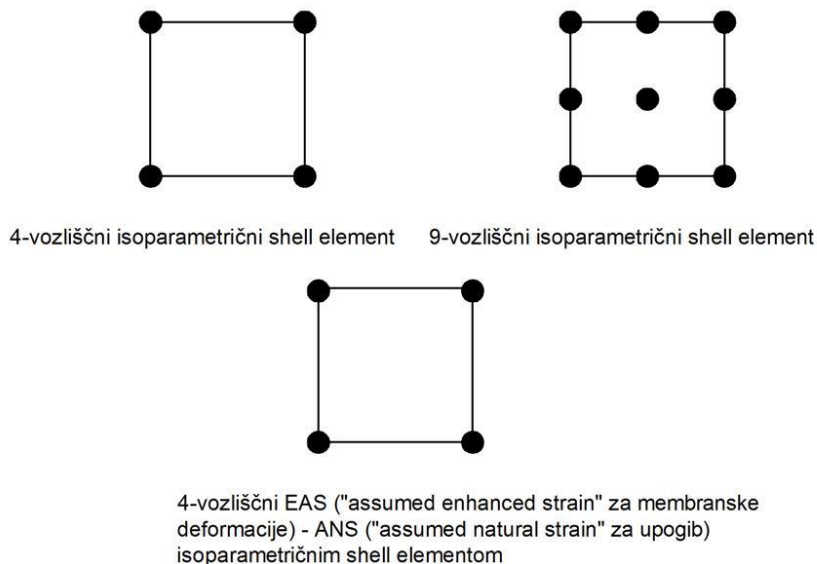
- teorija majhnih deformacij;
- teorija velikih deformacij.

Pri stabilnostni analizi je material elastičen, dodatno je možno izbirati med:

- reševanjem problema začetne nestabilnosti;
- nelinearna stabilnostna analiza.

13.3.6.1 Formulacija elementa

Pri formulaciji elementa (Slika 57) je možno je izbrati med:



Slika 57: Topologija in oblikovanje končnih elementov

13.3.6.2 Parametri inkrementne rešitve

Pri parametrih inkrementne rešitve se poda:

- Maksimalen obtežni faktor.
- Priporočen prirastek obtežnega faktorja, ki je uporabljen v prvem koraku Newton-Raphsonove metode. Toleranca določitve obtežnega faktorja to je minimalni prirastek obtežnega faktorja za posamezen korak.
- Maksimalna dopustna plastična deformacija.

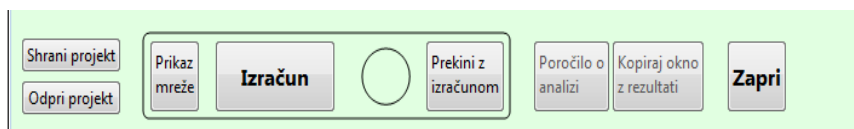
Parametri inkrementne rešitve se ne upoštevajo pri stabilnostni analizi z reševanjem problema začetne nestabilnosti. Pri statični analizi pri dani obtežbi se, ne glede na vpisane vrednosti v polja, upoštevajo avtomatsko nastavljene vrednosti, razen maksimalne plastične deformacije.

13.3.6.3 Mreža končnih elementov

Izbirati je možno med 6 različnimi gostotami mreže končnih elementov.

13.4 Ukazni gumbi za analizo

Tu se nahajajo ukazni gumbi za poganjanje ali prekinitev analize ter za shranjevanje in odpiranje pognanih analiz in zapiranje programa (Slika 58).



Slika 58: Ukazni gumbi v programu AceGirder

- **Shrani/odpri projekt**

Uporabniku je omogočeno shraniti delo z pritiskom na gumb "Shrani projekt", kjer se shranijo vhodni podatki in rezultati trenutnega projekta. Shranjene projekte lahko uporabnik ponovno odpre s pritiskom na gumb "Odpri projekt".

- **Prikaz mreže**

Ob pritisku na gumb "Prikaz mreže" se v oknu za prikaz rezultatov pojavi skica izbranega nosilca z ali brez odprtin, ki je razdeljen z mrežo končnih elementov.

- **Izračun**

Ob pritisku na gumb "Izračun" se izvrši izbrana analiza nosilca. Za prekinitev analize lahko uporabnik pritisne na gumb "Prekini z izračunom".

- **Poročilo o analizi**

Ob pritisku na gumb "Poročilo o analizi" se v oknu za prikaz rezultatov izpišejo vhodni podatki in parametri ter rezultati analize.

- **Kopiraj okno z rezultati**

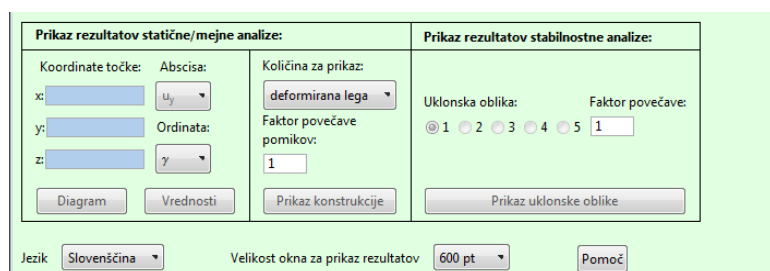
Ob pritisku gumba "Kopiraj okno z rezultati" se v novo okno kopira vsebina okna z rezultati. Z oknom se nato lahko upravlja kot z običajnim oknom v Mathematici.

- **Zapri**

S pritiskom na gumb "Zapri" se zapre program AceGirder.

13.5 Postprocesiranje rezultatov

V tem predelu se nahajajo gumbi in polja prikaz diagramov zelenih izračunanih količin (Slika 59).



Slika 59: Gumbi za postprocesiranje v programu AceGirder

Prikaz rezultatov statične ali mejne analize

V tem predelu se izbere parametre za grafičen prikaz rezultatov analize mejnega stanja. Uporabniku je omogočeno, da v polja vpiše koordinate točk v katerih naj se izriše diagram. Pri izrisu obtežnega diagrama se lahko izpišejo vrednosti, če uporabnik to želi vedeti.

Prikaz rezultatov stabilnostne analize

Uporabniku je mogočeno, da lahko izbira uklonsko obliko krivulje, pri prikazu se izpiše tudi pripadajoči obtežni faktor. V programu je omogočeno uporabniku tudi izbira jezika. Izbira se med angleščino in slovenščino. Velikost okna za prikaz rezultatov je možno povečevati ali pomanjševati z izbiro ukaza, ki se nahaja med oknom gumbom za izbiro jezika in pomočjo.

13.6 Nosilec z odprtini

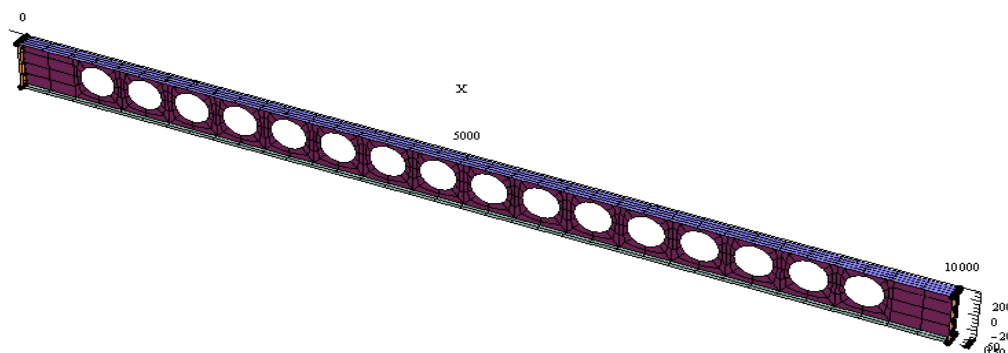
13.6.1 Satasti nosilci v programu AceGirder

Za numerično analizo satastih nosilcev sem napisal kode za naslednje modele satastih nosilcev:

- satasti nosilec s heksagonalnimi odprtini (CAB);

- satasti nosilec s povišanimi odprtinami oktagonalne oblike (CABIP);
- satasti nosilec z okroglimi odprtinami (CEB);
- satasti nosilec s povišanimi okroglimi odprtinami (CEBIP);
- satasti nosilec s podolgovatimi odprtinami (BWE0);
- satasti nosilec z odprtinami tipa Angelina (ANGELINA);
- satasti nosilec s pravokotnimi ali kvadratnimi odprtinami (BRSO).

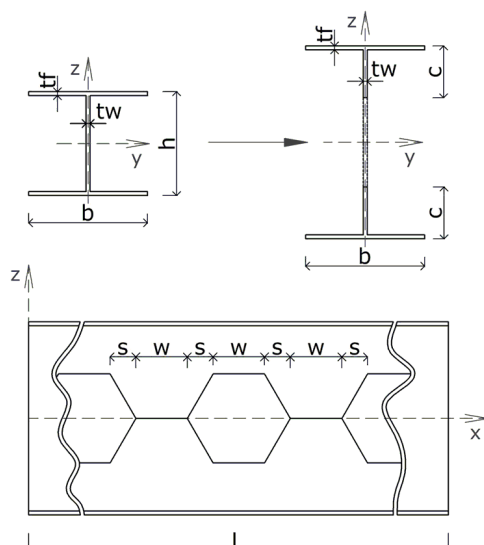
V programu pri satastih nosilcih velja predpostavka, da so odprtine v stojini na razdalji p pri podporah zaprte, kot je to prikazano na Sliki 60 za primer SN z okroglimi odprtinami. Ta predpostavka velja za vse modele SN v programu AceGirder. Na mestu podpore mora biti odprtina v stojini zaprta (Slika 15).



Slika 60: Satasti nosilec z okroglimi odprtinami

Uporabnik mora vnesti vhodne podatke, ki se zahtevajo za vnos izbranega tipa satastega nosilca. V programu v oknu zavihek so poleg polij za vnos geometrijskih karakteristik zraven skice, s katerimi uporabnik vidi katere vhodne podatke mora vnesti, kot je to prikazano na Sliki 61. Formulacijo elementa uporabnik sam izbere v programu v zavihku "Analiza". Na podlagi vnosnih podatkov program sam generira mrežo končnih elementov. Za topologijo mreže (Slika 57) uporabnik izbira med:

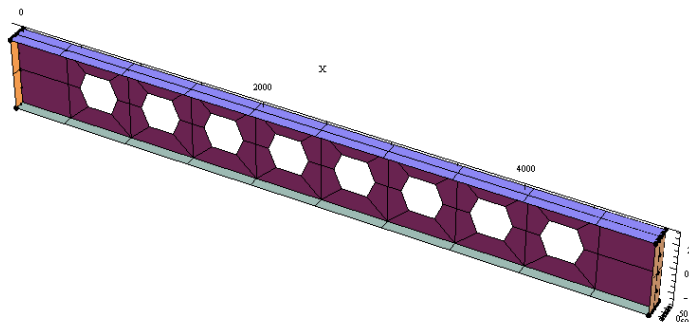
- 4 - vozliščni isoparametrični lupinasti element;
- 9 - vozliščni isoparametrični lupinasti element;
- 4 - vozliščni EAS ("assumed enhanced strain" za membranske deformacije) - ANS ("assumed natural strain" za upogib) isoparametrični lupinasti element.



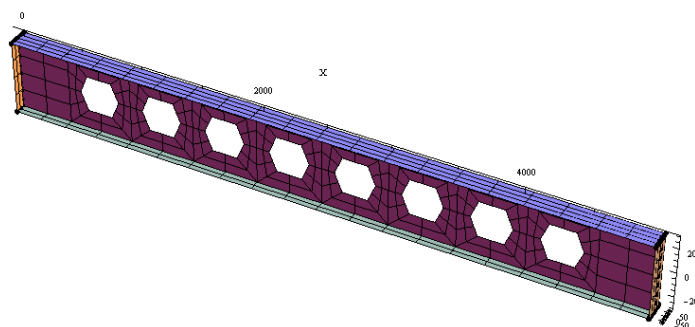
Slika 61: Skica SN z zahtevanimi geometrijskimi karakteristikami za vnos

Uporabnik sam izbira gostoto mreže končnih elementov, število končnih elementov je možna glede na izbiro redke mreže, srednje goste mreže in goste mreže v stopnjah od 1 do 6 (Slika 57) in (Slika 56). V programu je napisana koda za mrežo končnih elementov za vse nosilce z odprtinami. Na Sliki 62, Sliki 63, Sliki 64, Sliki 65, Sliki 66 in Sliki 67 je prikazana mreža končnih elementov za satasti nosilec z heksagonalnimi odprtinami za stopnjo gostote mreže od 1 (najbolj redka mreža) do 6 (najbolj gosta mreža).

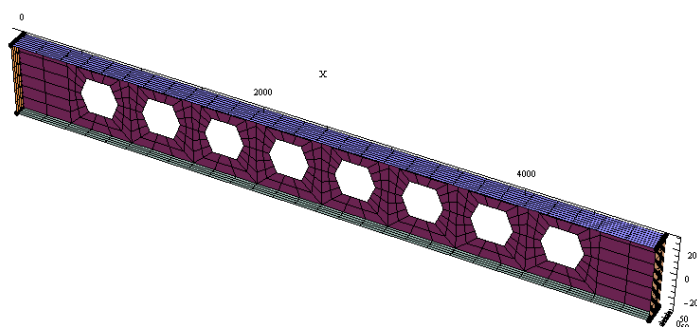
Iz vnešenih podatkov za geomerijo in izbire gostote mreže končnih elementov program sam generira mrežo končnih elementov. Na podlagi vnosnih podatkov se izrišejo odprtine v stojini na osni razdalji p . Na podlagi p in dolžine nosilca L program preračuna in izriše m stojin z odprtinami na osni razdalji p , pri tem pa velja omeniti, da so stojine pri podporah polne.



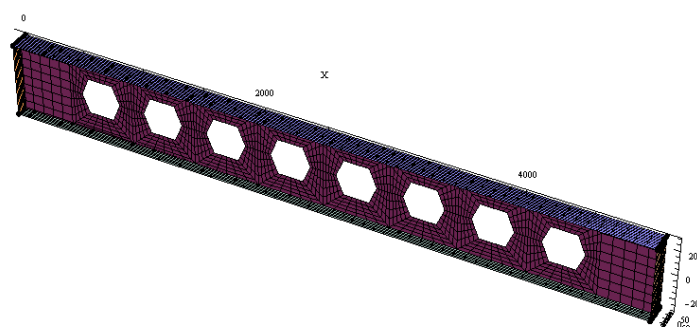
Slika 62: Mreža končnih elementov za SN s heksagonalnimi odprtinami za 9 - vozliščni isoparametrični lupinasti element, pri gostoti mreže 1



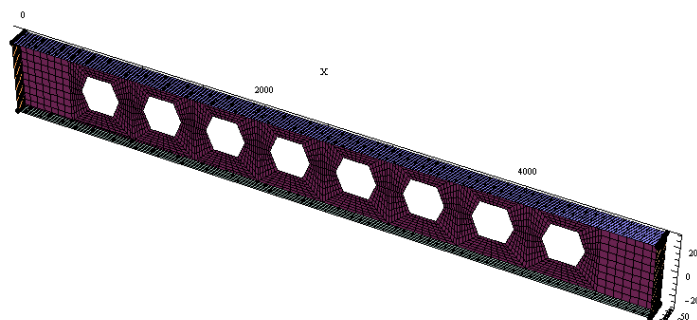
Slika 63: Mreža končnih elementov za SN s heksagonalnimi odprtinami za 9 - vozliščni isoparametrični lupinasti element, pri gostoti mreže 2



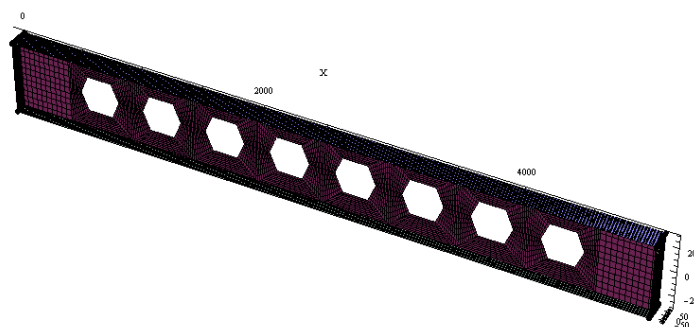
Slika 64: Mreža končnih elementov za SN s heksagonalnimi odprtinami za 9 - vozliščni isoparametrični lupinasti element, pri gostoti mreže 3



Slika 65: Mreža končnih elementov za SN s heksagonalnimi odprtinami za 9 - vozliščni isoparametrični lupinasti element, pri gostoti mreže 4



Slika 66: Mreža končnih elementov za SN s heksagonalnimi odprtinami za 9 - vozliščni isoparametrični lupinasti element, pri gostoti mreže 5



Slika 67: Mreža končnih elementov za SN s heksagonalnimi odprtinami za 9 - vozliščni isoparametrični lupinasti element, pri gostoti mreže 6

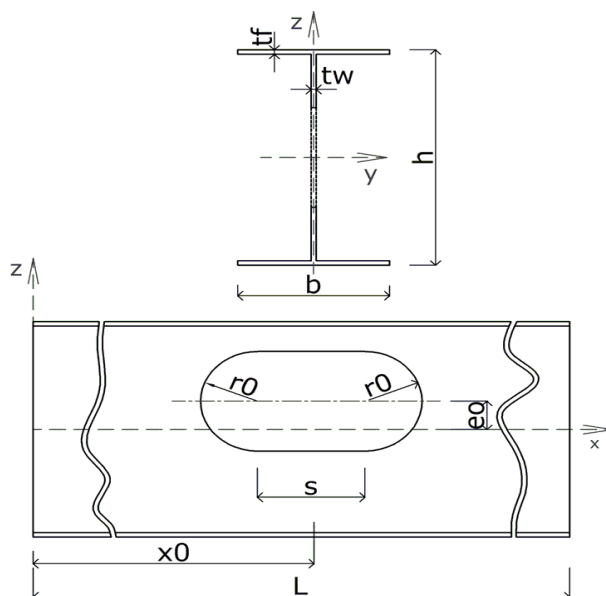
13.6.2 Nosilci z enojnimi odprtinami v stojini

Za numerično analizo nosilcev z enojnimi odprtinami sem napisal kode za modele nosilcev:

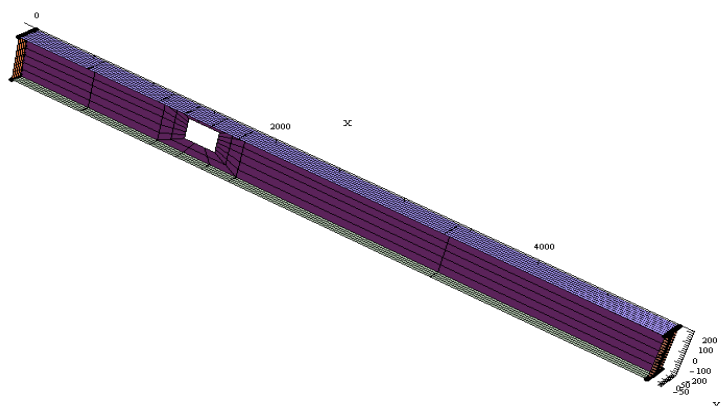
- nosilec s heksagonalno enojno odprtino (SHO);
- nosilec z oktagonalno enojno odprtino (SOO);
- nosilec z okroglo enojno odprtino (SCO);
- nosilec s povišano enojno okroglo odprtino (SCHO);
- nosilec s podolgovato enojno odprtino (SEO);
- nosilec s pravokotno ali kvadratno enojno odprtino (SRSWO), v programu (Slika 69).

V programu pri nosilcih z enojnimi odprtinami je uporabniku omogočeno, da odprtino locira poljubno v nosilcu. Lokacijo odprtine se poda po abscisi z osno oddaljenostjo x_0 od koordinatnega izhodišča do središča odprtine, prikazano na Sliki 68. Poleg tega je uporabniku

omogočeno, da lahko locira odprtino ekscentrično v smeri ordinatne osi z v višini stojine nosilca.



Slika 68: Skica nosilca podolgovato enojno odprtino v stojini



Slika 69: Nosilec z enojno pravokotno odprtino, z mrežo končnih elementov gostote 2

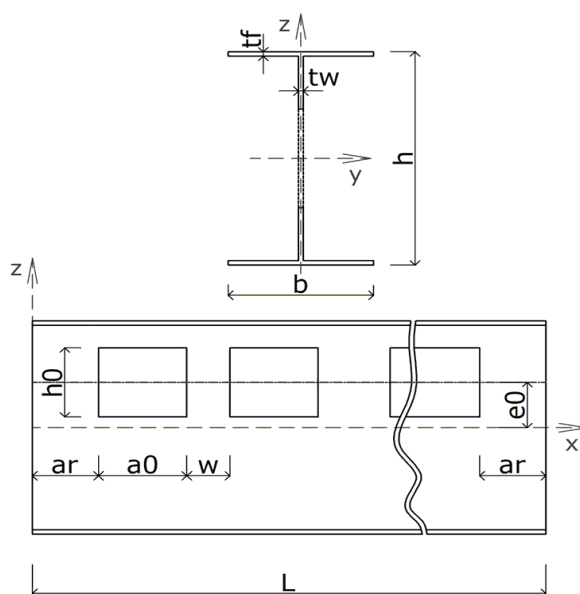
13.6.3 Nosilci z večimi odprtinami v stojini

Za numerično analizo nosilcev z nosilci z večimi odprtinami v stojini sem napisal naslednje kode za modele nosilcev:

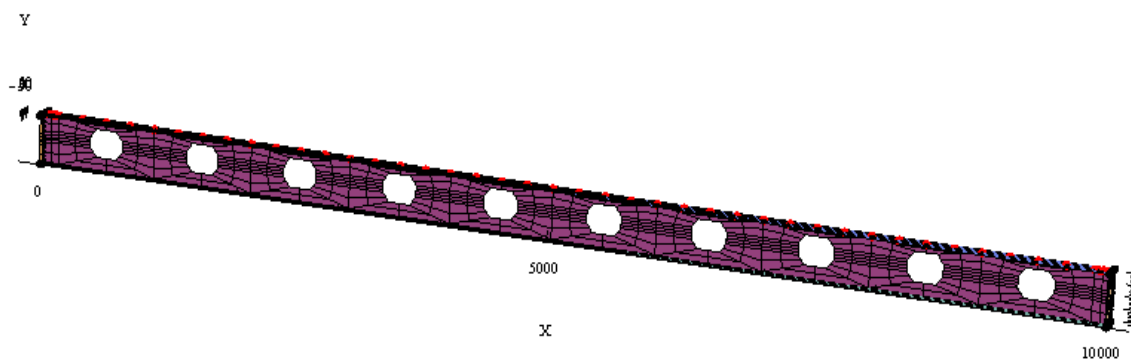
- nosilec z večimi heksagonalnimi odprtinami (MHO);
- nosilec z večimi oktagonalnimi odprtinami (MOO), v programu (Slika 71);
- nosilec z večimi okroglimi odprtinami (MCO);

- nosilec z večimi povišanimi okroglimi odprtinami (MCHO);
- nosilec z večimi podolgovatimi odprtinami (MEO);
- nosilec z večimi pravokotnimi ali kvadratnimi odprtinami (MRSWO);

Uporabniku je omogočeno, da vnese potrebne vhodne geometrijske karakteristike odprtin, kot je to prikazano na Sliki 70 v polja za vnos podatkov. Začetek prve odprtine, ki je oddaljena od roba nosilca za a_r , določi uporabnik sam pri vseh modelih. Poleg tega je uporabniku omogočeno, da lahko locira odprtino ekscentrično v smeri ordinatne osi z v višini stojine.



Slika 70: Skica nosilca z večimi pravokotnimi odprtinami

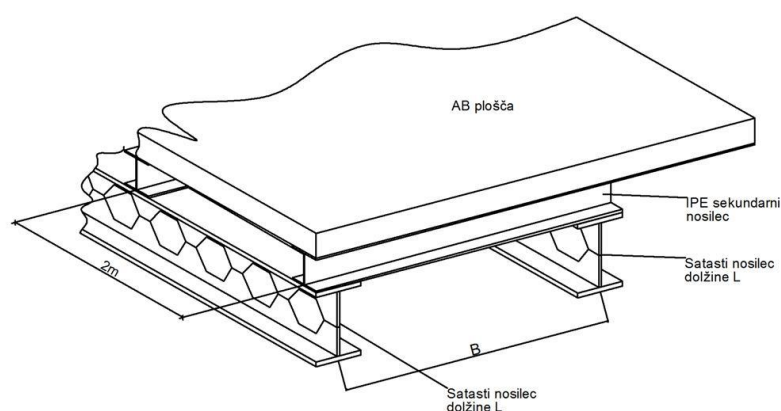


Slika 71: Nosilec z večimi oktagonalnimi odprtinami, z mrežo končnih elementov gostote 2

14 STATIČNA PRESOJA IZBRANEGA SATASTEGA NOSILCA

14.1 Splošno

Za statično analizo sem izbral sekundarni satasti nosilec s heksagonalnimi odprtinami, ki premošča razpon 8 m in je členkasto pritrjen na primarni nosilec. Satasti nosilci so med sabo na osnem razmaku $B=6$ m (Slika 72), za bočno podporo so izbrani sekundarni IPE nosilci na osnem razmaku 2 m.



Slika 72: Skica konstrukcije obravnavanega satastega nosilca

14.2 Material in geometrija satastega nosilca s heksagonalnimi odprtinami

14.2.1 Material satastega nosilca

Izberem jeklo S355:

$$f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{y,f} = 35,5 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{y,w} = 35,5 \text{ kN/cm}^2$$

$$E = 21000 \text{ kN/cm}^2$$

$$v = 0,30$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

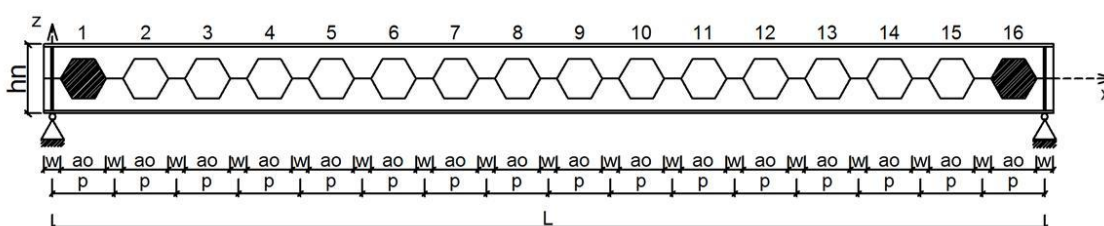
14.2.2 Razpon satastega nosilca

Razpon satastega nosilca na Sliki 73:

$$L = 800\text{cm}$$

Osni razmak med satastimi nosilci:

$$B = 600\text{cm}$$



Slika 73: Geometrija satastega nosilca

14.2.3 Geometrijske karakteristike prečnega prereza satastega nosilca

- **Osnovni profil**

Satasti nosilec je povišani nosilec, ki se ga dobi z izrezom iz osnovnega profila. Za osnovni profil iz katerega se dobi satasti nosilec sem izbral IPE 400.

Izbira jeklenega profila:

Profil IPE 400:

$$h = 40\text{cm}$$

$$t_w = 0,86\text{cm}$$

$$t_f = 1,35\text{cm}$$

$$b = 18\text{cm}$$

$$r = 2,1\text{cm}$$

$$I_y = 23130\text{cm}^4$$

$$W_{pl,y} = 1307\text{cm}^3$$

$$W_{el,y} = 1160\text{cm}^3$$

Kjer je:

r polmer zaokrožitve med pasnico in stojino vročevaljanih prerezov;

$W_{pl,y}$ plastični odpornostni moment;

$W_{el,y}$ elastični odpornostni moment.

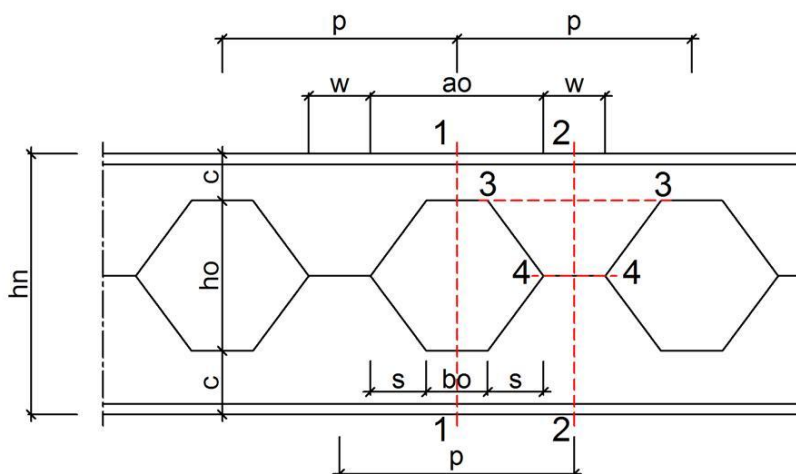
- **Geometrijske karakteristike satastega nosilca**

Vhodni podatki za geometrijo odprtin:

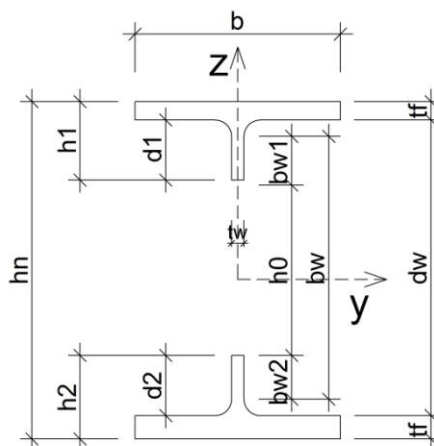
$$w = 15\text{cm}$$

$$s = 10\text{cm}$$

$$c = 10\text{cm}$$



Slika 74: Geometrija na vzdolžnem prerezu



Slika 75: Prečni prerez odprtine satastega nosilca

Geometrijske karakteristike na Sliki 74 in Sliki 75 za heksagonalne odprtine se določa z izrazi iz enačb (8.0), (8.1), (8.2) in (8.3).

$$p = 2 \cdot (w + s) = 2 \cdot (15\text{cm} + 10\text{cm}) = 50\text{cm}$$

$$a_o = w + 2 \cdot s = 15\text{cm} + 2 \cdot 10\text{cm} = 35\text{cm}$$

$$b_o = w = 15\text{cm}$$

$$h_n = 2 \cdot (h - c) = 2 \cdot (40\text{cm} - 10\text{cm}) = 60\text{cm}$$

$$d_w = h_n - 2 \cdot t_f = 60\text{cm} - 2 \cdot 1,35\text{cm} = 57,30\text{cm}$$

$$h_o = h_n - 2 \cdot c - 2 \cdot t_f = 60\text{cm} - 2 \cdot 10\text{cm} = 40\text{cm}$$

$$d_1 = d_2 = c - t_f = 10\text{cm} - 1,35\text{cm} = 8,65\text{cm}$$

Število odprtin v stojini je 16, pri tem naj povem, da so odprtini pri podporah polne, na Sliki 73 so šrafirane.

14.3 Analiza obtežbe in obtežne kombinacije

14.3.1 Analiza obtežbe

- **Lastna in stalna obtežba**

Medetažna konstrukcija:

- predelne stene	$g = 1,25\text{kN/m}^2$
- zaključni sloj	$g = 0,05\text{kN/m}^2$
- cementni estrih (5cm) $25\text{kN/m}^2 \cdot 0,05\text{m}$	$g = 1,25\text{kN/m}^2$
- toplotna izolacija	$g = 0,1\text{kN/m}^2$
- armiranobetonska plošča (12cm) $25\text{kN/m}^2 \cdot 0,12\text{m}$	$g = 3\text{kN/m}^2$
- instalacije	$g = 0,2\text{kN/m}^2$
- spuščen strop	$g = 0,1\text{kN/m}^2$
- teža jeklenega profila IPE 300	$g = 0,07\text{kN/m}^2$
Skupna teža medetažne konstrukcije:	$g = 6,02\text{kN/m}^2$

- **Koristna obtežba**

Za koristno obtežbo satastega nosilca izberem iz standarda SIST EN 1991-1-1:2004, da je namedetažni konstrukciji predvidena pisarna.

- pisarna B $q = 3kN/m^2$

14.3.2 Obtežne kombinacije

Obtežne kombinacije so sestavljene po standardu SIST EN 1990: 2004.

- **Mejno stanje nosilnosti**

$$\text{MSN: } q_{Ed} = 1,35 \cdot g \cdot B + 1,5 \cdot q \cdot B = 1,35 \cdot 6,02 \frac{kN}{m^2} \cdot 6m + 1,5 \cdot 3 \frac{kN}{m^2} \cdot 6m = 75,76 \frac{kN}{m}$$

$$M_{Ed} = \frac{q_{Ed} \cdot L^2}{8} = \frac{75,76kN/m \cdot (8m)^2}{8} = 606,08kNm$$

$$V_{Ed} = \frac{q_{Ed} \cdot L}{2} = \frac{75,76kN/m \cdot 8m}{2} = 303,04kN$$

- **Mejno stanje uporabnosti**

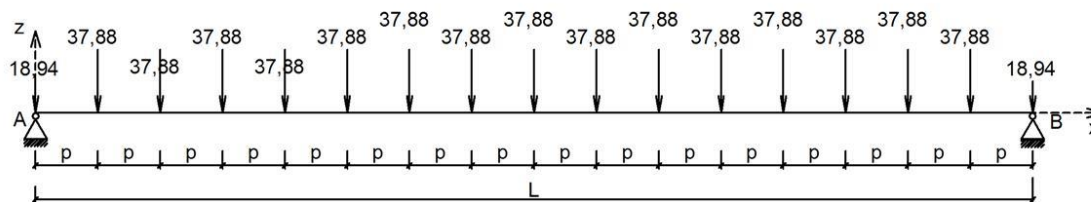
$$\text{MSU: } q_{Ed} = 1,0 \cdot g \cdot B + 1,0 \cdot q \cdot B = 1,0 \cdot 6,02 \frac{kN}{m^2} \cdot 6m + 1,0 \cdot 3 \frac{kN}{m^2} \cdot 6m = 54,12 \frac{kN}{m}$$

$$M_{Ed} = \frac{q_{Ed} \cdot L^2}{8} = \frac{54,12kN/m \cdot (8m)^2}{8} = 432,96kNm$$

$$V_{Ed} = \frac{q_{Ed} \cdot L}{2} = \frac{54,12kN/m \cdot 8m}{2} = 216,48kN$$

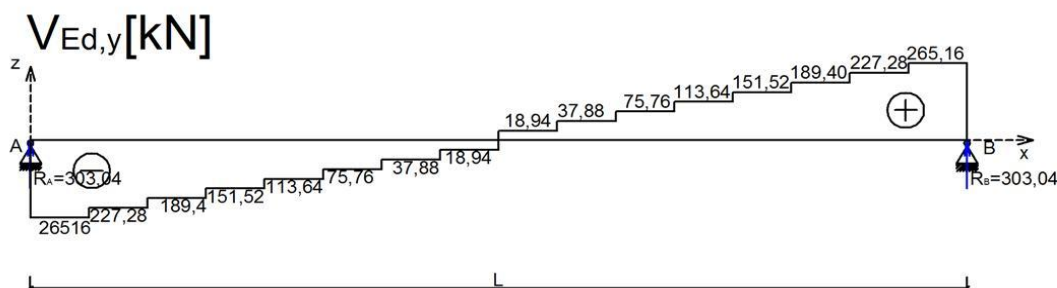
14.3.3 Izračun notranjih sil na satastemu nosilcu za MSN

Za račun notranjih sil sem uporabil prostoležeči nosilec (Slika 76) na katerega sem razdelil zvezno obtežbo na točkovno obtežbo. Sile na prostoležečem nosilcu so velikosti 37,88kN. Nad podporama pa vrednost sile 18,94 kN. Z izračunom notranjih sil dobim potek prečnih sil $V_{Ed,y}$ (Slika 77) in momenta $M_{Ed,z}$ (Slika 78).

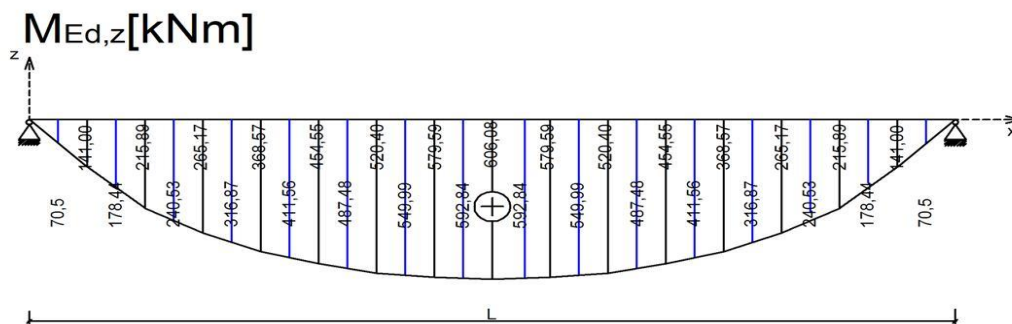


Slika 76: Sile na prostoležečemu nosilcu za MSN

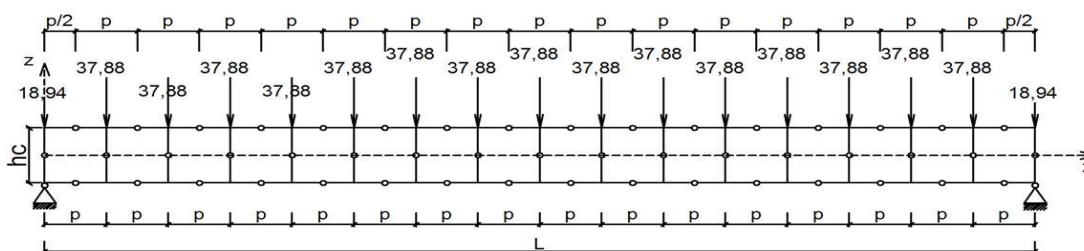
Notranje sile se računajo na enakovrednem Vierendeelovem nosilcu (Slika 79). Porazdelitev notranjih osnih sil $N_{Ed,V}$, notranjih prečnih sil $V_{Ed,y,V}$ in notranjih momentov $M_{Ed,z,V}$ na Vierendeelovemu nosilcu je pokazano na Sliki 80, Sliki 81 in Sliki 82.



Slika 77: Prečne sile $V_{Ed,y}$ na prostoležečem nosilcu

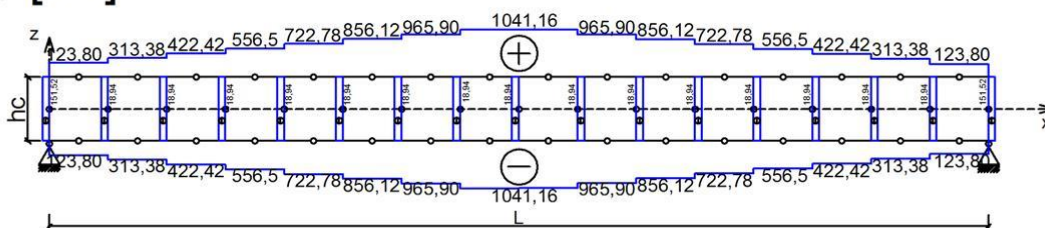


Slika 78: Momenti $M_{Ed,z}$ na prostoležečem nosilcu



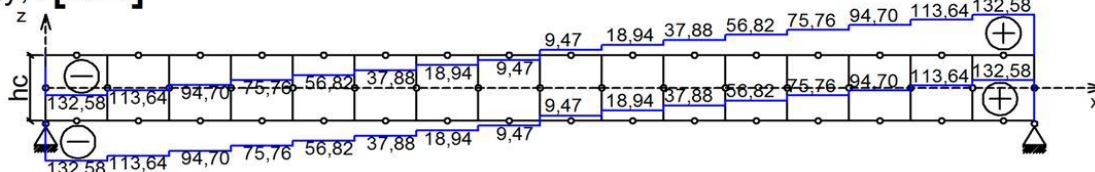
Slika 79: Porazdelitev sil na Vierendeelovemu nosilcu

$N_{Ed,V} [kN]$



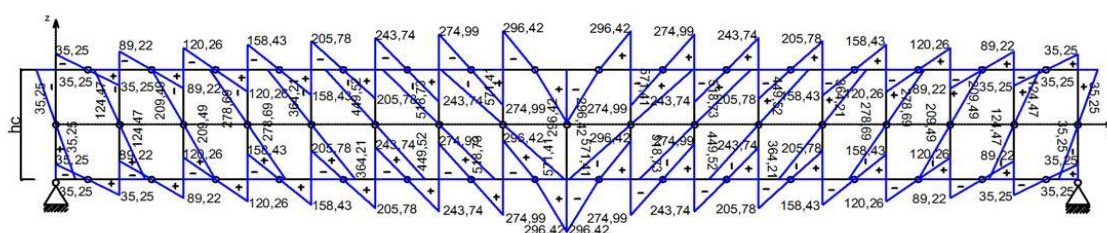
Slika 80: Osne sile $N_{Ed,V}$ na Vierendeelovemu nosilcu

$V_{Ed,y,V} [kN]$



Slika 81: Prečne sile $V_{Ed,y,V}$ na Vierendeelovemu nosilcu

$M_{Ed,z,V} [kNm]$



Slika 82: Momenti $M_{Ed,z,V}$ na Vierendeelovemu nosilcu

14.3.4 Geometrijske omejitve odprtín

Satasti nosilec mora zadostiti geometrijskim omejitvam, ki so podane v izrazih (8.11), (8.13), (8.14), (8.15), (8.16):

- $h_o \leq 0,75 \cdot d_w \rightarrow 40cm \leq 0,75 \cdot 57,30cm = 42,98cm$
- $d_1 = d_2 \geq 0,10 \cdot d_w \rightarrow 8,65cm \geq 0,10 \cdot 57,3cm = 5,73cm$
- $a_o \leq h_o \rightarrow 35cm \leq 40cm$
- $b_o = w \rightarrow 15cm = 15cm$
- $0,25 \cdot a_o \leq w \leq 0,50 \cdot a_o \rightarrow$
 $\rightarrow 0,25 \cdot 35cm = 8,75cm \leq 15cm \leq 0,50 \cdot 35cm = 17,50cm$

14.4 Kontrola kompaktnosti prereza

• Klasifikacija pasnice

Klasifikacijo pasnice se dela po standardu SIST EN 1993-1-1:2005.

- Pasnica, 2. razred kompaktnosti:

$$\frac{c}{t_f} = \frac{10\text{cm}}{1,35\text{cm}} = 7,41 \leq 11 \cdot \varepsilon = 8,91$$

- Pasnica, 3. razred kompaktnosti:

$$\frac{c}{t_f} = \frac{10\text{cm}}{1,35\text{cm}} = 7,41 \leq 14 \cdot \varepsilon = 11,34$$

Pasnica spada v 2. razred kompaktnosti.

• Klasifikacija stojine z odprtino

Klasifikacija stojine z odprtino se dokazuje po izrazih (6.0) in (6.1). Efektivno dolžino za šesterokotno odprtino se dobi iz Slike 16.

$$l_o = \frac{a_o + b_o}{2} = \frac{35\text{cm} + 15\text{cm}}{2} = 25\text{cm}$$

- Stojina, 2. razred kompaktnosti:

$$l_o = 25\text{cm} \leq 32 \cdot t_w \cdot \varepsilon = 32 \cdot 0,86\text{cm} \cdot 0,81 = 22,29\text{cm}$$

$$b_{wc} = c - t_f - r = 10\text{cm} - 1,35\text{cm} - 2,1\text{cm} = 6,55\text{cm}$$

$$b_{wc} = 6,55\text{cm} \leq \frac{10 \cdot t_w \cdot \varepsilon}{\sqrt{1 - \left(\frac{32 \cdot t_w \cdot \varepsilon}{l_o}\right)^2}} = \frac{10 \cdot 0,86\text{cm} \cdot 0,81}{\sqrt{1 - \left(\frac{32 \cdot 0,86\text{cm} \cdot 0,81}{25\text{cm}}\right)^2}} = 15,38\text{cm}$$

- Stojina, 3. razred kompaktnosti:

$$l_o = 25\text{cm} \leq 36 \cdot t_w \cdot \varepsilon = 36 \cdot 0,86\text{cm} \cdot 0,81 = 25,08\text{cm}$$

$$b_{wc} = 6,55\text{cm} \leq \frac{14 \cdot t_w \cdot \varepsilon}{\sqrt{1 - \left(\frac{36 \cdot t_w \cdot \varepsilon}{l_o}\right)^2}} = \frac{14 \cdot 0,86\text{cm} \cdot 0,81}{\sqrt{1 - \left(\frac{36 \cdot 0,86\text{cm} \cdot 0,81}{25\text{cm}}\right)^2}} = 27,11\text{cm}$$

Stojina z odprtino spada v 3. razred kompaktnosti.

- **Klasifikacija prereza z odprtino**

- Za celoten prerez se vzame 3. razred kompaktnosti.

Za celoten prerez razreda 3, se sme uporabiti elastične lastnosti T prereza.

14.5 Kontrola nosilnosti pasu T prereza nad in pod odprtino

14.5.1 Geometrija pasu T prereza

$$A_T = b \cdot t_f + (c - t_f) \cdot t_w = 18\text{cm} \cdot 1,35\text{cm} + 8,65\text{cm} \cdot 0,086\text{cm} = 31,74\text{cm}^2$$

$$A_{TV} = 1,04 \cdot t_w \cdot c = 1,04 \cdot 0,86\text{cm} \cdot 10\text{cm} = 8,94\text{cm}^2$$

$$z_T = c - \frac{(b \cdot t_f) \cdot \left(\frac{t_f}{2} + (c - t_f)\right) + t_w \cdot (c - t_f) \cdot \frac{(c - t_f)}{2}}{b \cdot t_f + (c - t_f) \cdot t_w} =$$

$$= 10\text{cm} -$$

$$\frac{(18\text{cm} \cdot 1,35\text{cm}) \cdot \left(\frac{1,35\text{cm}}{2} + (10\text{cm} - 1,35\text{cm})\right) + 0,86\text{cm} \cdot (10\text{cm} - 1,35\text{cm}) \cdot \frac{(10\text{cm} - 1,35\text{cm})}{2}}{18\text{cm} \cdot 1,35\text{cm} + (10\text{cm} - 1,35\text{cm}) \cdot 0,86\text{cm}} =$$

$$= 1,85\text{cm}$$

$$h_c = h_n - 2 \cdot z_T = 60\text{cm} - 2 \cdot 1,85\text{cm} = 58,15\text{cm}$$

$$I_T = \frac{b \cdot t_f^3}{12} + \frac{(c - t_f)^3 \cdot t_w}{12} + b \cdot t_f \cdot (z_T)^2 + t_w \cdot (c - t_f) \cdot \left((c - z_T) - \frac{c - t_f}{2}\right)^2 =$$

$$= \frac{18\text{cm} \cdot (1,35\text{cm})^3}{12} + \frac{8,65\text{cm}^3 \cdot 0,86\text{cm}}{12} + 18\text{cm} \cdot 1,35\text{cm} \cdot (1,85\text{cm})^2 +$$

$$+ 0,86\text{cm} \cdot 8,65\text{cm} \cdot \left((10\text{cm} - 1,85\text{cm}) - \frac{8,65\text{cm}}{2}\right)^2 = 242,07\text{cm}^4$$

$$W_{T,zg} = \frac{I_T}{z_T} = \frac{242,07\text{cm}^4}{1,85\text{cm}} = 130,85\text{cm}^3$$

$$W_{T,sp} = \frac{I_T}{c - z_T} = \frac{130,085 \text{ cm}^2}{10 \text{ cm} - 1,85 \text{ cm}} = 15,96 \text{ cm}^3$$

$$W_T = \min(W_{T,zg}, W_{T,sp}) = 15,96 \text{ cm}^3$$

Kjer je:

A_T površina T prereza;

A_{TV} površina strižnega prereza T prereza;

z_T težišče T prereza;

I_T vztrajnostni moment T prereza;

$W_{T,zg}$ elastični odpornostni moment zgornjega T prereza;

$W_{T,sp}$ elastični odpornostni moment spodnjega T prereza;

W_T elastični odpornostni moment T prereza.

14.5.2 Kontrola nosilnosti prereza na mestu odprtine v prerezu 1-1

Kontrolo nosilnosti se dela na prerezu 1-1, Slika 74, na odprtini številka 8 (Slika 73).

- **Notranje sile na mestu odprtine**

$$N_{T,Ed} = 1041,16 \text{ kN}$$

$$V_{T,Ed} = 113,64 \text{ kN}$$

$$M_{T,V,Ed} = 74,11 \text{ kNcm}$$

- **Kontrola strižne nosilnosti T prereza**

Kontrolo strižne nosilnosti se dela po izrazih (8.19) in (8.20).

$$V_{T,Rd} = \frac{A_{TV} \cdot f_y}{\sqrt{3}} = \frac{8,94 \text{ cm}^2 \cdot 35,5 \text{ kN/cm}^2}{\sqrt{3}} = 183,32 \text{ kN}$$

$$V_{T,Ed} \leq V_{T,Rd} \rightarrow 113,64 \text{ kN} \leq 183,32 \text{ kN}$$

$$V_{T,Ed} \leq 0,5 \cdot V_{T,Rd} \rightarrow 113,64 \text{ kN} \leq 0,5 \cdot 183,32 \text{ kN} = 91,66 \text{ kN} \rightarrow \text{NI REDUKCIJE}$$

$$\gamma = \frac{V_{T,Rd}}{V_{T,Ed}} = \frac{183,32 \text{ kN}}{113,64 \text{ kN}} = 1,62$$

- **Kontrola osne nosilnosti T prereza**

Kontrola osne nosilnosti se dela po izrazih iz poglavja 8.9.1.1.

$$N_{T,Rd} = A_T \cdot f_y = 31,74 \text{cm}^2 \cdot \frac{35,5 \text{kN}}{\text{cm}^2} = 1126,77 \text{kN}$$

$$N_{T,Ed} \leq N_{T,Rd} \rightarrow 1041,16 \text{kN} \leq 1126,77 \text{kN}$$

$$\gamma = \frac{N_{T,Rd}}{N_{T,Ed}} = \frac{1126,77 \text{kN}}{1041,16 \text{kN}} = 1,08$$

- **Kontrola upogibne nosilnosti T prereza zaradi interakcije delovanja (M-V-N)**

Kontrola nosilnosti T prereza se dela po enačbah iz poglavja 8.9.1.3.

- Elastična upogibna nosilnost T prereza $M_{T,V,Rd}$:

$$M_{T,V,Rd} = W_T \cdot f_y = 15,96 \text{cm}^3 \cdot 35,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 566,58 \text{kNcm}$$

- Reducirana upogibna nosilnost (M-V-N) za T prerez brez ojačitev velja:

$$M_{T,NV,Rd} = M_{T,V,Rd} \cdot \left(1 - \left(\frac{N_{T,Ed}}{N_{T,Rd}} \right)^2 \right) =$$
$$= 566,58 \text{kNcm} \cdot \left(1 - \left(\frac{1041,16 \text{kN}}{1126,77 \text{kN}} \right)^2 \right) = 82,79 \text{kNcm}$$

$$M_{T,V,Ed} \leq M_{T,NV,Rd} \rightarrow 74,11 \text{kNcm} \leq 82,79 \text{kNcm}$$

$$\gamma = \frac{M_{T,NV,Rd}}{M_{T,V,Ed}} = \frac{82,79 \text{kNcm}}{74,11 \text{kNcm}} = 1,11$$

14.5.3 Celotni Vierendeelov moment odprtine

Kontrola Vierendeelovega momenta odprtine se dela po izrazih iz poglavja 14.5.3.

$$L_T = b_o = 15 \text{cm}$$

$$\sum M_{V,Ed} = L_T \cdot V_{Ed} = 15 \text{cm} \cdot 18,94 \text{kN} = 284,1 \text{kNcm}$$

$$\sum M_{V,Rd} = 4 \cdot M_{T,V,Rd} \cdot \left(1 - \left(\frac{N_{T,Ed}}{N_{T,Rd}} \right)^2 \right) =$$

$$= 4 \cdot 566,58 \text{ kNcm} \cdot \left(1 - \left(\frac{1041,16 \text{ kN}}{1126,73 \text{ kN}} \right)^2 \right) = 331,16 \text{ kNcm}$$

$$\Sigma M_{V,Ed} \leq \Sigma M_{V,Rd} \rightarrow 284,1 \text{ kNcm} \leq 331,16 \text{ kNcm}$$

$$\gamma = \frac{\Sigma M_{V,Rd}}{\Sigma M_{V,Ed}} = \frac{331,16 \text{ kNcm}}{284,1 \text{ kNcm}} = 1,10$$

14.6 Kontrola nosilnosti polne stojine med odprtinami

Kontrolo nosilnosti se dela na prerezu 4–4, Slika 74, po enačbah iz poglavja 8.10.

- **Notranje sile v polnem delu stojine**

$$V_{wp,Ed} = \frac{p}{h_c/2} \cdot \frac{(113,64 \text{ kN} + 132,56 \text{ kN})}{2} = \frac{50 \text{ cm}}{56,94 \text{ cm}/2} \cdot \frac{246,2 \text{ kN}}{2} = 216,19 \text{ kN}$$

$$M_{wp,Ed} = 2162,14 \text{ kNcm}$$

- **Geometrijske karakteristike polnega dela stojine**

$$W_{wp,el} = \frac{t_w \cdot (w + 2 \cdot s)^2}{6} = \frac{0,86 \text{ cm} \cdot (10 \text{ cm} + 2 \cdot 10 \text{ cm})^2}{6} = 175,58 \text{ cm}^3$$

$$A_I = 2 \cdot (b \cdot t_f) + (d_w \cdot t_w) = 2 \cdot (18 \text{ cm} \cdot 1,35 \text{ cm}) + (57,30 \text{ cm} \cdot 0,86 \text{ cm}) = 907,878 \text{ cm}^2$$

- **Kontrola strižne nosilnosti polnega dela stojine**

$$V_{wp,Rd} = \frac{w \cdot t_w \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{15 \text{ cm} \cdot 0,86 \text{ cm} \cdot 35,5 \text{ kN/cm}^2}{\sqrt{3} \cdot 1} = 264,40 \text{ kN}$$

$$V_{wp,Ed} \leq V_{wp,Rd} \rightarrow 216,19 \text{ kN} \leq 264,40 \text{ kN}$$

$$\gamma = \frac{V_{wp,Rd}}{V_{wp,Ed}} = \frac{264,40 \text{ kN}}{216,19 \text{ kN}} = 1,22$$

- **Kontrola upogibne nosilnosti polnega prereza stojine**

$$\frac{h_o}{t_w} \leq 60 \cdot \varepsilon \cdot t_w \rightarrow \frac{40 \text{ cm}}{0,86 \text{ cm}} \leq 60 \cdot 0,81 \rightarrow 46,51 \leq 48,6$$

$$\alpha = \frac{p}{h_o} = \frac{50\text{cm}}{40\text{cm}} = 1,25$$

$$\beta = \frac{h_o}{t_w} = \frac{40\text{cm}}{0,86\text{cm}} = 46,51$$

$$C_1 = 5,097 + 0,1464 \cdot \beta - 0,00174 \cdot \beta^2 =$$

$$= 5,097 + 0,1464 \cdot 46,51 - 0,00174 \cdot 46,51^2 = 8,14$$

$$C_2 = 1,441 + 0,0625 \cdot \beta - 0,000683 \cdot \beta^2 =$$

$$= 1,441 + 0,0625 \cdot 46,51 - 0,000683 \cdot 46,51^2 = 2,87$$

$$C_3 = 3,645 + 0,0853 \cdot \beta - 0,00108 \cdot \beta^2 =$$

$$= 3,645 + 0,0853 \cdot 46,51 - 0,00108 \cdot 46,51^2 = 5,28$$

$$M_{wp,el,Rd} = W_{wp,el} \cdot f_y = 175,58\text{cm}^3 \cdot \frac{35,5\text{kN}}{\text{cm}^2} = 6233,21\text{kNcm}$$

$$M_{wp,Rd,1} = (C_1 \cdot \alpha - C_2 \cdot \alpha^2 - C_3) \cdot M_{wp,el,Rd} =$$

$$(8,14 \cdot 1,25 - 2,87 \cdot 1,25^2 - 5,28) \cdot 6233,21\text{kNcm} = 2596,47\text{kNcm}$$

$$M_{wp,Rd,2} = 0,6 \cdot M_{wp,el,Rd} = 0,6 \cdot 6233,21\text{kNcm} = 3739,93\text{kNcm}$$

$$M_{wp,Rd} = \min(M_{wp,Rd,1}, M_{wp,Rd,2}) = 2596,47\text{kNcm}$$

$$M_{wp,Ed} \leq M_{wp,Rd} \rightarrow 2162,14\text{kNcm} \leq 2596,47\text{kNcm}$$

$$\gamma = \frac{M_{wp,Rd}}{M_{wp,Ed}} = \frac{2596,47\text{kNcm}}{2162,14\text{kNcm}} = 1,20$$

14.7 Kontrola izbočenja tlačene pasnice v ravnini stojine

Kontrolo izbočenja tlačene pasnice za pravokotno odprtino se dela po enačbi 9.0.

$$A_w = (h_n - 2 \cdot t_f) \cdot t_w = (60\text{cm} - 2 \cdot 1,35\text{cm}) \cdot 0,86\text{cm} = 49,28\text{cm}^2$$

$$A_{fc} = b \cdot t_f = 18\text{cm} \cdot 1,35\text{cm} = 24,30\text{cm}^2$$

$$d_w/t_w \leq 0,4 \cdot \left(\frac{E}{f_{yf}} \right) \cdot \left[1 - \frac{0,5 \cdot a_o}{d_w} \right] \cdot \left[\frac{A_w}{A_{fc}} \right]^{0,5}$$

$$57,30\text{cm}/0,86\text{cm} \leq 0,4 \cdot \left(\frac{21000\text{kN}}{\text{cm}^2} / \frac{35,5\text{kN}}{\text{cm}^2} \right) \cdot \left[1 - \frac{0,5 \cdot 35\text{cm}}{57,30\text{cm}} \right] \cdot \left[\frac{49,28\text{cm}^2}{24,30\text{cm}^2} \right]^{0,5}$$

66,33 ≤ 243,05 → Prečne ojačitve niso potrebne

14.8 Kontrola bočne zvrnitve

Kontrolo bočne zvrnitve se dela po standardu SIST EN 1993-1-1; točka 6.3.2. O kontroli bočne zvrnitve za sataste nosilce je več povedano v poglavju 10.

$$L_c = 200\text{cm}$$

$$I_z = 1320\text{cm}^4$$

$$I_t = 2 \cdot \frac{b \cdot t_f^3}{3} + \frac{d_w \cdot t_w^3}{3} - \frac{h_o \cdot t_w^3}{3} =$$

$$= 2 \cdot \frac{18\text{cm} \cdot (1,35\text{cm})^2}{3} + \frac{57,30\text{cm} \cdot (0,86\text{cm})^3}{3} - \frac{40\text{cm} \cdot (0,86\text{cm})^3}{3} = 33,19\text{cm}^4$$

$$I_w = \frac{1}{24} \cdot b^3 \cdot h_n^2 \cdot t_f = \frac{1}{24} \cdot (18\text{cm})^3 \cdot (60\text{cm})^2 \cdot 1,35\text{cm} = 1180980\text{cm}^6$$

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = \frac{21000\text{kN/cm}^2}{2 \cdot (1 + 0,3)} = 8076,92 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$k_c = 0,94$$

$$k = 1,0$$

$$k_w = 1,0$$

$$C_1 = 1,132$$

$$C_2 = 0,459$$

$$z_g = 30\text{cm}$$

Določitev elastičnega kritičnega momenta bočne zvrnitve M_{cr} :

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k \cdot L_c)^2} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \cdot L_c)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + [C_2 \cdot z_g]^2} - [C_2 \cdot z_g] \right] =$$

$$M_{cr} = 1,132 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21000\text{kN/cm}^2 \cdot 1320\text{cm}^4}{(1,0 \cdot 200\text{cm})^2} \cdot$$

$$\cdot \left[\sqrt{\left(\frac{1,0}{1,0}\right)^2 \cdot \frac{1180980 \text{cm}^6}{1320 \text{cm}^4} + \frac{(1,0 \cdot 200 \text{cm})^2 \cdot 8076,92 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 33,19 \text{cm}^4}{\pi^2 \cdot 21000 \text{kN/cm}^2 \cdot 1320 \text{cm}^4} + [0,459 \cdot 30 \text{cm}]^2} \right]$$

$$- [0,459 \cdot 30 \text{cm}] = 152902 \text{kNcm}$$

Določitev uklonske krivulje za satasti nosilec:

$$h_n/b = 60 \text{cm}/18 \text{cm} = 3,33 \rightarrow \text{izberem uklonsko krivuljo c}$$

Določitev realtivne vitkosti $\bar{\lambda}_{LT}$ za satasti nosilec:

$$\alpha_{LT} = 0,49$$

$$\begin{aligned} I_{o,y} &= \left(\frac{b \cdot h_n^3}{12} \right) - \left(\frac{b \cdot (h_n - 2 \cdot t_f)^3}{12} \right) + \left(\frac{t_w \cdot (h_n - 2 \cdot t_f)^3}{12} - \frac{t_w \cdot h_o^3}{12} \right) = \\ &= \left(\frac{18 \text{cm} \cdot (60 \text{cm})^3}{12} \right) - \left(\frac{18 \text{cm} \cdot (60 \text{cm} - 2 \cdot 0,86 \text{cm})^3}{12} \right) + \\ &+ \left(\frac{1,35 \text{cm} \cdot (60 \text{cm} - 2 \cdot 0,86 \text{cm})^3}{12} - \frac{1,35 \text{cm} \cdot 40 \text{cm}^3}{12} \right) = 52694,6 \text{cm}^4 \end{aligned}$$

$$W_{o,y,el} = \frac{I_{o,y}}{h_n/2} = \frac{52694,6 \text{cm}^4}{60 \text{cm}/2} = 1756,49 \text{cm}^3$$

$$W_{o,y,pl} = W_{o,y,el} \cdot 1,15 = 2019,95 \text{cm}^3$$

$$W_{o,y} = 1756,49 \text{cm}^3$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{o,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{1756,49 \text{cm}^3 \cdot \frac{35,5 \text{kN}}{\text{cm}^2}}{152902 \text{kNcm}}} = 0,64$$

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,40$$

$$\bar{\lambda}_{LT} \leq \bar{\lambda}_{LT,0} \rightarrow 0,64 \leq 0,40 \rightarrow \text{kontrola bočne zvrnitve je potrebna}$$

Izračun redukcijskega faktorja Φ_{LT} za bočno zvrnitev:

$$\Phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0})^2 + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] =$$

$$= 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (0,64 - 0,40^2) + 0,75 \cdot 0,64^2] = 0,71$$

$$\chi_{LT,1} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,71 + \sqrt{0,71^2 - 0,64^2}} = 0,97$$

$$\chi_{LT,2} \leq 1,0$$

$$\chi_{LT,3} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} = \frac{1}{0,64^2} = 2,44$$

$$\chi_{LT} = \min(\chi_{LT,1}, \chi_{LT,2}, \chi_{LT,3}) = 0,97$$

$$f_1 \leq 1,0$$

$$f_2 \leq 1 - 0,5 \cdot (1 - k_c) \cdot [1 - 2 \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2] =$$

$$= 1 - 0,5 \cdot (1 - 0,94) \cdot [1 - 2 \cdot (0,64 - 0,8)^2] = 0,97$$

$$f = \min(f_1, f_2) = 0,97$$

$$\chi_{LT,mod,1} = \frac{\chi_{LT}}{f} = \frac{0,97}{0,97} = 1,0$$

$$\chi_{LT,mod,2} \leq 1,0$$

$$\chi_{LT,mod} = \min(\chi_{LT,mod,1}, \chi_{LT,mod,2}) = 1,0$$

Kontrola bočne zvrnitve:

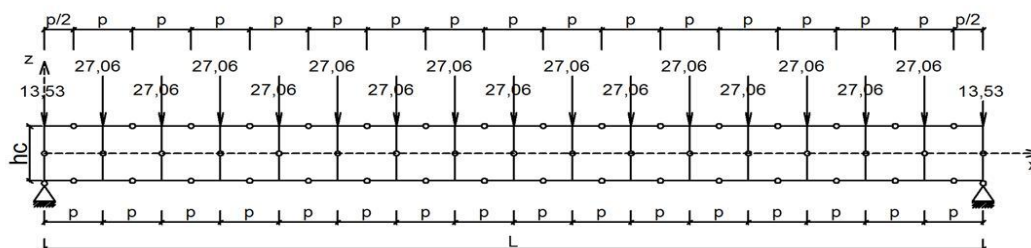
$$M_{b,Rd} = \chi_{LT,mod} \cdot W_{o,y} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 1,0 \cdot 1756,49 \text{ cm}^3 \cdot \frac{35,5 \text{ kN}}{1,0} = 61018,47 \text{ kNcm}$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \rightarrow \frac{59284 \text{ kNcm}}{61018,47 \text{ kNcm}} = 0,97 \leq 1,0$$

$$\gamma = \frac{M_{b,Rd}}{M_{y,Ed}} = \frac{61018,47 \text{ kNcm}}{59284 \text{ kNcm}} = 1,03$$

14.9 Kontrola pomikov

Iz obtežne kombinacije za MSU dobim zvezno obtežbo $q_{Ed} = 0,5412 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}$. Na Sliki 83 je model Vierendeelovega nosilca s točkovno obtežbo 27,06kN po celotni dolžini nosilca, nad obema podporama je vrednost sil zunanje obtežbe 13,53kN za MSU.



Slika 83: Obtežba na Vierendeelovemu nosilcu za MSU

Največji upogib se pričakuje pri maksimalnem momentu in ničelni prečni sili. To območje se nahaja med osmo in deveto odprtino.

Za največji upogibek $\delta_{b,max}$ zaradi čistega upogiba se upošteva:

$$I_{eff} = \frac{1}{12} \cdot t_w \cdot h_n^3 + \frac{1}{2} \cdot b \cdot t_f \cdot h_n^2 - \frac{1}{24} \cdot t_w \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot h_n\right)^2 =$$

$$= \frac{1}{12} \cdot 0,86cm \cdot (60cm)^3 + \frac{1}{2} \cdot 18cm \cdot 1,35cm \cdot (60cm)^2 - \frac{1}{24} \cdot 0,86cm \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot 60cm\right)^2 =$$

$$= 56927cm^4$$

$$\delta_{b,max} = \frac{5 \cdot q_{Ed,MSU} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_{eff}} = \frac{5 \cdot 0,5412 \frac{kN}{cm} \cdot (800cm)^4}{384 \cdot 21000kN/cm^2 \cdot 56927cm^4} = 2,41cm$$

Upogibek zaradi čistega striga med osmo in deveto odprtino $\delta_{s,8}$ se določa po:

$$G \cdot A_{eff} = \frac{3 \cdot E \cdot I_m \cdot p}{c^3} = \frac{3 \cdot 21000kN/cm^2 \cdot 192,5cm^4 \cdot 50cm}{(18,75cm)^3} = 91989,33kN$$

$$c = \frac{3}{8} \cdot p = \frac{3}{8} \cdot 50cm = 18,75cm$$

$$\delta_{s,8} = \frac{p}{G \cdot A_{eff}} \sum_{j=1}^8 V_j =$$

$$= \frac{50cm \cdot 27,06kN}{91989,33kN} \cdot (1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7 + 8) = 0,53cm$$

$$\delta_{max,SN} = \delta_{b,max} + \delta_{s,8} = 2,41cm + 0,53cm = 2,94cm$$

$$\delta_{max,SN} \leq \frac{L}{250} \rightarrow 2,94\text{cm} \leq \frac{L}{250} = 4\text{cm} \text{ USTREZA}$$

Maksimalni upogibek $\delta_{max,SN} = 2,94\text{cm}$.

14.10 Stabilnostna analiza s programom AceGirder

Stabilnostno analizo sem izvedel s programom AceGirder. Določil sem kritični moment bočne zvrnitve nosilca M_{cr}^{FEM} . Naredil sem primerjavo za prostoležeči nosilec med satastim nosilcem s heksagonalnimi odprtinami (CAB) in polnostenskim I nosilcem. Oba nosilca imata enake materialne parametre:

Elastični modul (E): 21000 kN/cm^2

Poissonov koeficient (ν): 0,30

Meja plastičnosti (f_y): $35,5 \text{ kN/cm}^2$

Geometrijski parametri za satasti nosilec in polnostenski I nosilec so naslednji:

- Satasti nosilec s heksagonalnimi odprtinami (CAB)

$$h = 40\text{cm}$$

$$t_w = 0,86\text{cm}$$

$$t_f = 1,35\text{cm}$$

$$b = 18\text{cm}$$

$$L = 800\text{cm}$$

$$w = 15\text{cm}$$

$$s = 10\text{cm}$$

$$c = 10\text{cm}$$

- Polnostenski I nosilec

$$h = 60\text{cm}$$

$$t_w = 0,86\text{cm}$$

$$t_f = 1,35\text{cm}$$

$$b = 18\text{cm}$$

$$L = 800\text{cm}$$

Za referenčno obtežbo sem vzel isto zvezno obtežbo za MSN pri satastem nosilcu (CAB) in pri polnostenskem I nosilcu $q_{Ed} = 0,7576 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}$. Prijemališče zvezne obtežbe je na vrhu prereza. Pri stabilnostni analizi je upoštevana teorija drugega reda, za mrežo končnih elementov sem vzel 9 vozliščni izoparametrični element. Za primerjavo med rezultati za satasti nosilec in polnostenski nosilec sem dal v vhodne podatke bočno podpiranje zgornje pasnice na naslednjih dolžinah:

$$L_C = L = 800\text{cm}$$

$$L_C = \frac{L}{2} = 400\text{cm}$$

$$L_C = \frac{L}{3} = 267\text{cm}$$

$$L_C = \frac{L}{4} = 200\text{cm}$$

$$L_C = \frac{L}{5} = 167\text{cm}$$

$$L_C = \frac{L}{6} = 100\text{cm}$$

Pri primerjavi kritičnih momentov bočne zvrnitve med izračunanim M_{cr} po Evrokodu in

M_{cr}^{FEM} po MKE iz programa uporabim naslednji izraz:

$$q_{cr} = \frac{\gamma_{crit}^{FEM} \cdot q_{Ed}}{\gamma_{Mo}}$$

$$M_{cr}^{FEM} = \frac{q_{cr} \cdot \gamma_{crit}}{8}$$

kjer je:

q_{cr} kritična obtežba;

γ_{crit}^{FEM} kritični obtežni faktor po metodi končnih elementov;

M_{cr}^{FEM} kritični moment bočne zvrnitve po metodi končnih elementov.

Preglednica 2: Rezultati stabilnostne analize za satasti nosilec s heksagonalnimi odprtinami

Kritični moment za uklonsko obliko	$L_c = L = 800cm$		$L_c = L/2 = 400cm$	
	Gostota mreže končnih elementov		Gostota mreže končnih elementov	
	1	3	1	3
$M_{cr,1}^{FEM}$ [kNcm]	17319,843	12127,7647	45683,886	37522,133
$M_{cr,2}^{FEM}$ [kNcm]	39044,425	23566,583	98200,828	72652,394
$M_{cr,3}^{FEM}$ [kNcm]	55448,545	24860,362	136980,251	77445,834
$M_{cr,4}^{FEM}$ [kNcm]	58648,480	26016,416	146259,225	80331,894
$M_{cr,5}^{FEM}$ [kNcm]	65748,059	29139,518	173341,524	91571,0420
Kritični moment za uklonsko obliko	$L_c = L/3 = 267cm$		$L_c = L/4 = 200cm$	
	Gostota mreže končnih elementov		Gostota mreže končnih elementov	
	1	3	1	3
$M_{cr,1}^{FEM}$ [kNcm]	115059,843	80663,738	187181,747	131144,802
$M_{cr,2}^{FEM}$ [kNcm]	176300,321	94924,029	196414,769	138795,956
$M_{cr,3}^{FEM}$ [kNcm]	179997,140	99275,0224	233429,893	153482,487
$M_{cr,4}^{FEM}$ [kNcm]	200404,527	102993,488	238171,257	162886,424
$M_{cr,5}^{FEM}$ [kNcm]	205124,408	108968,776	253713,573	164255,559
Kritični moment za uklonsko obliko	$L_c = L/5 = 167cm$		$L_c = L/6 = 100cm$	
	Gostota mreže končnih elementov		Gostota mreže končnih elementov	
	1	3	1	3
$M_{cr,1}^{FEM}$ [kNcm]	259047,481	202407,446	646670,874	514588,587
$M_{cr,2}^{FEM}$ [kNcm]	283664,026	211046,753	692267,485	530926,08

se nadaljuje...

...nadaljevanje

$M_{cr,3}^{FEM}$ [kNcm]	309984,060	226166,752	747157,968	567281,182
$M_{cr,4}^{FEM}$ [kNcm]	323770,360	243352,271	789154,949	610164,979
$M_{cr,5}^{FEM}$ [kNcm]	342136,200	246049,085	826095,767	614860,887

Preglednica 3: Rezultati stabilnostne analize za polnostenski I nosilec

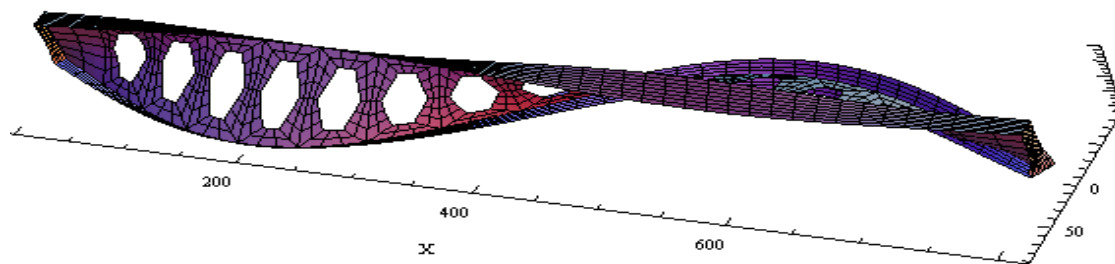
Kritični moment za uklonsko obliko	$L_c = L = 800cm$		$L_c = L/2 = 400cm$	
	Gostota mreže končnih elementov		Gostota mreže končnih elementov	
	1	3	1	3
$M_{cr,1}^{FEM}$ [kNcm]	32899,962	31629,193	72898,090	61874,707
$M_{cr,2}^{FEM}$ [kNcm]	72816,876	61794,098	228457,007	126248,888
$M_{cr,3}^{FEM}$ [kNcm]	227130,904	127194,979	313587,610	228638,831
$M_{cr,4}^{FEM}$ [kNcm]	310460,237	227465,46	1134599,942	309246,865
$M_{cr,5}^{FEM}$ [kNcm]	1431185,190	356607,774	1557692,269	519362,680
Kritični moment za uklonsko obliko	$L_c = L/3 = 267cm$		$L_c = L/4 = 200cm$	
	Gostota mreže končnih elementov		Gostota mreže končnih elementov	
	1	3	1	3
$M_{cr,1}^{FEM}$ [kNcm]	217963,338	117871,650	265526,072	202320,413
$M_{cr,2}^{FEM}$ [kNcm]	296283,420	218480,930	1064864,378	308980,796
$M_{cr,3}^{FEM}$ [kNcm]	1247918,720	355776,839	1242960,986	513929,779
$M_{cr,4}^{FEM}$ [kNcm]	1950541,203	517123,214	2940772,890	693428,250
$M_{cr,5}^{FEM}$ [kNcm]	3047752,070	625250,310	3208284,480	892670,989

se nadaljuje...

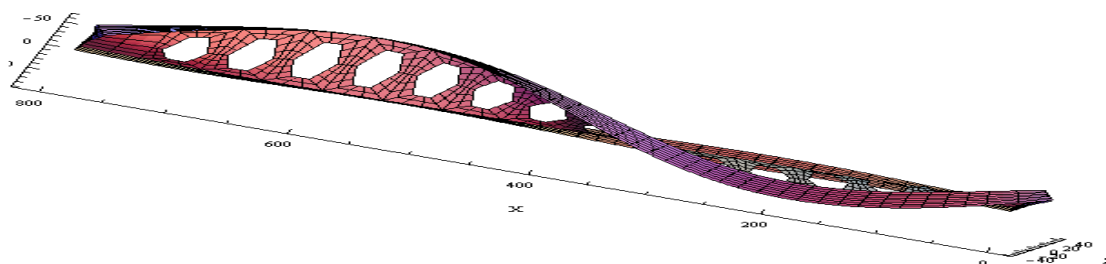
...nadaljevanje

Kritični moment za uklonsko obliko	$L_c = L/5 = 167cm$		$L_c = L/6 = 100cm$	
	Gostota mreže končnih elementov		Gostota mreže končnih elementov	
	1	3	1	3
$M_{cr,1}^{FEM}$ [kNcm]	1234221,312	288269,8304	1237500,205	737405,414
$M_{cr,2}^{FEM}$ [kNcm]	1606996,877	453881,1904	1796148,384	971012,890
$M_{cr,3}^{FEM}$ [kNcm]	2570245,882	584589,0093	3087413,946	1077004,160
$M_{cr,4}^{FEM}$ [kNcm]	3069140,634	876100,7616	4232008,147	1247979,328
$M_{cr,5}^{FEM}$ [kNcm]	3655026,048	1098756,371	4394189,094	1418778,733

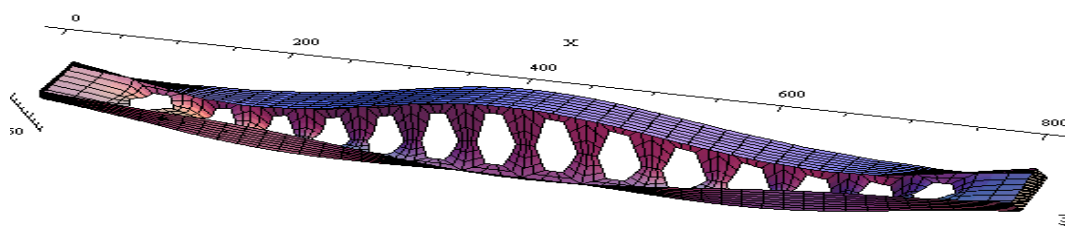
Pri primerjavi rezultatov stabilnostne analize med satastim in polnostenskim nosilcem iz Preglednice 2 je ugotovljeno, da je merodajna 1. uklonska oblika za prostoležeč satasti nosilec, glede na razporeditev bočnih podpor. Glede na zgoščevanje mreže končnih elementov se vrednost kritičnega momenta M_{cr}^{FEM} pri bočni zvrnitvi zmanjšuje. Razlika med kritičnim momentom za bočno zvrnitev, izračunanim po Evrokodu M_{cr} z vrednostjo $M_{cr} = 152902kNcm$ in izračunanim M_{cr}^{FEM} za razmak med bočnimi podporami 200cm je 65%. Za izbran statični sistem prostoležečega nosilca med izbranim satastim nosilcem in polnostenskim I nosilcem je razlika kritičnih momentov bočne zvrnitve 45%. To bi pomenilo, da je metoda numerične analize za satasti nosilec za izračun M_{cr}^{FEM} dobra, glede nato, da je vzeta iz metode izračuna za polnostenski I nosilec. Na Sliki 84, Sliki 85, Sliki 86, Sliki 87, Sliki 88, Sliki 89, Sliki 92 in Sliki 93 so prikazane uklonske oblike za satasti nosilec za 9 vozliščni izoparametrični elementa izbrano gostoto mreže 3. Na Sliki 90 in Sliki 91 sta prikazani uklonski obliki za 9 vozlišči izoparametrični element za polnostenski I nosilec za izbrano gostoto mreže 3.



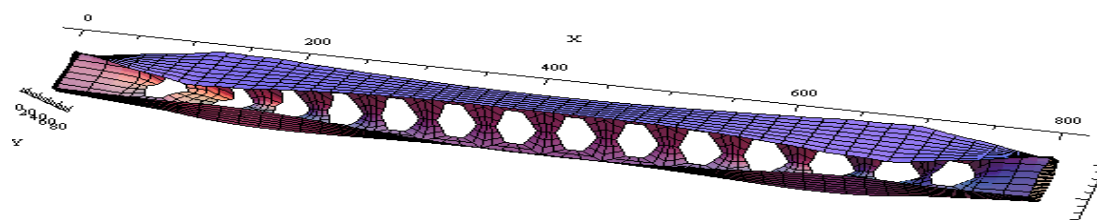
Slika 84: 1. uklonska oblika za satasti nosilec z bočnim podpiranjem zgornje pasnice na 800cm



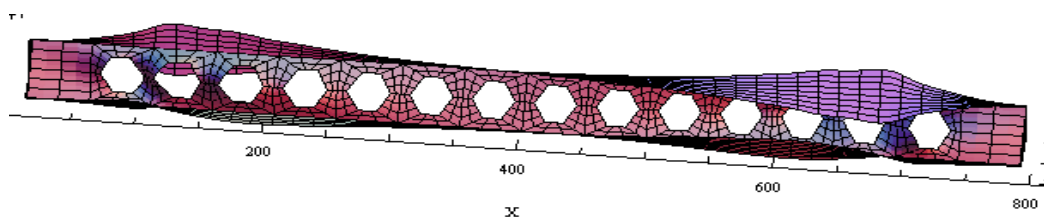
Slika 85: 1. uklonska oblika za satasti nosilec z bočnim podpiranjem zgornje pasnice na 400cm



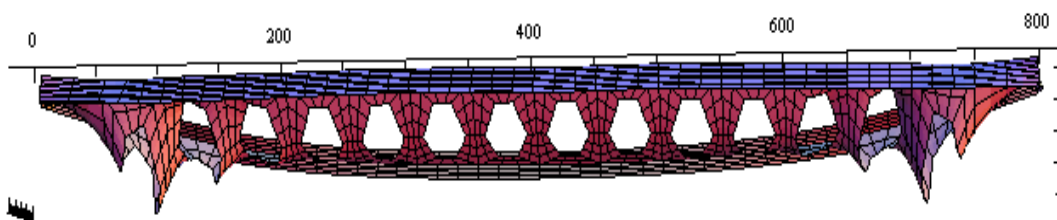
Slika 86: 1. uklonska oblika za satasti nosilec z bočnim podpiranjem zgornje pasnice na 267cm



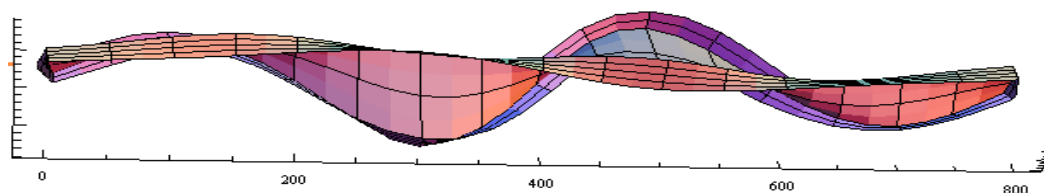
Slika 87: 1. uklonska oblika za satasti nosilec z bočnim podpiranjem zgornje pasnice na 200cm



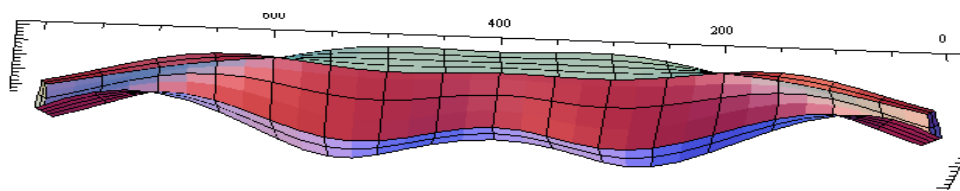
Slika 88: 2. uklonska oblika za satasti nosilec z bočnim podpiranjem zgornje pasnice na 200cm



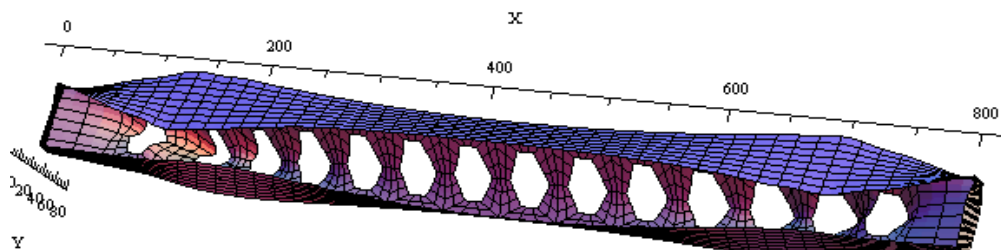
Slika 89: 3. uklonska oblika za satasti nosilec z bočnim podpiranjem zgornje pasnice na 200cm



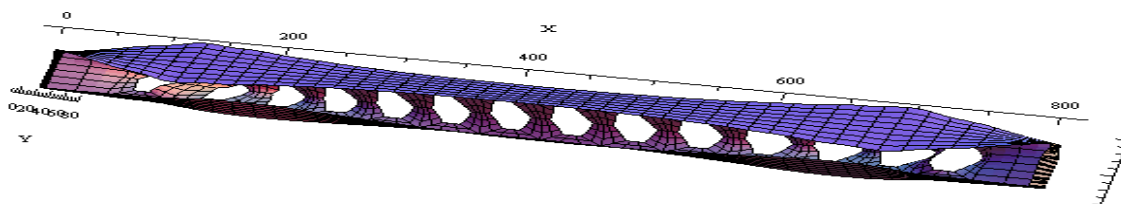
Slika 90: 1. uklonska oblika za polnostenski nosilec z bočnim podpiranjem zgornje pasnice na 200cm



Slika 91: 2. uklonska oblika za polnostenski nosilec z bočnim podpiranjem zgornje pasnice na 200cm



Slika 92: 1. uklonska oblika za satasti nosilec z bočnim podpiranjem zgornje pasnice na 167cm



Slika 93: 1. uklonska oblika za satasti nosilec z bočnim podpiranjem zgornje pasnice na 100cm

14.11 Mejna nosilnost pri dani obtežbi

Kontrolo mejne nosilnosti pri dani obtežbi se dela s programom AceGirder s predpostavko, da je material za primer majhnih in velikih deformacij elasto - plastičen. Za obtežbo satastega nosilca za MSN sem vzel obtežbo $q_{Ed} = 0,7576 \frac{kN}{cm}$. Za primerjavo mejne nosilnosti sem vzel vrednosti upogibne in strižne nosilnosti od izbranega satastega nosilca s heksagonalnimi odprtinami s elastičnimi karakteristikami prereza z odprtino. Za primerjavo upogibne nosilnosti za satasti nosilec sem vzel odpornostni moment za del stojine z odprtino $W_{o,y}$, glej prerez 1-1 na Sliki 74.

$$M_{O,Rd} = W_{o,y} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{Mo}} = 1756,47 cm^3 \cdot \frac{35,5 \frac{kN}{cm^2}}{1,0} = 62354,56 kNcm$$

Za primerjavo vzamem odpornostni moment polnega dela stojine satastega nosilca M_{Rd} , glej prerez 2-2 na Sliki 74.

$$M_{Rd} = W_y \cdot \frac{f_y}{\gamma_{Mo}} = 1909,37 cm^3 \cdot \frac{35,5 \frac{kN}{cm^2}}{1,0} = 67782,75 kNcm$$

Pri projektni strižni nosilnosti za satasti nosilec upoštevam, da sta nad in pod odprtino dva T prereza, glej prerez 1-1 na Sliki 74. Strižna nosilnost obeh T prerezov nad in pod odprtino

$V_{T,O,Rd}$ znaša:

$$V_{T,O,Rd} = \frac{A_{TV} \cdot f_y}{\sqrt{3}} + \frac{A_{TV} \cdot f_y}{\sqrt{3}} = \frac{8,94 cm^2 \cdot 35,5 kN/cm^2}{\sqrt{3}} + \frac{8,94 cm^2 \cdot 35,5 kN/cm^2}{\sqrt{3}} = 366,46 kN$$

Za prerez polne stojine satastega nosilca znaša projektna strižna nosilnost V_{Rd} :

$$V_{Rd} = \frac{A_V \cdot f_y}{\sqrt{3}} = \frac{1,04 \cdot h_n \cdot t_w \cdot f_y}{\sqrt{3}} = \frac{1,04 \cdot h_n \cdot t_w \cdot f_y}{\sqrt{3}} =$$
$$= \frac{1,04 \cdot 60\text{cm} \cdot 0,86\text{cm} \cdot 35,5\text{kN/cm}^2}{\sqrt{3}} = 1099,89\text{kN}$$

Pri računu mejne obtežbe vzamem mejni obtežni faktor γ_u^{FEM} , ki ga dobim v izpisu iz programa.

$$q_{Rd} = \frac{\gamma_u^{FEM} \cdot q_{Ed}}{\gamma_{Mo}}$$

Za izračun upogibne nosilnosti v Preglednici 4 in Preglednici 5 vzamem za izračun projektne upogibne nosilnosti naslednji izraz:

$$M_{Rd}^{FEM} = \frac{q_{Rd} \cdot L^2}{8}$$

Za izračun strižne nosilnosti v Preglednici 6 in Preglednici 7 vzamem za izračun strižne nosilnosti naslednji izraz:

$$V_{Rd}^{FEM} = \frac{q_{Rd} \cdot L}{2}$$

Kjer je:

γ_u^{FEM} mejni obtežni faktor z upoštevanjem geometrijske in materialne imperfektnosti po metodi končnih elementov;

q_{Rd} mejna obtežba;

M_{Rd}^{FEM} mejna upogibna nosilnost po metodi končnih elementov;

V_{Rd}^{FEM} mejna strižna nosilnost po metodi končnih elementov.

Pri računu začetnih geometrijskih nepopolnostih sem vzel $e_o = 40\text{mm}$. Pri primerjavi sem v programu vzel 9 vozliščni izoparametrični element.

Preglednica 4: Vrednosti mejne upogibne nosilnosti M_{Rd}^{FEM} brez upoštevanja nepopolnosti

Gostota mreže	Majhne deformacije (brez upoštevanja nepopolnosti)		Velike deformacije (brez upoštevanja nepopolnosti)	
	γ_u^{FEM}	M_{Rd}^{FEM} [kNcm]	γ_u^{FEM}	M_{Rd}^{FEM} [kNcm]
1	1,1946	72402,32	1,1155	67609,44
3	1,1044	66936,69	1,1002	66679,1

Preglednica 5: Vrednosti mejne upogibne nosilnosti M_{Rd}^{FEM} z upoštevanjem nepopolnosti

Gostota mreže	Majhne deformacije (z upoštevanjem nepopolnosti)		Velike deformacije (z upoštevanjem nepopolnosti)	
	γ_u^{FEM}	M_{Rd}^{FEM} [kNcm]	γ_u^{FEM}	M_{Rd}^{FEM} [kNcm]
1	1,1029	66844,56	1,099	66656,07
3	1,0420	63153,54	1,006	60971,65

Primerjava mejne upogibne nosilnosti M_{Rd}^{FEM} , katerih vrednosti se dobi z numerično analizo po MKE in vrednosti izračunane projektne upogibne nosilnosti za prerez z odprtino $M_{O,Rd}$ pokaže, da so vrednosti M_{Rd}^{FEM} nekoliko višje od $M_{O,Rd}$, ker so vrednosti upogibne nosilnosti iz programa pri elasto-plastični analizi M_{Rd}^{FEM} nekoliko višje. Pri vrednosti upogibne nosilnosti $M_{O,Rd}$ je vzeta elastična upogibna nosilnost prereza. Pri kriteriju upoštevanja geometrijskih nepopolnosti so vrednosti M_{Rd}^{FEM} manjše od upogibne nosilnosti M_{Rd}^{FEM} brez upoštevanja geometrijskih nepopolnosti.

Preglednica 6: Vrednosti mejne strižne nosilnosti V_{Rd}^{FEM} brez upoštevanja nepopolnosti

Gostota mreže	Majhne deformacije (brez upoštevanja nepopolnosti)		Velike deformacije (brez upoštevanja nepopolnosti)	
	γ_u^{FEM}	V_{Rd}^{FEM} [kN]	γ_u^{FEM}	V_{Rd}^{FEM} [kN]
1	1,1946	334,28	1,1155	338,05
3	1,1044	333,28	1,1002	333,40

Preglednica 7: Vrednosti mejne strižne nosilnosti V_{Rd}^{FEM} z upoštevanjem nepopolnosti

Gostota mreže	Majhne deformacije (z upoštevanjem nepopolnosti)		Velike deformacije (z upoštevanjem nepopolnosti)	
	γ_u^{FEM}	V_{Rd}^{FEM} [kN]	γ_u^{FEM}	V_{Rd}^{FEM} [kN]
1	1,1029	334,22	1,099	333,28
3	1,0420	315,76	1,006	304,85

Primerjava mejne strižne nosilnosti V_{Rd}^{FEM} s projektno strižno nosilnostjo $V_{T,O,Rd}$ pokaže, da so vrednosti dobljene z numerično analizo relativno manjše od $V_{T,O,Rd}$. Simulacija s programom je pokazala, da bo do porušitve v satastemu nosilcu prišlo zaradi vpliva upogibnega momenta na nosilcu in ne zaradi vpliva prečne sile.

14.12 Statična analiza pri dani obtežbi

Pri statični obtežbi za dano obtežbo za MSU $q_{Ed} = 0,5412 \frac{kN}{cm}$ sem opazoval velikost pomikov u_z glede na gostoto mreže končnih elementov. Za primerjavo sem vzel prostoležeči polnostenski I nosilec in satasti nosilec s heksagonalnimi odprtinami. Oba nosilca premoščata razpon 800 cm. V Preglednici 8 in Preglednici 9 so podani pomiki u_z^{FEM} iz analize metode končnih elementov iz programa, za izbrano gostoto mreže končnih elementov in izbrano vrsto statične analize. Uporabljen je 9-vozliščni izoparametrični element.

Preglednica 8: Vrednost pomikov u_z^{FEM} za statično analizo za satasti nosilec s heksagonalnimi odprtinami

Gostota mreže končnih elementov	Pomik u_z^{FEM} [cm], dosežen v točki (x,y,z)	Statična analiza pri dani obtežbi			
		Elastična, Majhne def.	Elastična, Velike def.	Plastična, Majhne def.	Plastična, Velike def.
1	Pomik u_z^{FEM}	2,83026	2,82753	2,83026	2,82753
	V točki	(4000,0,146.625)	(4000,0,146.625)	(4000,0,146.625)	(4000,0,146.625)
3	Pomik u_z^{FEM}	2,94183	2,93906	2,94418	2,9414
	V točki	(4000,0,146.625)	(4000,0,146.625)	(4000,0,146.625)	(4000,0,146.625)

Preglednica 9: Vrednost pomikov u_z^{FEM} za statično analizo za polnostenski I nosilec

Gostota mreže končnih elementov	Pomik u_z^{FEM} [cm] dosežen v točki (x,y,z)	Statična analiza pri dani obtežbi			
		Elastična, Majhne def.	Elastična, Velike def.	Plastična, Majhne def.	Plastična, Velike def.
1	Pomik u_z^{FEM}	2,49534	2,49305	2,49534	2,49305
	V točki	(4000,0,0)	(4000,0,0)	(4000,0,0)	(4000,0,0)
3	Pomik u_z^{FEM}	2,55512	2,5528	2,55512	2,5528
	V točki	(4000,0,0)	(4000,0,0)	(4000,0,0)	(4000,0,0)

Z zgostitvijo mreže se povečuje velikost pomikov u_z^{FEM} , glede na obravnavano statično analizo pri dani obtežbi. Primerjava pomikov med satastim nosilcem in polnostenskim I nosilcem pokaže, da so pomiki, pri dani obtežbi za MSU pri satastemu nosilcu večji od pomikov pri polnostenskem nosilcu. Na to pa vplivajo odprtine v stojini, ki povečujejo velikost pomikov. Maksimalna vrednost pomika v obeh nosilcih se pričakuje na oddaljenosti 400 cm od koordinatnega izhodišča, ne glede na izbrano vrsto analize. Statična analiza je pokazala, da je vrednost pomikov u_z^{FEM} izračunanih s programom z izbrano analizo relativno podobna vrednosti pomika $\delta_{max,SN} = 2,94\text{cm}$, ki je izračunan po analitičnem modelu iz poglavja 12.2.3.

14.13 Primerjava med analitičnimi in numeričnimi rezultati nosilnosti na satastemu nosilcu

V Preglednici 10 je narejena primerjava rezultatov nosilnosti na izbranem satastemu nosilcu s heksagonalnimi odprtinami. V Preglednici 10 so napisane rezultati nosilnosti za MSN in MSU, ki so bile izračunane na poenostavljenemu računskemu modelu Vierendeelovega nosilca ter rezultati stabilnostne analize, analize mejnega stanja nosilnosti in statične analize. Vrednosti v Preglednici 10 so za rezultate numerične analize vzeti rezultati pri mreži gostote 3 za 9 vozliščni izoparametrični element.

Preglednica 10: Primerjava rezultatov nosilnosti izračunanih na Vierendeelovemu nosilcu po Evrokodu in na 3D modelu po metodi končnih elementov

Primerjava rezultatov nosilnosti	Analiza nosilnosti na Vierendeelovemu nosilcu	3D numerična analiza po metodi končnih elementov	
Elastični kritični moment bočne zvrnitve satastega nosilca z razdaljo med bočnimi podporami 200cm	$M_{cr} = 148263kNcm$	Kritični moment za 1. uklonsko obliko	$M_{cr,1}^{FEM} = 131144,802kNcm$
Upogibna nosilnost satastega nosilca	$M_{O,Rd} = 62354,56kNcm$	Brez upoštevanja nepopolnosti	
		Majhne deformacije	$M_{Rd}^{FEM} = 66936,69kNcm$
		Velike deformacije	$M_{Rd}^{FEM} = 66679,1kNcm$
		Z upoštevanjem nepopolnosti	
		Majhne deformacije	$M_{Rd}^{FEM} = 63153,54kNcm$
		Velike deformacije	$M_{Rd}^{FEM} = 60971,65kNcm$
Strižna nosilnost satastega nosilca	$V_{T,O,Rd} = 366,46kN$	Brez upoštevanja nepopolnosti	
		Majhne deformacije	$V_{Rd}^{FEM} = 333,28kN$
		Velike deformacije	$V_{Rd}^{FEM} = 333,40kN$
		Z upoštevanjem nepopolnosti	
		Majhne deformacije	$V_{Rd}^{FEM} = 315,76kN$
		Velike deformacije	$V_{Rd}^{FEM} = 304,85kN$
Vertikalni pomiki satastega nosilca	$\delta_{max,SN} = 2,94cm$	Elastičen material, majhne deformacije	$u_z^{FEM} = 2,94183cm$
		Elastičen material, velike deformacije	$u_z^{FEM} = 2,93906cm$

15 ZAKLJUČEK

V diplomskem delu so predstavljene metode dokazovanja nosilnosti za jeklene nosilce z lokalnimi odprtini in za jeklene sataste nosilce. Dokazovanje nosilnosti nosilcev z odprtini se dela po standardu ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N in z ustrežno literaturo, ki sem jo predstavil v diplomskem delu. Predstavljene metode za dokazovanje nosilnosti veljajo za valjane nosilce in varjene nosilce z odprtini. To dokazovanje nosilnosti ne pokriva jeklenih sovprežnih nosilcev z odprtini, kontinuiranih nosilcev z odprtini in določanja požarne odpornosti nosilcev z odprtini. Poleg dokazovanja nosilnosti nosilcev z odprtini je bil cilj diplomske naloge narediti program za numerično analizo nosilcev. Računalniški program za numerično analizo AceGirder omogoča stabilnostno analizo, analizo mejnega stanja nosilnosti in statično analizo. Za potrebe numeričnih analiz nosilcev z odprtini sem za analizo naredil programske kode za nosilce z enojnimi odprtini, nosilce z večimi odprtini in za sataste nosilce. Preko vhodnih podatkov za geometrijo nosilca se modelira mreža končnih elementov in analizira nosilec. Za tem pa stoji programska koda za analizo in grafični prikaz nosilca z odprtini. V programu je uporabniku omogočeno, da si izbere tip odprtini in vnese zahtevane geometrijske parametre, poda ustrezne podporne pogoje, obtežbe, upošteva geometrijske nepopolnosti in izbere vrsto analize.

Izvedel sem tudi dokazovanje nosilnosti za MSN in MSU za izbrani satasti nosilec s heksagonalnimi odprtini po standardu ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annexe N in standardu SIST EN 1993-1-1:2005. Ta metoda je zelo konzervativna, saj se dokazovanje nosilnosti dela na najvišji in najnižji točki višine odprtine, s tem pa smo na varni strani. Pri kontroli bočne zvrnitve je ugotovljeno, da imajo odprtine majhen vpliv na M_{cr} , imajo pa večjega na projektno upogibno nosilnost pri bočni zvrnitvi, saj se kontrolira najbolj oslabljeni prerez. Primerjava izračuna po Evrokodu in numerični analizi je pokazala, da ima vpliv odprtini majhen vpliv na M_{cr} . Razlika med izračunanim M_{cr}^{FEM} s programom AceGirder po MKE in M_{cr} izračunanim z upoštevanjem odprtini po Evrokodu je relativno majhna. Primerjava pomikov za izbrani satasti nosilec poda rezultat, da so pomiki izračunani z numerično analizo u_z^{FEM} relativno podobni v primerjavi s pomikom, izračunanim po virtualnem delu.

VIRI

Uporabljeni viri

ACB® Cellular Beams

http://www.arcelormittal.com/sections/fileadmin/redaction/pdf/Brochures/ACB_EN.pdf

(9.8.2009)

Beg, D. 1999. Projektiranje jeklenih konstrukcij po evropskem predstandardu ENV 1993-1-1. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 219 str.

Boyer, J.P. 1964. Castellated beams-new developments. Engineering Journal. AISC 3: 104-108.

<http://www.arch.mcgill.ca/prof/sijpkcs/U2-winter-2008/presentation-turcot/repairs/beam-solution/Castellated%20Beams%20-%20New%20Developments.pdf> (9.8.2009)

Dawison, B., Owens, G.W. 2003. Steel Designer's Manual 6th Edition. Great Britain, Steel Construction Institute: 1337 str.

Demirdjian, S. 1999. Stability of castellated beam webs. Montreal, University Mcgrill, Department of Civil Engenering and Applied Mehanics: 88 str.

http://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk1/tape8/PQDD_0026/MQ50601.pdf

(23.10.2009)

Dervinis, B., Kazimieras - Kvedaras, A. 2008. Investigation of rational depth of castellated steel I – beams. V: Journal of Civil Engineering and Management 14(3), Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania: str. 163-168.

http://www.jcem.vgtu.lt/upload/civil_zurn/dervinis%20and%20kvedaras.pdf (1.2.2010)

ENV 1993: Eurocode 3: Design of steel structures-1-1: General rules and rules for buildings, november 1992.

ENV 1993: Eurocode 3: Calcul des structures en acier - Annexe N: Ouvertures dans les âmes -1-1 partie: Règles générales et règles pour les bâtiments, septembre 2002 /A2:1998.

Feldmann, M., Müller, C., Hechler, O., Bureau, A., Cajot, L.G., Vassart, O., Lawson, R.M., Hicks S., Johansson, B., Veljkovic, M. 2006a. State of the art and special cases of the design of cellular beams. V: Large web openings for service integration in composite floors, RFCS - Research Fund for Coal and Steel, 1. July – 31. December 2006. Aachen, Germany: 86 str.
http://lwo.steel-sci.org/Manual/State-of-the-art-report_English-version_RFS2-CT-2005-00037_LWO+.pdf (22.9.2010)

Feldmann, M., Müller, C., Hechler, O., Bureau, A., Cajot, L.G., Vassart, O., Lawson, R.M., Hicks S., Johansson, B., Veljkovic, M. 2006b. Manufacturing Report. V: Large web openings for service integration in composite floors, RFCS - Research Fund for Coal and Steel, 1. July – 31. December 2006. Aachen, Germany: 34 str.
http://lwo.steel-sci.org/Manual/Manufacturing-report_English-version_RFS2-CT-2005-00037_LWO+.pdf (20.9.2009)

Feldmann, M., Müller, C., Hechler, O., Bureau, A., Cajot, L.G., Vassart, O., Lawson, R.M., Hicks S., Johansson, B., Veljkovic, M. 2006c. Design Guide. V: Large web openings for service integration in composite floors, RFCS - Research Fund for Coal and Steel, 1. July – 31. December 2006. Aachen, Germany: 80 str.
http://lwo.steel-sci.org/Manual/Design-guide_English-version_RFS2-CT-2005-00037_LWO+.pdf (29.9.2009)

Feldmann, M., Müller, C., Hechler, O., Bureau, A., Cajot, L.G., Vassart, O., Lawson, R.M., Hicks S., Johansson, B., Veljkovic, M. 2006d. Eurocode design method for composite beams with web openings. V: Large web openings for service integration in composite floors, RFCS - Research Fund for Coal and Steel, 1. July – 31. December 2006. Aachen, Germany: 20 str.
http://lwo.steel-sci.org/Manual/Proposed-Annex-N_English-version_RFS2-CT-2005-00037_LWO+.pdf (22.9.2009)

Kržič, F. 1994. Jeklene konstrukcije I. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo in geodezijo: str.137-138.

Lotfollahi-Yaghin, M. A., Ahmadi., H. 2008. Investigation of Dynamic Properties of Cantilever Castellated Beams in Comparison with Plain-webbed Beams using White Noise

Excitation. V: World Applied Sciences Journal 3 (3), IDOSI Publications: str. 522-530.
<http://idosi.org/wasj/wasj3%283%29/22.pdf> (9.8.2009)

Mitchell, S., Heywood, M., Hawkins, G. 2003. Services Co-ordination with Structural Beams: Guidance for a defect-free interface. BSRIA, SCI, The Chameleon Press: 34 str.
<http://www.hfs.scot.nhs.uk/publications/iep2-2003.pdf> (27.9.2009)

Poutrelle Angelina™ L'alchimie réussie entre résistance, légèreté et transparence
http://www.arcelormittal.com/sections/fileadmin/redaction/pdf/Brochures/Angelina_FR.pdf
(15.1.2010)

Radić, I., Markulak, D. 2007. Lateral buckling of castellated beams. V: Bočno izvijanje sačastih nosača. Tehnički vjesnik 14: str. 25-35.
<http://hrcak.srce.hr/13510> (9.8.2009)

Raftoyiannis, I. G., Ioannidis, G. I. 2006: Deflection of Castellated I – Beams under Transverse Loading. V: Steel Structures 6: str. 31–36.
http://www.ceric.net/kssc/KSSC_3_2006_6_1_31%28C%29.pdf (1.2.2010)

Showkati, H. 2008. Lateral – torsional buckling of castellated beams, V: Iranian Journal of Science & Technology, Volume 32, Number B2: str. 153-156.
http://www.sid.ir/en/VEWSSID/J_pdf/8542008B209.pdf (1.2.2010)

SIST EN 1990: Evrokod: Osnove projektiranja konstrukcij(istoveten EN 1990:2000), september 2004.

SIST EN 1991: Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-1 del: Splošni vplivi – Prostorninske teže, lastna teža, koristne obtežbe stavb – Nacionalni dodatek, september 2004.

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

Tkalčević, V., Džeba, I., Androić, B. 2006a. Proračun sačastih nosača prema Eurokodu 3. V: Građevinar 58: str. 709-716.
<http://hrcak.srce.hr/file/10452> (14.10.2009)

Tkalčević, V., Džeba, I., Androić, B. 2007b. Pouzdanost sačastih nosača na bočno torzijsko izvijanje. V: Građevinar 59: str. 311-318.

<http://hrcak.srce.hr/file/19993> (24.11.2009)

Vassat, O., Poutrelle Angelina™ Une idée audacieuse adaptée à un produit industriel

http://www.arcelormittal.com/sections/uploads/tx_abdownloads/files/Poutrelle_Angelina_FR_Olivier_Vassart.pdf (28.11.2009)

Westok., 2008. Cellular Beam Design Guide.

<http://www.asdwestok.co.uk/Westok/Images/pdfs/FINAL%20REVISED%20EDG%20Website%20PDF.pdf> (4.1.2010)

Zanon, R., Vassart, O., Braun, M., Conan, Y., Brasseur, M. 2009: Angelina™ Predesign Charts: 19 str.

http://www.arcelormittal.com/sections/fileadmin/redaction/ARTICLES/DesignChartsAngelina_Presentation.pdf (24.10.2009)

Ostali viri

Proizvajalec satastih nosilcev Grünbauer BV:

<http://www.grunbauer.nl/eng/inhoud.htm>(30.4.2010)

Proizvajalec satastih nosilcev Macsteel:

<http://www.macsteel.co.za/cellbeam/service.htm>(30.4.2010)

Proizvajalec satastih nosilcev Westok:

<http://www.asdwestok.co.uk/>(30.4.2010)

Proizvajalec satastih nosilcev ArcelorMittal:

<http://www.arcelormittal.com>(30.4.2010)

Proizvajalec satastih nosilcev Fabsec:

<http://www.fabsec.co.uk/>(30.4.2010)

Proizvajalec satastih nosilcev CMC:

<http://www.cmcsteelproducts.com/>(30.4.2010)

Proizvajalec satastih nosilcev Peiner Träger:

<http://www.peiner-traeger.de/>(30.4.2010)

PRILOGE

Priloga A Stabilnostna analiza za nosilec z večimi okroglimi odprtinami

Priloga B Stabilnostna analiza za nosilec s pravokotno enojno odprtino

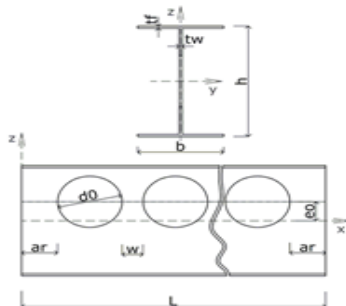
Priloga C Stabilnostna analiza za satasti nosilec s povišanimi odprtinami
oktagonalne oblike

Priloga D Vhodni parametri za tip odprtin Angelina v satastemu nosilcu

Priloga A Stabilnostna analiza za nosilec z večimi okroglimi odprtinami

VHODNI PODATKI

Prečni prerez nosilca: MCO



h: 40
b: 18
t_F: 1.35
t_w: 0.86
L: 800
d₀: 20
w: 15
ar: 25
e₀: 5

Materialni parametri:

El. modul (E): 21000
Poissonov koef. (ν): 0.3
Meja plastičnosti (f_y): 35.5

Podpore - preprečeni pomiki in zasuki (♦ → preprečen):

	Levo krajišče:	Desno krajišče:
U _x	♦	♦
U _y	♦	♦
U _z	♦	♦
ϕ _x	♦	♦
ϕ _y	♦	♦
ϕ _z	♦	♦

Deplanacija prerezov: ♦

Obtežba:

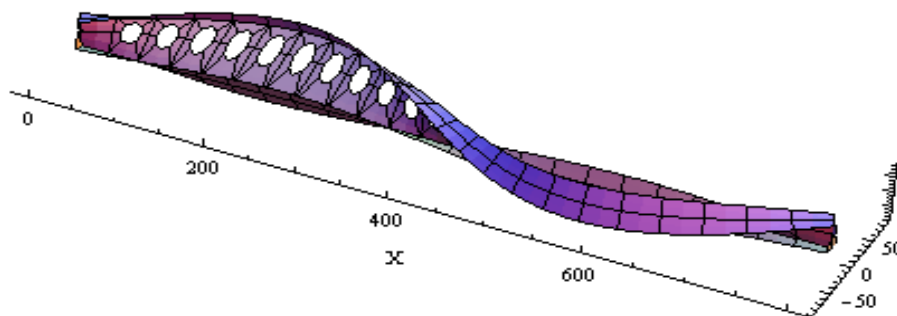
Zvezne sile:
Indeks obtežbe: 1
q_s: -0.7576
Prijemališče sile: vrh

PODATKI O ANALIZI

Izvedena analiza: stabilnostna (problem začetne nestabilnosti)
Material: elastičen Število elementov: 230
Kinematika: teorija drugega reda Število enačb: 6425
Formulacija elementa: 9 vozliščni izoparametrični

REZULTATI ANALIZE

Kritični obtežni faktorji: Y_{crit,1} = 0.770695
Y_{crit,2} = 1.70788
Y_{crit,3} = 2.96252
Y_{crit,4} = 4.0031
Y_{crit,5} = 4.13342

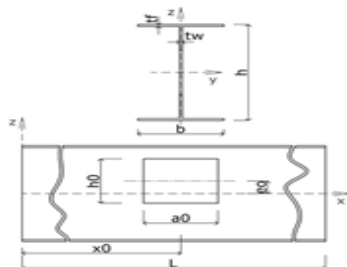


Slika: Prva uklonska oblika

Priloga B Stabilnostna analiza za nosilec s pravokotno enojno odprtino

VHODNI PODATKI

Prečni prerez nosilca: *SRSWO*



h: 40
b: 18
tw: 1.35
tw: 0.86
L: 800
x0: 250
h0: 25
a0: 40
e0: 5

Materialni parametri:

El. modul (E): 21000
Poissonov coef. (ν): 0.3
Meja plastičnosti (f_y): 35.5

Podpore - preprečeni pomiki in zasuki ($\diamond \rightarrow$ preprečen):

	Levo krajišče:	Desno krajišče:
Ux	\blacklozen	\diamond
Uy	\blacklozen	\blacklozen
Uz	\blacklozen	\blacklozen
θ_x	\blacklozen	\blacklozen
θ_y	\diamond	\diamond
θ_z	\diamond	\diamond
Deplanacija prerezov:	\diamond	\diamond

Obtežba:

Zvezne sile:
Indeks obtežbe: 1
 $q_x: -0.7576$
Prijemališče sile: vrh

PODATKI O ANALIZI

Izvedena analiza: *stabilnostna (problem začetne nestabilnosti)*

Material: *elastičen*

Kinematika: *teorija drugega reda*

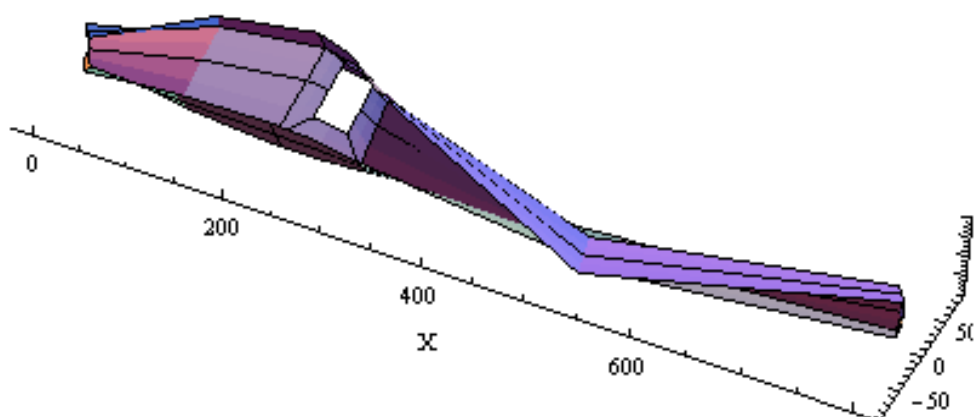
Formulacija elementa: *9 vozliščni izoparametrični*

Število elementov: 30

Število enačb: 785

REZULTATI ANALIZE

Kritični obtežni faktorji: $\gamma_{crit,1} = 1.21611$
 $\gamma_{crit,2} = 4.92445$
 $\gamma_{crit,3} = 10.7019$
 $\gamma_{crit,4} = 25.4923$
 $\gamma_{crit,5} = 29.0658$

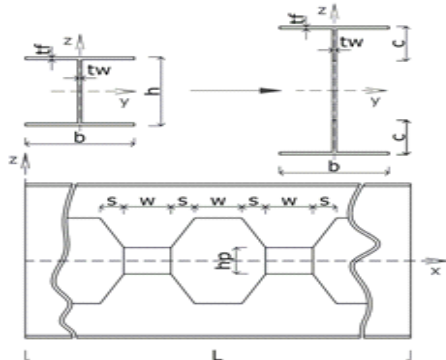


Slika: Prva uklonska oblika

Priloga C Stabilnostna analiza za satasti nosilec s povišanimi odprtinami oktagonalne oblike

VHODNI PODATKI

Prečni prerez nosilca: CABIP



h: 40
 b: 18
 t_f : 1.35
 t_w : 0.86
 L: 800
 w: 20
 s: 6
 c: 14
 hp: 10

Materialni parametri:

El. modul (E): 21000
 Poissonov coef. (ν): 0.3
 Meja plastičnosti (f_y): 35.5

Podpore - preprečeni pomiki in zasuki (♦ → preprečen):

	Levo krajišče:	Desno krajišče:
Ux	♦	◇
Uy	♦	♦
Uz	♦	♦
θ_x	♦	♦
θ_y	◇	◇
θ_z	◇	◇
Deplanacija prerezov:	◇	◇

Obtežba:

Zvezne sile:
 Indeks obtežbe: 1
 q_z : -0.7576
 Prijemališče sile: vrh

PODATKI O ANALIZI

Izvedena analiza: stabilnostna (problem začetne nestabilnosti)

Material: elastičen

Kinematika: teorija drugega reda

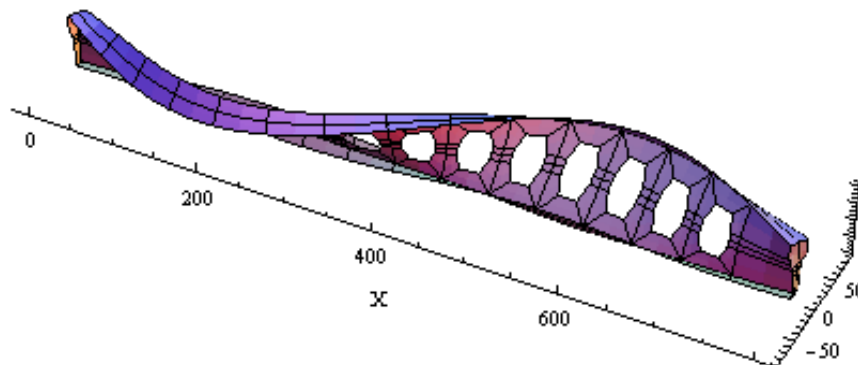
Formulacija elementa: 9 vozliščni izoparametrični

Število elementov: 214

Število enačb: 6033

REZULTATI ANALIZE

Kritični obtežni faktorji: $\gamma_{crit,1} = 1.05696$
 $\gamma_{crit,2} = 2.306$
 $\gamma_{crit,3} = 2.93455$
 $\gamma_{crit,4} = 3.09769$
 $\gamma_{crit,5} = 3.48881$



Slika: Prva uklonska oblika

Priloga D Vhodni parametri za tip odprtin Angelina v satastemu nosilcu

ANGELINA - Angelina (num. 9)

FEPInputInitialize

FEPMesh

FEPBoundar

FEPInputCheck

FEPAnalytical

```
FEPInputInitialize["Angelina"] := (AppendTo[FEPShortIDMenuView, {"Angelina", "Angelina"}];  
(*oznake, ki bojo na zavihku "viewTab"*)
```

```
AppendTo[FEPInputFields, {"h:",  
"h:"},{ "b:", "b:"},{ "tf:", "tf:"},{ "tw:", "tw:"},{ "L:", "L:"},{ "w:", "w:"}, {"ls:", "ls:"}];
```

```
AppendTo[FEPDefaultGeometricalConstants, {450., 170., 24., 16., 10000., 150., 500.}];  
AppendTo[FEPManualSection, ToFileName[{FEPDirectory, "SystemFiles"},  
"Manual_Angelina.nb"]];)
```

```
FEPMesh["Angelina"] := Module[{hPROF, bFLAN, tFLAN, tWEB, L, nEIWEBx, nEIWEBz,  
nEIFLANx, nEIFLANy, nEIWEBxw, nEIWEBzw, nEIFLANxw, nEIFLANyw, hT, w, p, hn, h0, a0,  
ls, n3, Tau, n, x, xA, yA, zA, xB, yB, zB, xC, yC, zC, k, m, f, teple, tepre},
```

```
{hPROF, bFLAN, tFLAN, tWEB, L, w, ls} = FEPGeometricalConstants[[Position[FEPShortID,  
FEPSection][[1, 1]], 1 ;; 7]];
```

```
teple = If[FEPBC[[1, 7]], FEPBC[[1, 8]], 0.1 tFLAN]; (*end plate thickness - left end*)  
tepre = If[FEPBC[[2, 7]], FEPBC[[2, 8]], 0.1 tFLAN]; (*end plate thickness - right end*)  
a0 = (2*hPROF) - 4*(tFLAN + 40); (*višina odprtine*)  
hn = a0 + (2*tFLAN) + (4*20); (*višina nosilca z odprtino*)  
hT = hn - tFLAN; (*višina profila med središnjima točkama pasnic / profile height between center of  
gravity of both flanges*)
```

```
FEPULSDiagramPoint = {L/2, 0., 0.};
```

```
FEPULSDomainsForSketch = {"UPflange", "web", "DOWNflange"};
```

```
FEPGirderDim = {L, hn};
```

```
(*Pomožni geometrijski parametri*)
```

```
p = (2*w) + (2*ls); (*vsote dolžine vzdolžnega reza w in dolžine poševnega \ reza po vzdolžni smeri ls  
po stojini nosilca*)
```

```
k = L - (2*p); (*skupna dolžina posameznih delov z odprtinami z dolžino p*)
```

```
m = Round[k/p]; (*število elementov z odprtinami na dolžini k*)
```

```
xA = 1/4*(L - m*p); (*središče krajnega levega dela nosilca brez odprtine z \ dolžino (L-m*p)/2*)
```

```
xC = xA + m*p + 1/2*(L - m*p); (*središče krajnega desnega dela nosilca brez odprtine z \ dolžino (L-  
m*p)/2*)
```

```
yA = 0; (*središče krajnega levega dela nosilca brez odprtine z \ dolžino (L-m*p)/2*)
```


$y_B = 0$; (*središče dela nosilca z odprtino, ki je sestavljena z delčki dolžine p^*)
 $y_C = 0$; (*središče krajnega desnega dela nosilca brez odprtine z \ dolžino $(L - m^*p)/2^*$)
 $z_A = 0$; (*središče krajnega levega dela nosilca brez odprtine z \ dolžino $(L - m^*p)/2^*$)
 $z_B = 0$; (*središče dela nosilca z odprtino, ki je sestavljena z delčki dolžine p^*)
 $z_C = 0$; (*središče krajnega desnega dela nosilca brez odprtine z \ dolžino $(L - m^*p)/2^*$)

$n_3 = 1$.; (*število s katerim določujem velikost kota vertikalno*)

$\tau = (n_3^2 \cdot \pi) / 360$;

$n = (1 \cdot \pi / 2) / \tau$;

(*Razdelitev št. končnih elementov glede na izbiro goste/srednje/redke mreže / discretization of the domain (with finite elements) as for choice /of rough/fine mesh*)

Switch[FEPnEI

, 1,

$n_{EIWEBx} = 1$; $n_{EIWEBz} = 1$; $n_{EIFLANx} = 1$; $n_{EIFLANy} = 1$;

$n_{EIWEBxw} = 1$; $n_{EIWEBzw} = 1$; $n_{EIFLANxw} = 1$; $n_{EIFLANyw} = 1$;

, 2,

$n_{EIWEBx} = 2$; $n_{EIWEBz} = 2$; $n_{EIFLANx} = 2$; $n_{EIFLANy} = 2$;

$n_{EIWEBxw} = 2$; $n_{EIWEBzw} = 2$; $n_{EIFLANxw} = 2$; $n_{EIFLANyw} = 2$;

, 3,

$n_{EIWEBx} = 3$; $n_{EIWEBz} = 3$; $n_{EIFLANx} = 3$; $n_{EIFLANy} = 4$;

$n_{EIWEBxw} = 2$; $n_{EIWEBzw} = 3$; $n_{EIFLANxw} = 2$; $n_{EIFLANyw} = 4$;

, 4,

$n_{EIWEBx} = 5$; $n_{EIWEBz} = 5$; $n_{EIFLANx} = 5$; $n_{EIFLANy} = 6$;

$n_{EIWEBxw} = 2$; $n_{EIWEBzw} = 5$; $n_{EIFLANxw} = 2$; $n_{EIFLANyw} = 6$;

, 5,

$n_{EIWEBx} = 7$; $n_{EIWEBz} = 7$; $n_{EIFLANx} = 7$; $n_{EIFLANy} = 6$;

$n_{EIWEBxw} = 3$; $n_{EIWEBzw} = 7$; $n_{EIFLANxw} = 3$; $n_{EIFLANyw} = 6$;

, 6,

$n_{EIWEBx} = 9$; $n_{EIWEBz} = 9$; $n_{EIFLANx} = 9$; $n_{EIFLANy} = 8$;

$n_{EIWEBxw} = 4$; $n_{EIWEBzw} = 9$; $n_{EIFLANxw} = 4$; $n_{EIFLANyw} = 8$;

];

SMTAddDomain[{"UPflange", FEPElement, Join[FEPMaterialPar, {"t *" -> tFLAN}]}],

{"web", FEPElement, Join[FEPMaterialPar, {"t *" -> tWEB}]}],

{"DOWNflange", FEPElement, Join[FEPMaterialPar, {"t *" -> tFLAN}]}],

{"endplateBEG", FEPElementEndPlate, Join[FEPEndPlateMaterialPar, {"t *" -> teple}]}],

{"endplateEND", FEPElementEndPlate, Join[FEPEndPlateMaterialPar, {"t *" -> tepre}]}]; (*note:
N, mm*)

SMTMesh["UPflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANx, nEIFLANy}, {{{xA - (L - m^*p)/4, yA - bFLAN/2, zA + hT/2}, {xA + (L - m^*p)/4, yA - bFLAN/2, zA + hT/2}}, {{{xA - (L - m^*p)/4, yA, zA + hT/2}, {xA + (L - m^*p)/4, yA, zA + hT/2}}}}];

SMTMesh["UPflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANx, nEIFLANy}, {{{xA - (L - m^*p)/4, yA, zA +

$hT/2$ }, $\{x_A + (L - m^*p)/4, y_A, z_A + hT/2\}$ }, $\{\{x_A - (L - m^*p)/4, y_A + bFLAN/2, z_A + hT/2\}, \{x_A + (L - m^*p)/4, y_A + bFLAN/2, z_A + hT/2\}\}$ };

SMTMesh["web", FEPCurrentTop, {nEIWEBx, nEIWEBz}, $\{\{x_A - (L - m^*p)/4, y_A, z_A\}, \{x_A - (L - m^*p)/4, y_A, z_A + hT/2\}\}$ }, $\{\{x_A + (L - m^*p)/4, y_A, z_A\}, \{x_A + (L - m^*p)/4, y_A, z_A + hT/2\}\}$ };

SMTMesh["web", FEPCurrentTop, {nEIWEBx, nEIWEBz}, $\{\{x_A + (L - m^*p)/4, y_A, z_A\}, \{x_A + (L - m^*p)/4, y_A, z_A - hT/2\}\}$ }, $\{\{x_A - (L - m^*p)/4, y_A, z_A\}, \{x_A - (L - m^*p)/4, y_A, z_A - hT/2\}\}$ };

SMTMesh["DOWNflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANx, nEIFLANy}, $\{\{x_A + (L - m^*p)/4, y_A - bFLAN/2, z_A - hT/2\}, \{x_A - (L - m^*p)/4, y_A - bFLAN/2, z_A - hT/2\}\}$,

$\{\{x_A + (L - m^*p)/4, y_A, z_A - hT/2\}, \{x_A - (L - m^*p)/4, y_A, z_A - hT/2\}\}$ };

SMTMesh["DOWNflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANx, nEIFLANy}, $\{\{x_A + (L - m^*p)/4, y_A, z_A - hT/2\}, \{x_A - (L - m^*p)/4, y_A, z_A - hT/2\}\}$ }, $\{\{x_A + (L - m^*p)/4, y_A + bFLAN/2, z_A - hT/2\}, \{x_A - (L - m^*p)/4, y_A + bFLAN/2, z_A - hT/2\}\}$ };

Do[SMTMesh["UPflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANxw, nEIFLANyw}, $\{\{x_B + p/2, y_B - bFLAN/2, z_B + hT/2\}, \{x_B + p/2 - w/2, y_B - bFLAN/2, z_B + hT/2\}\}$ }, $\{\{x_B + p/2, y_B, z_B + hT/2\}, \{x_B + p/2 - w/2, y_B, z_B + hT/2\}\}$];

SMTMesh["UPflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANxw, nEIFLANyw}, $\{\{x_B + p/2, y_B, z_B + hT/2\}, \{x_B + p/2 - w/2, y_B, z_B + hT/2\}\}$ }, $\{\{x_B + p/2, y_B + bFLAN/2, z_B + hT/2\}, \{x_B + p/2 - w/2, y_B + bFLAN/2, z_B + hT/2\}\}$ };

SMTMesh["UPflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANxw, nEIFLANyw}, $\{\{x_B - p/2 + w/2, y_B - bFLAN/2, z_B + hT/2\}, \{x_B - p/2, y_B - bFLAN/2, z_B + hT/2\}\}$ }, $\{\{x_B - p/2 + w/2, y_B, z_B + hT/2\}, \{x_B - p/2, y_B, z_B + hT/2\}\}$];

SMTMesh["UPflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANxw, nEIFLANyw}, $\{\{x_B - p/2 + w/2, y_B, z_B + hT/2\}, \{x_B - p/2, y_B, z_B + hT/2\}\}$ }, $\{\{x_B - p/2 + w/2, y_B + bFLAN/2, z_B + hT/2\}, \{x_B - p/2, y_B + bFLAN/2, z_B + hT/2\}\}$ };

SMTMesh["UPflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANxw, nEIFLANyw}, $\{\{x_B + w/2, y_B - bFLAN/2, z_B + hT/2\}, \{x_B, y_B - bFLAN/2, z_B + hT/2\}\}$ }, $\{\{x_B + w/2, y_B, z_B + hT/2\}, \{x_B, y_B, z_B + hT/2\}\}$ };

SMTMesh["UPflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANxw, nEIFLANyw}, $\{\{x_B + w/2, y_B, z_B + hT/2\}, \{x_B, y_B, z_B + hT/2\}\}$ }, $\{\{x_B + w/2, y_B + bFLAN/2, z_B + hT/2\}, \{x_B, y_B + bFLAN/2, z_B + hT/2\}\}$ };

SMTMesh["UPflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANxw, nEIFLANyw}, $\{\{x_B, y_B - bFLAN/2, z_B + hT/2\}, \{x_B - w/2, y_B - bFLAN/2, z_B + hT/2\}\}$ }, $\{\{x_B, y_B, z_B + hT/2\}, \{x_B - w/2, y_B, z_B + hT/2\}\}$ };

SMTMesh["UPflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANxw, nEIFLANyw}, $\{\{x_B, y_B, z_B + hT/2\}, \{x_B - w/2, y_B, z_B + hT/2\}\}$ }, $\{\{x_B, y_B + bFLAN/2, z_B + hT/2\}, \{x_B - w/2, y_B + bFLAN/2, z_B + hT/2\}\}$ };

SMTMesh["UPflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANx, nEIFLANy}, {Table[{ $x_B - w/2 - ((l_s^*f)/n)$, $y_B - bFLAN/2, z_B + hT/2$ }, {f, 0, n}], Table[{ $x_B - w/2 - ((l_s^*f)/n)$, $y_B, z_B + hT/2$ }, {f, 0, n}]}];

SMTMesh["UPflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANx, nEIFLANy}, {Table[{ $x_B - w/2 - ((l_s^*f)/n)$, $y_B, z_B + hT/2$ }, {f, 0, n}], Table[{ $x_B - w/2 - ((l_s^*f)/n)$, $y_B + bFLAN/2, z_B + hT/2$ }, {f, 0, n}]}];

SMTMesh["UPflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANx, nEIFLANy}, {Table[{ $x_B + l_s + w/2 - ((l_s^*f)/n)$, $y_B - bFLAN/2, z_B + hT/2$ }, {f, 0, n}], Table[{ $x_B + l_s + w/2 - ((l_s^*f)/n)$, $y_B, z_B + hT/2$ }, {f, 0, n}]}];

SMTMesh["UPflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANx, nEIFLANy}, {Table[{ $x_B + l_s + w/2 - ((l_s^*f)/n)$, $y_B, z_B + hT/2$ }, {f, 0, n}], Table[{ $x_B + l_s + w/2 - ((l_s^*f)/n)$, $y_B + bFLAN/2, z_B + hT/2$ }, {f, 0, n}]}];

SMTMesh["web", FEPCurrentTop, {nEIWEBxw, nEIWEBzw}, $\{\{x_B + p/2, y_B, z_B\}, \{x_B + p/2 -$

```
w/2, yB, zB}}, {{xB + p/2, yB, zB + hT/2}, {xB + p/2 - w/2, yB, zB + hT/2}}}}};  
SMTMesh["web", FEPCurrentTop, {nEIWEBxw, nEIWEBzw}, {{{xB - p/2 + w/2, yB, zB}, {xB -  
p/2, yB, zB}}, {{xB - p/2 + w/2, yB, zB + hT/2}, {xB - p/2, yB, zB + hT/2}}}}};  
SMTMesh["web", FEPCurrentTop, {nEIWEBxw, nEIWEBzw}, {{{xB + w/2, yB, zB + hT/2}, {xB,  
yB, zB + hT/2}}, {{xB + w/2, yB, zB + a0/2}, {xB, yB, zB + a0/2}}}}};  
SMTMesh["web", FEPCurrentTop, {nEIWEBxw, nEIWEBzw}, {{{xB, yB, zB + hT/2}, {xB - w/2,  
yB, zB + hT/2}}, {{xB, yB, zB + a0/2}, {xB - w/2, yB, zB + a0/2}}}}};  
SMTMesh["web", FEPCurrentTop, {nEIWEBx, nEIWEBz}, {Table[{xB + ls - w/2 - 3/2*ls -  
(1/Pi)*ls*ArcSin[(-a0 + ((2 *a0* x)/ls))/a0], yB, zB - 1/4*a0*Sin[\[Pi]*(3/2 + x/ls)] + a0/4}, {x, 0, ls,  
ls/n }], Table[{xB - w/2 - ((ls*f)/n), yB, zB + hT/2}, {f, 0, n}]]}}};  
SMTMesh["web", FEPCurrentTop, {nEIWEBx, nEIWEBz}, {Table[{xB - ls + w/2 + 3/2*ls -  
(1/Pi)*ls *ArcSin[(-a0 + ((2 *a0* x)/ls))/a0], yB, zB + a0/2 - 1/4*a0*Sin[\[Pi]*(-3/2 + x/ls)] - a0/4},  
{x, 0, ls, ls/n }], Table[{xB + ls + w/2 - ((ls*f)/n), yB, zB + hT/2}, {f, 0, n}]]}}};  
SMTMesh["web", FEPCurrentTop, {nEIWEBx, nEIWEBz}, {Table[{xB + ls - w/2 - 3/2*ls +  
(1/Pi)*ls *ArcSin[(a0 - ((2 *a0* x)/ls))/a0], yB, zB - a0/2 + 1/4*a0*Sin[\[Pi]*(3/2 + x/ls)] + a0/4}, {x,  
0, ls,ls/n }], Table[{xB - w/2 - ((ls*f)/n), yB, zB - hT/2}, {f, 0, n}]]}}};  
SMTMesh["web", FEPCurrentTop, {nEIWEBx, nEIWEBz}, {Table[{xB - ls + w/2 + 3/2*ls +  
(1/Pi)*ls *ArcSin[(-a0 + ((2 *a0* x)/ls))/a0], yB, zB - a0/2 + 1/4*a0*Sin[\[Pi]*(3/2 + x/ls)] + a0/4},  
{x, 0, ls,ls/n }], Table[{xB + w/2 + ((ls*f)/n), yB, zB - hT/2}, {f, 0, n}]]}}};SMTMesh["web",  
FEPCurrentTop, {nEIWEBxw, nEIWEBzw}, {{{xB + w/2, yB, zB - hT/2}, {xB, yB, zB - hT/2}},  
{{xB + w/2, yB, zB - a0/2}, {xB, yB, zB - a0/2}}}}};  
SMTMesh["web", FEPCurrentTop, {nEIWEBxw, nEIWEBzw}, {{{xB, yB, zB - hT/2}, {xB - w/2,  
yB, zB - hT/2}}, {{xB, yB, zB - a0/2}, {xB - w/2, yB, zB - a0/2}}}}};  
SMTMesh["web", FEPCurrentTop, {nEIWEBxw, nEIWEBzw}, {{{xB + p/2, yB, zB}, {xB + p/2 -  
w/2, yB, zB}}, {{xB + p/2, yB, zB - hT/2}, {xB + p/2 - w/2, yB, zB - hT/2}}}}};  
SMTMesh["web", FEPCurrentTop, {nEIWEBxw, nEIWEBzw}, {{{xB - p/2 + w/2, yB, zB}, {xB -  
p/2, yB, zB}}, {{xB - p/2 + w/2, yB, zB - hT/2}, {xB - p/2, yB, zB - hT/2}}}}};  
SMTMesh["DOWNflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANxw, nEIFLANyw}, {{{xB + p/2, yB -  
bFLAN/2, zB - hT/2}, {xB + p/2 - w/2, yB - bFLAN/2, zB - hT/2}},  
{{xB + p/2, yB, zB - hT/2}, {xB + p/2 - w/2, yB, zB - hT/2}}}}};  
SMTMesh["DOWNflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANxw, nEIFLANyw}, {{{xB + p/2, yB, zB -  
hT/2}, {xB + p/2 - w/2, yB, zB - hT/2}}, {{xB + p/2, yB + bFLAN/2, zB - hT/2}, {xB + p/2 - w/2, yB  
+ bFLAN/2, zB, hT/2}}}}};  
SMTMesh["DOWNflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANxw, nEIFLANyw}, {{{xB - p/2 + w/2, yB -  
bFLAN/2, zB - hT/2}, {xB - p/2, yB - bFLAN/2, zB - hT/2}}, {{xB - p/2 + w/2, yB, zB - hT/2}, {xB -  
p/2, yB, zB - hT/2}}}}};  
SMTMesh["DOWNflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANxw, nEIFLANyw}, {{{xB - p/2 + w/2, yB,  
zB - hT/2}, {xB - p/2, yB, zB - hT/2}}, {{xB - p/2 + w/2, yB + bFLAN/2, zB - hT/2}, {xB - p/2, yB +  
bFLAN/2, zB - hT/2}}}}};  
SMTMesh["DOWNflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANxw, nEIFLANyw}, {{{xB + w/2, yB -  
bFLAN/2, zB - hT/2}, {xB, yB - bFLAN/2, zB - hT/2}}, {{xB + w/2, yB, zB - hT/2}, {xB, yB, zB -  
hT/2}}}}};  
SMTMesh["DOWNflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANxw, nEIFLANyw}, {{{xB + w/2, yB, zB -  
hT/2}, {xB, yB, zB - hT/2}}, {{xB + w/2, yB + bFLAN/2, zB - hT/2}, {xB, yB + bFLAN/2, zB -  
hT/2}}}}};
```

SMTMesh["DOWNflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANxw, nEIFLANyw}, {{{xB, yB - bFLAN/2, zB - hT/2}, {xB - w/2, yB - bFLAN/2, zB - hT/2}}, {{xB, yB, zB - hT/2}, {xB - w/2, yB, zB - hT/2}}];

SMTMesh["DOWNflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANxw, nEIFLANyw}, {{{xB, yB, zB - hT/2}, {xB - w/2, yB, zB - hT/2}}, {{xB, yB + bFLAN/2, zB - hT/2}, {xB - w/2, yB + bFLAN/2, zB - hT/2}}];

SMTMesh["DOWNflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANx, nEIFLANy}, {Table[{xB - w/2 - ((ls*f)/n), yB - bFLAN/2, zB - hT/2}, {f, 0, n}], Table[{xB - w/2 - ((ls*f)/n), yB, zB - hT/2}, {f, 0, n}]}];

SMTMesh["DOWNflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANx, nEIFLANy}, {Table[{xB - w/2 - ((ls*f)/n), yB, zB - hT/2}, {f, 0, n}], Table[{xB - w/2 - ((ls*f)/n), yB + bFLAN/2, zB - hT/2}, {f, 0, n}]}];

SMTMesh["DOWNflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANx, nEIFLANy}, {Table[{xB + w/2 + ((ls*f)/n), yB - bFLAN/2, zB - hT/2}, {f, 0, n}], Table[{xB + w/2 + ((ls*f)/n), yB, zB - hT/2}, {f, 0, n}]}];

SMTMesh["DOWNflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANx, nEIFLANy}, {Table[{xB + w/2 + ((ls*f)/n), yB, zB - hT/2}, {f, 0, n}], Table[{xB + w/2 + ((ls*f)/n), yB + bFLAN/2, zB - hT/2}, {f, 0, n}]}];, {xB, (1/2*(L - m*p) + p/2), L - 1/2*(L - m*p) - p/2, p};

SMTMesh["UPflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANx, nEIFLANy}, {{{xC - (L - m*p)/4, yC - bFLAN/2, zC + hT/2}, {xC + (L - m*p)/4, yC - bFLAN/2, zC + hT/2}}, {{xC - (L - m*p)/4, yC, zC + hT/2}, {xC + (L - m*p)/4, yC, zC + hT/2}}];

SMTMesh["UPflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANx, nEIFLANy}, {{{xC - (L - m*p)/4, yC, zC + hT/2}, {xC + (L - m*p)/4, yC, zC + hT/2}}, {{xC - (L - m*p)/4, yC + bFLAN/2, zC + hT/2}, {xC + (L - m*p)/4, yC + bFLAN/2, zC + hT/2}}];

SMTMesh["web", FEPCurrentTop, {nEIWEBx, nEIWEBz}, {{{xC - (L - m*p)/4, yC, zC}, {xC - (L - m*p)/4, yC, zC + hT/2}}, {{xC + (L - m*p)/4, yC, zC}, {xC + (L - m*p)/4, yC, zC + hT/2}}];

SMTMesh["web", FEPCurrentTop, {nEIWEBx, nEIWEBz}, {{{xC + (L - m*p)/4, yC, zC}, {xC + (L - m*p)/4, yC, zC - hT/2}}, {{xC - (L - m*p)/4, yC, zC}, {xC - (L - m*p)/4, yC, zC - hT/2}}];

SMTMesh["DOWNflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANx, nEIFLANy}, {{{xC + (L - m*p)/4, yC - bFLAN/2, zC - hT/2}, {xC - (L - m*p)/4, yC - bFLAN/2, zC - hT/2}}, {{xC + (L - m*p)/4, yC, zC - hT/2}, {xC - (L - m*p)/4, yC, zC - hT/2}}];

SMTMesh["DOWNflange", FEPCurrentTop, {nEIFLANx, nEIFLANy}, {{{xC + (L - m*p)/4, yC, zC - hT/2}, {xC - (L - m*p)/4, yC, zC - hT/2}}, {{xC + (L - m*p)/4, yC + bFLAN/2, zC - hT/2}, {xC - (L - m*p)/4, yC + bFLAN/2, zC - hT/2}}];

SMTMesh["endplateBEG", FEPCurrentTop, {nEIWEBx, nEIFLANy}, {{{0, -bFLAN/2, -hT/2}, {0, -bFLAN/2, 0}}, {{0, 0, -hT/2}, {0, 0, 0}}];

SMTMesh["endplateBEG", FEPCurrentTop, {nEIWEBx, nEIFLANy}, {{{0, 0, -hT/2}, {0, 0, 0}}, {{0, bFLAN/2, -hT/2}, {0, bFLAN/2, 0}}];

SMTMesh["endplateBEG", FEPCurrentTop, {nEIWEBx, nEIFLANy}, {{{0, -bFLAN/2, 0}, {0, -bFLAN/2, hT/2}}, {{0, 0, 0}, {0, 0, hT/2}}];

SMTMesh["endplateBEG", FEPCurrentTop, {nEIWEBx, nEIFLANy}, {{{0, 0, 0}, {0, 0, hT/2}}, {{0, bFLAN/2, 0}, {0, bFLAN/2, hT/2}}];

```
SMTMesh["endplateEND", FEPCurrentTop, {nEIWEBx, nEIFLANy}, {{{L, -bFLAN/2, -hT/2}, {L, -bFLAN/2, 0}}, {{L, 0, -hT/2}, {L, 0, 0}}];  
SMTMesh["endplateEND", FEPCurrentTop, {nEIWEBx, nEIFLANy}, {{{L, 0, -hT/2}, {L, 0, 0}}, {{L, bFLAN/2, -hT/2}, {L, bFLAN/2, 0}}];  
SMTMesh["endplateEND", FEPCurrentTop, {nEIWEBx, nEIFLANy}, {{{L, -bFLAN/2, 0}, {L, -bFLAN/2, hT/2}}, {{L, 0, 0}, {L, 0, hT/2}}];  
SMTMesh["endplateEND", FEPCurrentTop, {nEIWEBx, nEIFLANy}, {{{L, 0, 0}, {L, 0, hT/2}}, {{L, bFLAN/2, 0}, {L, bFLAN/2, hT/2}}];
```

```
FEPBoundary["Angelina"] := FEPBoundary["I", FEPGirderDim[[2]], Sequence @@  
FEPGeometricalConstants[[Position[FEPShortID, FEPSection][[1, 1], 2 ;; 5]]];  
FEPInputCheck["Angelina"] := Module[{Check1, Check2, Check3, hPROF, tFLAN, L, w, ls},  
{hPROF, tFLAN, L, w, ls} = Map[N[FEPGeometricalConstants[[Position[FEPShortID,  
FEPSection][[1, 1], #]]] &, {1, 3, 5, 6, 7}];  
Check1 = FEPCheckBoxPointForce && (NumberQ[FEPPointForce[[3]]] &&  
Abs[FEPPointForce[[3]]] > 0 &&  
FEPPointForce[[5]] == 2) || (NumberQ[FEPUniformForce[[3]]] && Abs[FEPUniformForce[[3]]] > 0  
&& FEPUniformForce[[4]] == 2);  
Check2 = w <= 0. || w >= L/24;  
Check3 = ls <= 0. || ls >= L/8;  
If[Check1, FEPMessageReturn[129, True]; Solution = False; Return[False];  
If[Check2, FEPMessageReturn[166, True]; Solution = False; Return[False];  
If[Check3, FEPMessageReturn[173, True]; Solution = False; Return[False];  
Return[True];]
```