

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI
ŠTUDIJSKI PROGRAM
PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVO

Kandidat/-ka:

POLONA IVANČIČ

PROJEKTIRANJE JEKLENIH NOSILCEV Z ODPRTINAMI

DESIGN OF STEEL BEAMS WITH WEB OPENINGS

Mentor/-ica:

doc. dr. Primož Može

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

/

Član komisije:

2017

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 24.014.2:624.072.2(043.2)

Avtor: Polona Ivančič

Mentor: doc. dr. Primož Može

Naslov: Projektiranje jeklenih nosilcev z odprtinami

Tip dokumenta: Diplomaska naloga – univerzitetni študij

Obseg in oprema: 50 str., 6 pregl., 57 sl.,

Ključne besede: nosilci z odprtinami, Vierendeelov upogib, izbočenje stojine, Evrokod 3

Izveček:

V pripravi je nov standard iz skupine standardov Evrokod 3, ki bo podajal navodila za projektiranje jeklenih nosilcev z odprtinami v stojini. Diplomaska naloga z naslovom "Projektiranje jeklenih nosilcev z odprtinami" sistematično opiše številne prednosti izdelave in uporabe jeklenih nosilcev z odprtinami ter izpostavlja osnovne probleme, ki se pojavijo v zvezi z nosilnostjo teh nosilcev. V tem pogledu avtor naloge predstavi navodila predloga standarda EN 1993-1-13 (april 2017) in jih uspešno preizkusi na računskem primeru jeklenega nosilca z okroglimi odprtinami. Eden od pomembnih prispevkov naloge je prikaz uporabe alternativne metode izračuna notranjih sil in nosilnosti prereзов v ravninah okrog odprtin. Metoda je zamudna, ker je potrebno rezultate izračuna Vierendeel-ovega modela nosilca kontrolirati za kritične prereze pri različnih kotih (korak 5°). Da je v teh primerih primernejša uporaba računalnika je pokazal izračun nosilca z računalniškim programom ACB+ (ArcelorMittal), katerega rezultati so priloženi na zaključku naloge (priloga A). Druga pomembna alternativna metoda, ki se poleg splošne uporablja za kontrolo nosilnosti na lokalno izbočenje stojine med odprtinami, temelji na empirični študiji analize končnih elementov. Na podlagi razlage navodil bodočega standarda lahko sklepamo, da bo kljub določenim omejitvam omogočena njegova široka uporaba v praksi, saj ga bo možno uporabiti pri projektiranju nosilcev z odprtinami iz vroče valjanih ali varjenih profilov, satastih nosilcev ali nosilcev s posameznimi odprtinami različnih oblik in dimenzij. Obseg proizvodnje in uporabe jeklenih nosilcev z odprtinami v stojini je odvisen od sodelovanja proizvajalcev, projektantov, dobaviteljev in gradbenikov. Za razliko od razvitih držav, v Sloveniji še ne koristimo vseh možnosti tega proizvoda. Uporaba standarda EN 1993-1-13 lahko pomeni pomemben korak v tej smeri.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**UDC: 24.014.2:624.072.2(043.2)****Author: Polona Ivančič****Supervisor: Assist. Prof. Primož Može, Ph.D****Title: Design of steel beams with web openings****Document type: Graduation Thesis – University Studies****Scope and tools: 50 p., 6 tab., 57 fig.****Keywords: Beams with web openings, Vierendeel bending, Web post buckling, Eurocode 3****Abstract:**

A new standard from Eurocode 3 is in preparation, which will provide rules for the design of steel beams with web openings. The graduation thesis entitled "Design of steel beams with web openings" systematically describes numerous advantages of their production and usage of steel beams with openings, and highlights the basic problems connected with their strength. Author presents the guidelines of the draft standard EN 1993-1-13 (April 2017) and successfully implements them in the analysis of cellular beam with circular openings. One of the most important contribution of this work is to demonstrate the use of an alternative method to determine internal forces, moments and resistances at sections around the openings. The consequence necessity of checking the results of Vierendeel model at critical cross-sections corresponding to different angles (by increments of 5°) is time-consuming method. In this case the use of computer is more appropriate as shown in analysis of the girder with computer program ACB+ (ArcelorMittal) at the end of the presented work (Annex A). Another significant alternative method, which in addition to the general approach verifies the resistance of web post buckling, is based on the empirical study of the finite element analysis. Based on the interpretation of standard (yet not accepted), it may be assumed that it will be used in practice widely, despite certain limitations, namely in the design of rolled and fabricated beams with isolated or closely spaced web openings, with various shapes and dimensions. The production volume and use of steel beams with web openings depends on the participation of manufacturers, designers, suppliers and builders. In comparison with developed countries, Slovenia does insignificantly exploits all the possibilities this product has. The important step in this direction can be use of the standard EN 1993-1-13.

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorju doc. dr. Primožu Možetu za pomoč pri nastajanju diplomske naloge.

Zahvaljujem se tudi svojim najbližjim, staršem Dušanu in Rozki ter sestrama Urški in Tadeji za zaupanje in vso podporo med študijem.

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA	I
IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
1 UVOD	1
1.1 Splošno o nosilcih z odprtinami	2
1.2 Razvoj nosilcev z odprtinami	4
1.2.1 Nosilci z izoliranimi odprtinami v stojini	4
1.2.2 Satasti nosilci	7
1.3 Izdelava	7
2 NOSILCI S POSAMEZNIMI ODPRTINAMI V STOJINI	9
2.1 Splošno	9
2.2 Splošna navodila pri načrtovanju	9
2.3 Inštalacijski sistemi	10
2.3.1 Vrste inštalacijskih sistemov	10
3 SATASTI NOSILCI	10
3.1 Splošno	10
3.2 Vrste satastih nosilcev	11
3.2.1 Heksagonalne in oktagonalne odprtine	11
3.2.2 Okrogle odprtine	12
3.2.3 Diamantna oblika odprtine	13
3.2.4 Sinusoidna oblika odprtine	14
3.3 Primerjava nosilcev s heksagonalnimi in krožnimi odprtinami	15
3.4 Modifikacija profila satastih nosilcev	16
3.4.1 Ukrivljeni satasti nosilci	16
3.4.2 Satasti nosilci s spremenljivo višino prečnega prereza	16
3.4.3 Asimetrični prerezi satastih nosilcev	17
3.4.4 Podolgovate odprtine	18
3.5 Uporaba in prednosti satastih nosilcev	19
3.6 Problematika uporabe satastih nosilcev	21
3.6.1 Priključki satastih nosilcev	21
3.6.2 Koncentrirana obtežba	22
3.6.3 Stabilnost nosilcev med gradnjo	22

3.6.4	Vibracije	22
3.6.5	Požarna zaščita	22
3.6.6	Antikorozijska zaščita.....	23
3.6.7	Trajnostna gradnja	23
4	OJAČITVE V STOJINI NOSILCEV Z ODPRTINAMI.....	24
4.1	Zapolnitev odprtin	24
4.2	Ojačane odprtine satastih nosilcev	25
4.3	Navpične ojačitve	25
4.4	Vodoravne ojačitve.....	25
5	ANALIZA PRIMERA SATASTEGA NOSILCA S KROŽNIMI ODPRTINAMI	26
5.1	Splošno	26
5.2	Materialne in geometrijske karakteristike	26
5.3	Obtežbe in obtežne kombinacije.....	30
5.4	Mejno stanje nosilnosti (MSN).....	31
5.4.1	Notranje sile in momenti	31
5.4.2	Klasifikacija prerezov	33
5.4.3	Nosilnost prerezov	34
5.4.3.1	Kontrola nosilnosti prereza nad odprtino	34
5.4.3.2	Kontrola nosilnosti T prerezov okrog odprtin (Vierendeel-ov upogib).....	35
5.4.3.3	Kontrola nosilnosti stojine na lokalno izbočenje.....	38
5.4.3.4	Kontrola strižne nosilnosti nad podporo.....	42
5.4.4	Odpornost satastega nosilca proti bočni zvrnitvi.....	43
5.5	Mejno stanje uporabnosti (MSU)	44
5.5.1	Kontrola upogibkov satastega nosilca	44
6	ZAKLJUČEK	46
VIRI		47
PRILOGE.....		51

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 5-1: Potek upogibnih momentov in prečnih sil vzdolž nosilca	31
Preglednica 5-2: Notranje sile med robovi dveh sosednjih krožnih odprtin	32
Preglednica 5-3: Geometrijske karakteristike T prerezov pri različnih kotih ϕ	35
Preglednica 5-4: Rezultati izračuna notranjih sil in momentov po alternativni metodi Vierendeel-ovega upogiba	37
Preglednica 5-5: Osna in upogibne nosilnosti zgornje T prereza	37
Preglednica 5-6: Kontrole nosilnosti prečnih prerezov (interakcija M-N) okrog odprtin	38

LIST OF TABLES

Table 5-1: Bending moments and shear forces in the beam	31
Table 5-2: Internal forces in the web post between circular openings	32
Table 5-3: Tees sections properties calculated with different critical angles ϕ	35
Table 5-4: The values of internal forces and moments calculate with alternative method for Vierendeel bending	37
Table 5-5: The resistance of top tee to axial force and bending moment.....	37
Table 5-6: Checkings of net sections (interaction M-N) around openings.....	38

KAZALO SLIK

Slika 1-1: Zmanjšana višina nosilca, dosežena z namestitvijo inštalacij skozi odprtine (Erdal, 2011, str. 5)	2
Slika 1-2: Vrste jeklenih konstrukcijskih elementov za doseg velikih razponov in možnosti vodenja inštalacij (http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~pmoze/esdep/master/wg10/10900.htm , pridobljeno 20.6.2017)2	
Slika 1-3: Nosilec z izoliranimi odprtinami v stojini (http://www.thecivilbuilders.com/2013/01/beams-multi-storey-buildings.html , pridobljeno 20.6.2017)	3
Slika 1-4: Satasti nosilci (http://www.thecivilbuilders.com/2013/01/beams-multi-storey-buildings.html , pridobljeno 20.6.2017)	3
Slika 1-5: Sovprežni nosilec (Ward, 1990, str. 11)	3
Slika 1-6: Tipičen prečni prerez satastega sovprežnega nosilca, z vgrajenimi inštalacijami (Best practice in steel construction – commercial buildings, 2008, str. 18)	4
Slika 1-7: Primera uporabe nosilcev z odprtinami za stropne oz. medetažne konstrukcije (Web openings in composite beams, 2009, str. 1)	4
Slika 1-8: Okvirni konstrukcijski sistem stolpa cerkve Dadizele (Vierendeel, 1902, po Verswijver et al, 2010, str. 207)	5
Slika 1-9: Vierendeel-ova analiza (Wickersheimer, 1976, str. 55)	5
Slika 1-10: Prvi velik Vierendeel-ov most, zgrajen leta 1904 v Avelgemu (Verswijver et al, 2010, str. 209)	6
Slika 1-11: Most na Lanayu (Albertov kanal), 1933, prvi zvarjen most v Belgiji (L'Ossature Métallique, po Wickersheimer, 1976, str. 56)	6
Slika 1-12: Nosilci z izoliranimi odprtinami (http://www.steelconstruction.info/File:Economic_composite_cellular_beams.jpg , pridobljeno 5.8.2017.)	7
Slika 1-13: Alternativna metoda sestavljanja posameznih pločevinastih delov v nosilec z odprtinami (Tsavdaridis et al, 2015, str. 109)	8
Slika 1-14: Satasti nosilci z asimetričnim prerezom – ekscentričnost odprtine (Lawson in Hicks, 2011, str. 22)	8
Slika 2-1: Vodenje inštalacij skozi posamezne odprtine v nosilcih (http://www.steelconstruction.info/Service_integration , pridobljeno 20.6.2017)	9
Slika 2-2: Izolirane odprtine pravokotnih oblik v sovprežnem nosilcu (Lawson in Hicks, 2011, str. 1) 9	
Slika 3-1: Izdelava SN s heksagonalnimi odprtinami (Fares et al, 2016, str. 1)	11
Slika 3-2: SN z osmerokotnimi odprtinami (višina je povečana z distančnimi ploščicami) – Litzka nosilec (http://www.grunbauer.nl/eng/wat.htm , pridobljeno 3.8.2017.)	12
Slika 3-3: Izdelava SN s krožnimi odprtinami (Fares et al, 2016, pp. 2)	12
Slika 3-4: Plamenski drugi izrez stojin vroče valjanih profilov, v polkrožnem vzorcu (Arcellor Mittal Ltd., Katalog izdelkov - ACB®, str. 6)	13
Slika 3-5: SN s krožnimi odprtinami, izdelani iz posameznih pločevinastih plošč (http://www.barnshaws.com/news/curved-cellular-beams-adding-strength-to-remove-weight , pridobljeno 3.8.2017.)	13

Slika 3-6: Primer SN z diamantno obliko odprtin	13
Slika 3-7: Prva skica Claudea Vasconija in postopek preoblikovanja nosilca s krožnimi odprtinami v Angelina TM nosilec (Vassart et al, 2008, str. 14)	14
Slika 3-8: Izdelava SN s sinusoidnim potekom odprtin – Angelina TM nosilec (ArcelorMittal, 2015, str. 7).....	14
Slika 3-9: Plamenski izrez v vzorcu sinusoide (ArcelorMittal, 2015, str. 8).....	14
Slika 3-10: Primerjava velikosti odprtine med SN s krožnimi odprtinami in Angelina TM nosilcem (ArcelorMittal, 2015, str. 3).....	15
Slika 3-11: Primerjava uporabe zapolnitev odprtin s ploščami v SN, (Bake, 2010, str. 39)	15
Slika 3-12: Primer ukrivljenega SN s krožnimi odprtinami (ArcelorMittal, 2015, str. 9).....	16
Slika 3-13: Spyros Kyprianou šporni center, Ciper (ArcelorMittal, 2014, str. 10)	16
Slika 3-14: Primer SN s krožnimi odprtinami s spremenljivo višino prečnega prereza (ArcelorMittal, 2014, str. 8).....	16
Slika 3-15: Daljši SN z nekonstantno višino prečnega prereza (Fares et al, 2016, str. 8).....	17
Slika 3-16: The Renault Centre, Swindon (http://www.fosterandpartners.com/projects/renault-distribution-centre/ , pridobljeno 5.8.2017).....	17
Slika 3-17: Sovprežni SN s krožnimi odprtinami z asimetričnim prečnim prerezom (ArcelorMittal, 2015, str. 10).....	18
Slika 3-18: Primer podolgovate odprtine v SN s krožnimi odprtinami (ArcelorMittal, 2014, str. 9)....	18
Slika 3-19: SN s krožnimi in podolgovatimi odprtinami, pisarne mestnega sveta v Birminghamu (http://www.steelconstruction.info/images/c/c0/C5fig24.jpg , pridobljeno 5.8.2017)	18
Slika 3-20: Dodatna etaža v večetažnem objektu, po zaslugi uporabe SN (ArcelorMittal, 2015, str. 27)	19
Slika 3-21: Ukrivljeni SN s krožnimi odprtinami, ki premošča 25m razpon; nakupovalni center Thionville, Francija (ArcelorMittal, 2015, str. 9).....	19
Slika 3-22: Uporaba SN s sinusoidnim potekom odprtin (Angelina TM) v parkirni hiši (ArcelorMittal, 2015, str.6).....	20
Slika 3-23: Industrijska hala z mezaninom (Fares et al, 2016, str. 6).....	20
Slika 3-24: Vodenje inštalacij skozi odprtine SN (ArcelorMittal, 2014, str. 24 in 2015, str. 19)	21
Slika 3-25: SN s krožnimi odprtinami kot stebri (http://www.macsteel.co.za/files/imagecache/view/products/images/pool.jpg , pridobljeno 5.8.2017)	21
Slika 3-26: Primera delne zapolnitve odprtin pri izvedbi priključkov (ArcelorMittal, 2014, str. 12) ...	22
Slika 3-27: Značilno bočno podpiranje SN med gradnjo (Fares et al, 2016, str. 10)	22
Slika 4-1: Tipični vzorci zapolnitev odprtin (Fares et al, 2016, str. 8).....	24
Slika 4-2: SN s polno in delno zapolnjeno odprtino v priključku (ArcelorMittal, 2014, str. 9).....	24
Slika 4-3: Primeri ojačanih odprtin; levo z jeklenim obročem ali desno okrog celotne odprtine (ArcelorMittal, 2015, str. 10).....	25
Slika 4-4: Primera ojačitev, s katerimi se izognemo lokalnemu izbočenju območja stojine med sosednjima odprtinama (ArcelorMittal, 2014, str. 10)	25

Slika 4-5: Primeri vodoravnih ojačitev nosilca (Lawson in Hicks, 2011, str. 65)	25
Slika 5-1: Zasnova strešne konstrukcije	26
Slika 5-2: Računski model nosilca s krožnimi odprtinami IPE 450	26
Slika 5-3: Geometrijske karakteristike satastega nosilca s krožnimi odprtinami	27
Slika 5-4: Dimenzije prečnega prereza satastega nosilca	28
Slika 5-5: Plastična nevtralna os v T prerezu	29
Slika 5-6: Vierendeel-ov model za izračun notranjih sil in momentov (prirejeno po Kržič, 1994, str. 137)	32
Slika 5-7: Notranje sile in momenti v kritičnem prerezu okrog odprtine (predlog osnutka EN 1993-1-13, 2017, str. 23)	35
Slika 5-8: Model za izračun lokalnega izbočenja zaradi upogiba v območju stojine med sosednjimi odprtinami	38
Slika 5-9: Notranje sile in momenti na območju med okroglimi odprtinami (predlog osnutka EN 1993-1-13, 2017, str. 24)	40

LIST OF FIGURES

Figure 1-1: Reduction of beam depth, achieved by placing service integrations in holes (Erdal, 2011, pp. 5).....	2
Figure 1-2: Structural options for achieving long spans and integration of services (http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~pmoze/esdep/master/wg10/10900.htm , obtained on 20.6.2017).....	2
Figure 1-3: Beam with web openings (http://www.thecivilbuilders.com/2013/01/beams-multi-storey-buildings.html , obtained on 20.6.2017).....	3
Figure 1-4: Castellated beam (left) and cellular beam (right), (http://www.thecivilbuilders.com/2013/01/beams-multi-storey-buildings.html , obtained on 20.6.2017).....	3
Figure 1-5: Composite beam (Ward, 1990, pp. 11).....	3
Figure 1-6: Cellular beam – typical cross-section showing services integration (Best practice in steel construction – commercial buildings 2008, pp.18)	4
Figure 1-7: Possible beam layouts with web openings in floor systems and in multi-storey buildings (Web openings in composite beams, 2009, pp. 1).....	4
Figure 1-8: Framework of the crossing tower of the Dadizele church (Vierendeel, 1902, by Verswijver et al, 2010, pp. 207).....	5
Figure 1-9: Vierendeel analysis (Wickersheimer, 1976, pp. 55).....	5
Figure 1-10: Vierendeel's first large bridge in Avelgem built in 1904 (Verswijver et al, 2010, pp. 209).....	6
Figure 1-11: Bridge at Lanaye (on the Albert Canal), 1933, the first welded bridge in Belgium (L'Ossature Métallique, by Wickersheimer, 1976, pp. 56)	6
Figure 1-12: Beams with isolated web openings (http://www.steelconstruction.info/File:Economic_composite_cellular_beams.jpg , obtained on 5.8.2017).....	7
Figure 1-13: Plate assembly manufacturing process – an alternative fabrication technique of beams with web openings (Tsavdaridis et al, 2015, pp. 109).....	8
Figure 1-14: Asymmetric cross-sections of beams with regular openings – eccentric opening (Lawson and Hicks, 2011, pp. 22).....	8
Figure 2-1: Service routing through steel beams with web openings (http://www.steelconstruction.info/Service_integration , obtained on 20.6.2017).....	9
Figure 2-2: Isolated rectangular openings in a composite beam (Lawson and Hicks, 2011, pp.1)	9
Figure 3-1: Manufacturing of a castellated beam (Fares et al, 2016, pp. 1).....	11
Figure 3-2: Castellated beam with octagonal web openings (depth is increased with increment plates) – Litzka beam (http://www.grunbauer.nl/eng/wat.htm , obtained on 3.8.2017.).....	12
Figure 3-3: Manufacturing of a cellular beam (Fares et al, 2016, pp. 2).....	12
Figure 3-4: A double cut-out in the webs by flame cutting hot rolled sections, in circular pattern (Arcellor Mittal Ltd., Product catalogue - ACB®, pp. 6).....	13
Figure 3-5: Cellular beams fabricated from steel plates (http://www.barnshaws.com/news/curved-cellular-beams-adding-strength-to-remove-weight , obtained on 3.8.2017.)	13
Figure 3-6: Example of a castellated beam with diamond shaped openings	13

Figure 3-7: First drawing from Mr Claude Vasconi and process of modification cellular beam to Angelina™ (Vassart et al, 2008, pp. 14)	14
Figure 3-8: The fabrication of a castellated beam with sinusoidal openings – Angelina™ beam (ArcelorMittal, 2015, pp. 7)	14
Figure 3-9: Flame cutting of sinusoidal pattern (ArcelorMittal, 2015, str. 8)	14
Figure 3-10: Size comparison of web opening between cellular and Angelina™ beams (ArcelorMittal, 2015, pp. 3)	15
Figure 3-11: Comparing use of infill plates in cellular (left) and castellated beams (right), (Bake, 2010, pp. 39)	15
Figure 3-12: Example of a curved cellular beam (ArcelorMittal, 2015, pp. 9)	16
Figure 3-13: Spyros Kyprianou Athletic Center, Cyprus (ArcelorMittal, 2014, pp. 10)	16
Figure 3-14: Example of a tapered cellular beam (ArcelorMittal, 2014, pp. 8)	16
Figure 3-15: Tapered roof support beams with long span (Fares et al, 2016, pp. 8)	17
Figure 3-16: The Renault Centre, Swindon (http://www.fosterandpartners.com/projects/renault-distribution-centre/ , obtained on 5.8.2017)	17
Figure 3-17: Asymmetrical cellular composite beam (ArcelorMittal, 2015, pp. 10)	18
Figure 3-18: Example of cellular beam with elongated opening (ArcelorMittal, 2014, pp. 9)	18
Figure 3-19: Cellular beams combining circular and elongated openings, Birmingham City Council offices (http://www.steelconstruction.info/images/c/c0/C5fig24.jpg , obtained on 5.8.2017)	18
Figure 3-20: Additional level through cellular and Angelina™ beams in multi-storey building (ArcelorMittal, 2015, pp. 27)	19
Figure 3-21: Curved cellular beams spanning 25m; shopping centre Thionville, France (ArcelorMittal, 2015, pp. 9)	19
Figure 3-22: Castellated beams (Angelina™) used in parking structure (ArcelorMittal, 2015, pp.6) ..	20
Figure 3-23: Industrial facility with mezzanine (Fares et al, 2016, pp. 6)	20
Figure 3-24: Integration of the services through beams with web openings (ArcelorMittal, 2014, pp. 24 and 2015, pp. 19)	21
Figure 3-25: Cellular beams as columns (http://www.macsteel.co.za/files/imagecache/view/products/images/pool.jpg , obtained on 5.8.2017) ..	21
Figure 3-26: Examples of partially filled openings to allow for assembly joints (ArcelorMittal, 2014, pp. 12)	22
Figure 3-27: Typical erection bracing for cellular beams (similar application for castellated beams; Fares et al, 2016, pp. 10)	22
Figure 4-1: Typical infill patterns (Fares et al, 2016, pp. 8)	24
Figure 4-2: Cellular beam, with filled and partially closed openings for jointing (ArcelorMittal, 2014, pp. 9)	24
Figure 4-3: Example of reinforced openings; left with ring stiffener or right around the opening (ArcelorMittal, 2015, pp. 10)	25
Figure 4-4: Options of reinforcement to avoid buckling of the web post (ArcelorMittal, 2014, pp. 10)	25

Figure 4-5: Example of a beam with horizontal stiffeners (Lawson and Hicks, 2011, pp. 65)	25
Figure 5-1: Design of roof structure	26
Figure 5-2: Model of cellular beam IPE 450	26
Figure 5-3: Geometrical parameters of cellular beam	27
Figure 5-4: Cross-section properties of cellular beam.....	28
Figure 5-5: The plastic neutral axis of T cross section	29
Figure 5-6: Vierendeel analysis for internal forces and moments (adapted according to Kržič, 1994, pp. 137).....	32
Figure 5-7: Internal forces and moments at the critical section around opening (Draft of EN 1993-1-13, 2017, pp. 23).....	35
Figure 5-8: Strut model of web post buckling	38
Figure 5-9: Internal forces and moments in the web post between circular openings (Draft of EN 1993-1-13, 2017, pp. 24)	40

OKRAJŠAVE

AISC	American Institute of Steel Construction
ANGELINA	Satasti nosilec s sinusoidno obliko odprtin
ASFP	Association for Specialist Fire Protection
BCSA	The British Constructional Steelwork Association
EC	Standardi iz družine Evrokodov
GI ZRMK	Gradbeni inštitut Zavoda za raziskave materialov in konstrukcij
HVAC	heating, ventilation and air conditioning system
IICBM	International Institute of Cellular Beam Manufacturers
IJSRP	International Journal Of Scientific and Research Publications
IPEC-10	The 10th International PSU Engineering Conference
IRJET	International Research Journal of Engineering and Technology
ISR	(ISRJournals and Publications) International Science and Research Journals
JCSR	Journal of Constructional Steel Research
JSAH	Journal of the Society of Architectural Historians
MKE	Metoda končnih elementov (angl.: Final Element Method – FEM)
MSN	Mejno stanje nosilnosti (angl.: Ultimate Limit State – ULS)
MSU	Mejno stanje uporabnosti (angl.: Serviceability Limit State – SLS)
SCI	Steel Construction Institute
SN	Satasti nosilec
SSCS	Steel Structures: Culture & Sustainability
SSKJ	Slovar slovenskega knjižnega jezika

SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK

Beams with large web openings je angleška oznaka za jeklene nosilce z odprtinami v stojini.

Bolted joints so vijачeni spoji.

Bottom tee je oznaka za spodnji del nosilca pod odprtino, vključno s pasnico (spodnji T prerez).

Castellated beam je oznaka za nosilec s heksagonalnimi oz. šesterokotnimi odprtinami.

Cellular beam je oznaka za "celični" nosilec s krožnimi odprtinami.

Chord je oznaka za spodnji (**lower**) oz. zgornji (**upper**) pas kot pri npr. Vierendeel-ovem nosilcu.

Composite truss je oznaka za sovprežni palični nosilec.

Curved (or cambered) beam predstavlja ukrivljen nosilec npr. pri strešnih konstrukcijah večjih razponov.

Embodied carbon ali carbon footprint je ogljični odtis za ponazoritev količine izpustov ogljikovega dioksida (CO₂) in drugih toplogrednih plinov.

Flexural buckling je upogibni uklon.

Hot-dipped galvanization coat je oznaka za vroče pocinkano prevleko, kot najučinkovitejša antikorozijska zaščita jeklenih konstrukcij.

HVAC systems so sistemi za ogrevanje, prezračevanje (ventilacijo) in klimatizacijo.

Lateral-torsional buckling je bočna zvrnitev.

Oxy cut (oxy fuel cutting) je izraz za plamensko (avtogeno) rezanje konstrukcijskih elementov. Je najstarejši postopek, pri kateri toplotno energijo dobimo iz plamena kisika in gorljivega plina.

Pin-jointed frame pomeni členkasto povezan okvir.

Plasma cut ali plazemsko rezanje, pri katerem je vir toplotne energije električni oblok.

Rigid joint je tog spoj.

Rigid frame je oznaka za togo povezani okvir, pri čemer so posamezni jekleni elementi med seboj togo spojeni.

Riveted joint je oznaka za kovičen spoj. Vezna sredstva so kovice, izdelane iz vroče valjanega jekla. Kovica ima glavo in vrat, ki jo vgrajujemo strojno ali ročno.

Shear buckling lokalno izbočenje zaradi striga.

Stiffener je ojačitev.

Stub girder je oznaka za sovprežni nosilec, ki je sestavljen iz spodnjega nosilca (v nategu) in betonske plošče, ki sta med seboj ločena s kratkimi nosilci.

Tapered beam je nosilec s spremenljivo višino prečnega prereza, ki je namenjen zagotavljanju strižne in upogibne odpornosti.

Tee je oznaka za območje nosilca nad ali pod odprtino, v obliki črke T.

The plate assembly technique je alternativna metoda izdelave jeklenih nosilcev z odprtinami, kjer so posamezne pločevine zvarjene v profil.

Top tee je oznaka za zgornji del nosilca nad odprtino, vključno s pasnico (zgornji T prerez).

Trussed framework je izraz za ravninsko paličje.

Web opening je oznaka za odprtino v stojini jeklenega nosilca.

Web post je oznaka za območje v stojini nosilca med robovi dveh sosednjih polovic odprtin.

Web post weld je oznaka za območje zvarjenega stika med stojinami dveh T prerezov v satastih nosilcih.

1 UVOD

Predmet diplomske naloge je obravnava jeklenih nosilcev z odprtinami v stojini s poudarkom na opisu smiselnosti njihove uporabe, pregledu možnih rešitev in razlagi osnovnih problemov, ki se pojavijo pri projektiranju tovrstnih nosilcev. S tehnološkim razvojem in z vse večjimi potrebami po konstrukcijah večjih razponov, različnih oblik in materialov, so že pred več kot 100 leti inženirji proučevali možnosti uporabe jeklenih nosilcev z odprtinami ter pri tem iskali načine za zmanjšanje stroškov proizvodnje. Za razliko od jeklenih nosilcev večjih razponov, ki "delujejo na upogib", se pri betonskih nosilcih pretežni del prenosa obtežbe porabi za prenos lastne teže. S težnjo po optimizaciji rešitev z vidika nosilnosti, uporabnosti (npr. vodenje inštalacij) in estetskega videza je šel razvoj v smeri izdelave jeklenih nosilcev s povišano stojino (satasti nosilci), ki jih dobimo z razrezom in varjenjem dveh jeklenih profilov, ki so lahko različnih dimenzij. Danes se jekleni nosilci z odprtinami vse bolj uporabljajo kot sovprežni nosilci.

Pomemben premik na področju projektiranja jeklenih konstrukcij je ob koncu 18. stoletja pomenil Vierendeel-ov nosilec, sestavljen iz vrste pravokotnih okvirov v katerih so diagonale odstranjene, grede in navpični deli pa so medseboj togo povezani. V nasprotju s členkastimi spoji pri paličju, v katerem se teoretično pojavljajo samo osne sile, se pri Vierendeel-ovem nosilcu prečna (strižna) sila zaradi togih spojev prenaša preko zgornjega oz. spodnjega pasu okvira na vertikale z upogibnimi momenti. Poenostavljena metoda izračuna notranjih sil in momentov temelji na predpostavki, da je na sredini dolžine pasov in vertikal (v središčni liniji odprtine) moment enak nič.

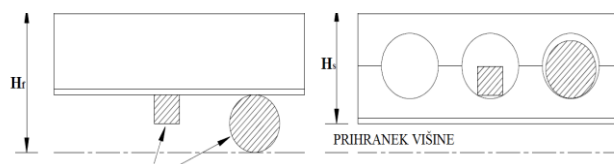
Principi Vierendeel-ovega upogiba, ki se še danes uporabljajo pri projektiranju jeklenih konstrukcij, so vključeni tudi v pripravo novega standarda iz skupine standardov Evrokod 3, ki bo podajal navodila za projektiranje jeklenih nosilcev z odprtinami v stojini. Po predlogu predstandarda EN 1993-1-13 (april 2017) je med drugim potrebno preveriti notranje sile in nosilnosti prereзов okrog odprtin ter nosilnost na lokalno izbočenje stojine med odprtinami. Cilj diplomske naloge je prav v tem, da predstavi metode izračuna nosilnosti in jih preizkusi na računskem primeru jeklenega nosilca z okroglimi odprtinami.

K celovitosti obravnave metod računa jeklenih nosilcev z odprtinami v stojini po navodilih osnutka predstandarda EN 1993-1-13, je prispeval obsežen pregled objavljenih strokovnih in znanstvenih člankov. Nujno dopolnilo k obravnavi je tudi zgodovinska metoda, ki zajema opis razvoja na področju izdelave in uporabe jeklenih nosilcev z odprtinami. Diplomska naloga je razdeljena na šest poglavij, od katerih so prva štiri vsebinska poglavja, peto pa je empirični del naloge. V uvodnem poglavju avtor izpostavi ključne vidike razvoja jeklenih nosilcev z odprtinami, v naslednjih treh poglavjih predstavi glavne prednosti uporabe nosilcev z odprtinami in opiše osnovne probleme povezane z njihovo nosilnostjo, v šestem poglavju pa podaja zaključne misli.

1.1 Splošno o nosilcih z odprtinami

Že pred več kot 100 leti so inženirji začeli s proučevanjem različnih metod izdelave in uporabe nosilcev z odprtinami (Tsavdaridis et al, 2015) ter pri tem poskušali najti načine za zmanjšanje stroškov jeklenih konstrukcij. Z uporabo nosilcev z odprtinami lahko dosežemo željene estetske vidike, konstrukcije so lažje in daljših razponov, odprtine dopuščajo vodenje inštalacij (slika 1-1) itd. V praksi se jekleni nosilci z odprtinami uporabljajo vse bolj kot sovprežni nosilci.

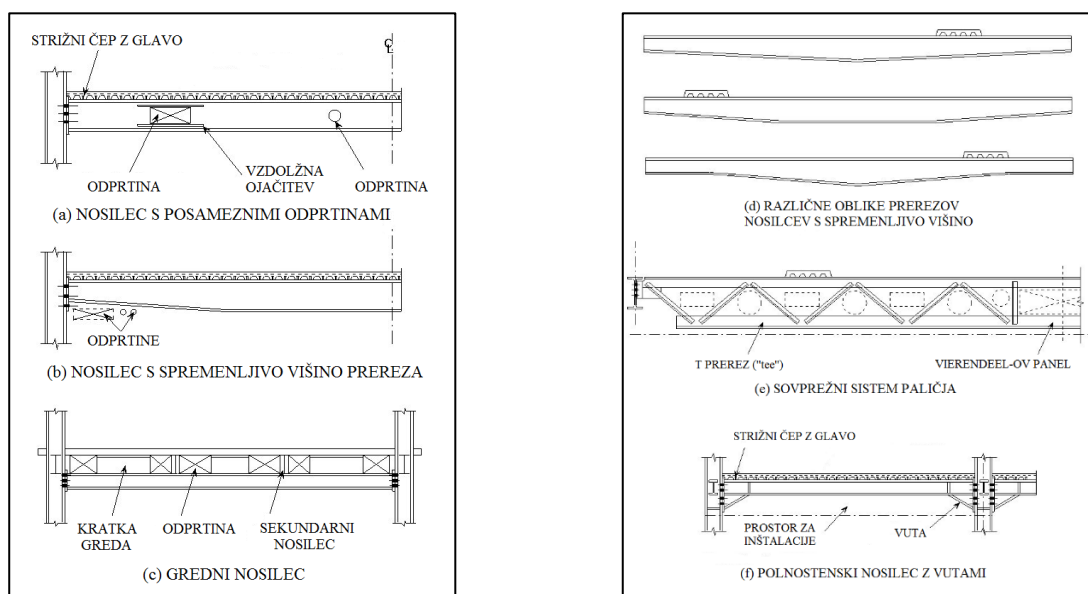
Danes je z izboljšavami pri načrtovanju, razvoju programskih orodij za analizo in pri sami izdelavi, nosilce z odprtinami lažje vključiti v konstrukcijske sisteme. Veliko spoznanj o načrtovanju jeklenih nosilcev z odprtinami izhaja iz priročnikov (glej Darwin 2000, Fares, S. S et al 2016 in Lawson 2011 itd.), v osnutku priloge Annex N: Openings in webs k predstandardu ENV 1993-1-1 ter v najnovejšem osnutku predloga predstandarda EN 1993-1-13: Steel beams with large web openings – April 2017.



Slika 1-1: Zmanjšana višina nosilca, dosežena z namestitvijo inštalacij skozi odprtine (Erdal, 2011, str. 5)
Figure 1-1: Reduction of beam depth, achieved by placing service integrations in holes (Erdal, 2011, pp. 5)

Na izbiro imamo več vrst jeklenih konstrukcijskih elementov, s katerimi lahko dosežemo velike razpone in ki omogočajo namestitvev raznih inštalacij. To so (slika 1-2):

- nosilci s posameznimi odprtinami ("beams with web openings"),
- satasti nosilci ("castellated beams" in "cellular beams"),
- gredni nosilci ("stub girders"),
- polnostenski jekleni nosilci s spremenljivo višino prečnega prereza ("tapered beams"),
- polnostenski jekleni nosilci z vutami ("haunched beams") in
- sovprežni palični nosilci ("composite trusses").

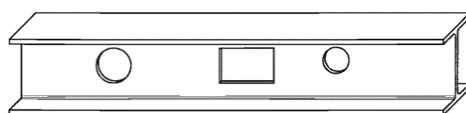


Slika 1-2: Vrste jeklenih konstrukcijskih elementov za dosego velikih razponov in možnosti vodenja inštalacij (<http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~pmoze/esdep/master/wg10/10900.htm>, pridobljeno 20.6.2017)

Figure 1-2: Structural options for achieving long spans and integration of services (<http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~pmoze/esdep/master/wg10/10900.htm>, obtained on 20.6.2017)

Najbolj pogosta metoda vgradnje inštalacij znotraj višine nosilcev, s katerimi lahko premoščamo velike razpone, je uporaba vroče valjanih jeklenih nosilcev z odprtinami (najbolj pogosto uporabljeni I ali H profil). Obstajata dve glavni vrsti nosilcev z odprtinami v stojini, kot jih navajata Lawson in Hicks (2011):

- posamezne (izolirane) odprtine pravokotne ali krožne oblike, izrezane v stojini nosilca, na položajih, kjer je vpliv med sosednjimi odprtinami minimalen (slika 1-3);

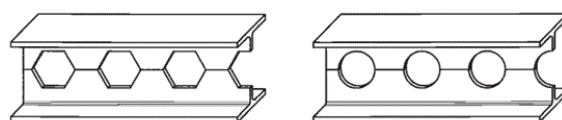


NOSILEC S POSAMEZNIMI ODPRTINAMI

Slika 1-3: Nosilec z izoliranimi odprtinami v stojini (<http://www.thecivilbuilders.com/2013/01/beams-multi-storey-buildings.html>, pridobljeno 20.6.2017)

Figure 1-3: Beam with web openings (<http://www.thecivilbuilders.com/2013/01/beams-multi-storey-buildings.html>, obtained on 20.6.2017)

- odprtine potekajo kontinuirano vzdolž celotne dolžine nosilca. Razdalja med odprtinami je majhna (slika 1-4), zato je potrebno vpliv med sosednjimi odprtinami upoštevati v računski analizi.



NOSILEC S ŠESTEROKOTNIMI ODPRTINAMI

NOSILEC Z OKROGLIMI ODPRTINAMI

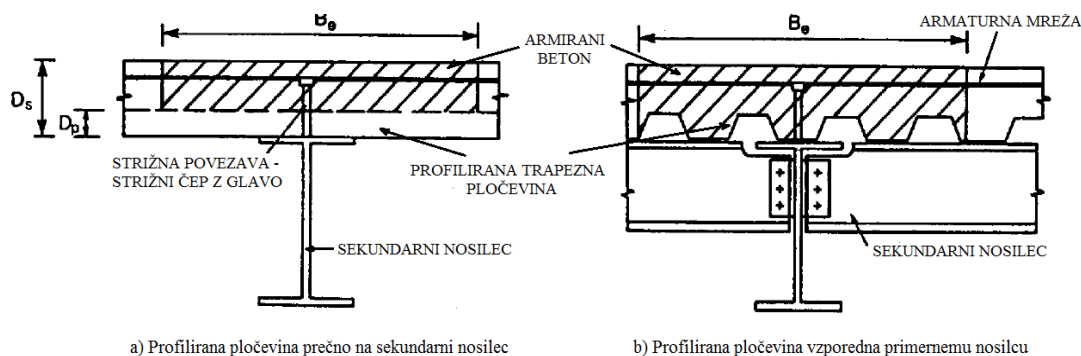
Slika 1-4: Satasti nosilci (<http://www.thecivilbuilders.com/2013/01/beams-multi-storey-buildings.html>, pridobljeno 20.6.2017)

Figure 1-4: Castellated beam (left) and cellular beam (right), (<http://www.thecivilbuilders.com/2013/01/beams-multi-storey-buildings.html>, obtained on 20.6.2017)

Poleg tega ločimo nosilce s perforirano stojino še glede na izbiro konstrukcijskega sklopa, in sicer na:

- navadne nosilce z odprtinami in
- sovprežne nosilce z odprtinami.

Le-te, ponavadi uporabljamo za medetažne konstrukcije. Pri sovprežnih nosilcih je z ustrezno strižno povezavo (običajno je to duktilni strižni čep z glavo) in prečno armaturo, potrebno zagotoviti prenos vzdolžne strižne sile med betonom in jeklenim elementom (slika 1-5). Zgornja pasnica nosilca z odprtinami, je povezana po celotni dolžini preko strižnih moznikov z armiranobetonsko ploščo. Ward (1990) pravi, da predstavlja strig pri sovprežnih nosilcih z odprtinami večji problem, kot pri navadnih nosilcih z odprtinami iste višine.

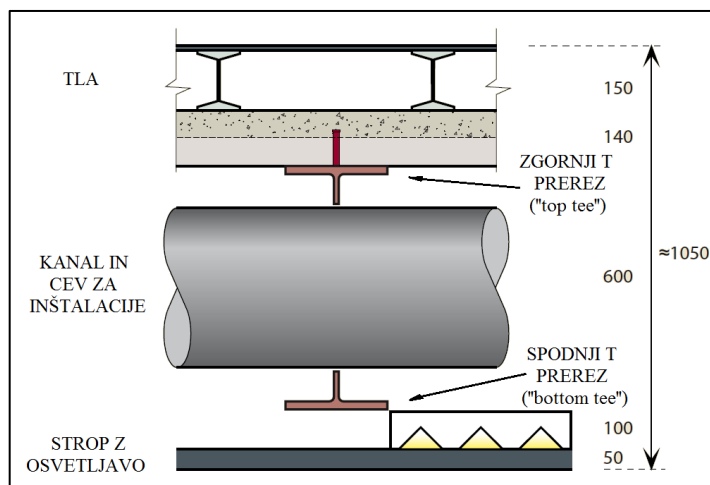


a) Profilirana pločevina prečno na sekundarni nosilec

b) Profilirana pločevina vzporedna primernemu nosilcu

Slika 1-5: Sovprežni nosilec (Ward, 1990, str. 11)

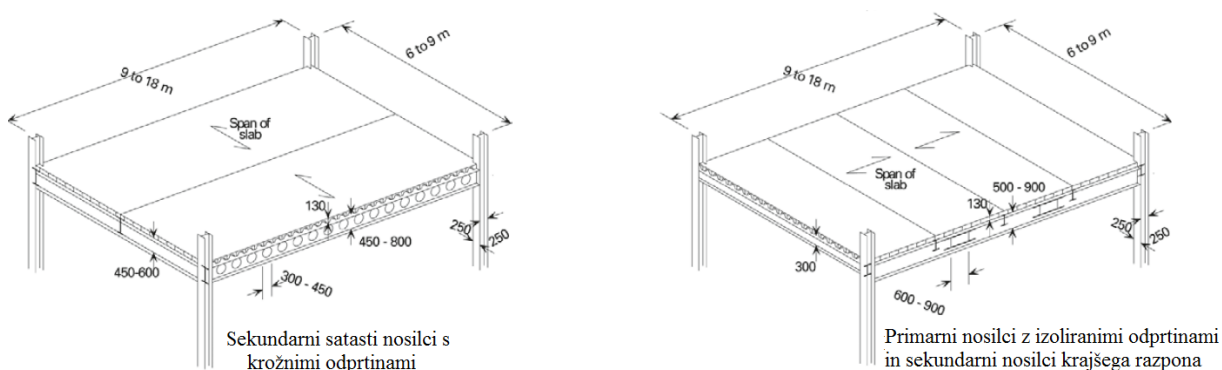
Figure 1-5: Composite beam (Ward, 1990, pp. 11)



Slika 1-6: Tipičen prečni prerez satastega sovprežnega nosilca, z vgrajenimi inštalacijami (Best practice in steel construction – commercial buildings, 2008, str. 18)

Figure 1-6: Cellular beam – typical cross-section showing services integration (Best practice in steel construction – commercial buildings 2008, pp.18)

Sataste nosilce z enakomernim potekom odprtin po celi dolžini nosilca, se pogosteje uporablja za dolge razpone sekundarnih nosilcev v konstrukciji. Medtem, ko se izdelani nosilci z izoliranimi odprtinami pogosto uporabljajo za dolge razpone primarnih nosilcev (slika 1-7).



Slika 1-7: Primera uporabe nosilcev z odprtinami za stropne oz. medetažne konstrukcije (Web openings in composite beams, 2009, str. 1)

Figure 1-7: Possible beam layouts with web openings in floor systems and in multi-storey buildings (Web openings in composite beams, 2009, pp. 1)

1.2 Razvoj nosilcev z odprtinami

1.2.1 Nosilci z izoliranimi odprtinami v stojini

Leto 1851 je zaznamovala prelomnica uporabe železa in jekla v gradbeništvu. Kot je zapisala Slivnik (2003) je bila v tem obdobju glavni mejnik Kristalna palača v Hyde Parku v Londonu, ki je bila prva demontažna zgradba narejena iz litega in kovanega železa. Pomemben dogodek iz leta 1851, ki je napovedal začetek razprave o členkastih in toga povezanih okvirih, je bila uvedba paličnih nosilcev ("trussed framework"). Palični sistemi, kot jih je predstavil pionir grafičnih metod v inženirstvu, gradbeni konstrukter Karl Cullman, označujejo novo obdobje, ki nadomešča lesene okvire z železnimi

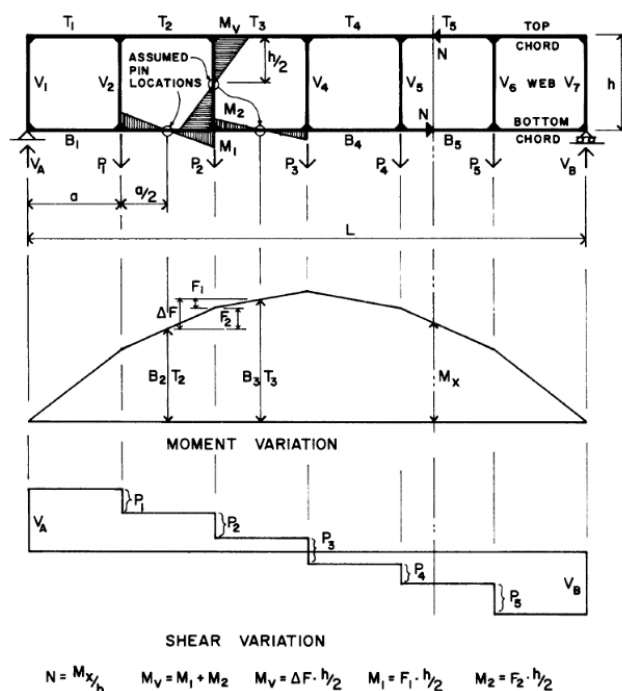
okviri (Verswijver, K. et al, 2010). Kot so navedli Verswijver et al (2010) so bili v tistem obdobju kovičeni spoji bolj zaželeni kot vijačeni, železni okviri pa zaradi tega manj uporabni.

Druga polovica 19. stoletja je bila podlaga za razpravo o členkasto in togo spojenih okvirnih sistemih. V tem kontekstu je belgijski inženir Jules Arthur Vierendeel zasnoval konstrukcijo stolpa cerkve Dadizele (Verswijver, K. et al, 2010). Leta 1897 je v svoji knjigi *Longerons en Treillis et Longerons à Arcades* objavil teorijo, ki jo je poimenoval "poutre à arcades". Ker so bili takrat primeri konstrukcij s togimi spoji precej redki, se je lahko skliceval le na stolp cerkve Dadizele (slika 1-8).



Slika 1-8: Okvirni konstrukcijski sistem stolpa cerkve Dadizele (Vierendeel, 1902, po Verswijver et al, 2010, str. 207)
Figure 1-8: Framework of the crossing tower of the Dadizele church (Vierendeel, 1902, by Verswijver et al, 2010, pp. 207)

Iz zgodovinskega vidika predstavlja Vierendeel vrsto pravokotnih okvirov "v katerih so diagonale odstranjene, grede in navpični deli pa so medseboj togo povezani." (Vierendeel, A., 1899, cit. po Verswijver, K. et al, 2010, str. 206). V nasprotju s tipičnimi členkastimi spoji pri paličju, v katerem se teoretično pojavljajo samo osne sile, ima Vierendeel-ov okvir drugačen potek napetosti. Iz slike 1-9 je razvidno, da se po Vierendeel-u prečna (strižna) sila zaradi togih spojev prenaša preko zgornjega oz. spodnjega pasu okvira na vertikale z upogibnimi momenti. V analizi je predpostavljeno, da je na sredini dolžine pasov in vertikal (v središčni liniji odprtine) moment enak nič.

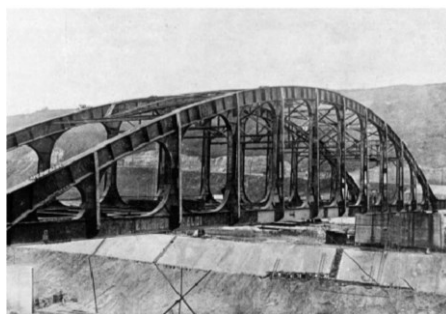


Slika 1-9: Vierendeel-ova analiza (Wickersheimer, 1976, str. 55)
Figure 1-9: Vierendeel analysis (Wickersheimer, 1976, pp. 55)

Leta 1904 je Vierendeel dokazal, da njegova teorija "poutre à arcades", zagotavlja dovolj stabilnosti s svojim prvim velikim mostom v Avelgemu, prikazan na sliki 1-10. V naslednjih desetletjih se je zgradilo še več Vierendeel-ovih mostov v Belgiji. Tipičen za to obliko je bil most na Lanayu (Albertov kanal v Belgiji), zgrajen leta 1933 (slika 1-11). Predstavljal je prvi, skoraj v celoti zvarjen most v Belgiji ter kasneje svetovno najdaljši zvarjen most z razponom 68 metrov, kot je zapisal Wickersheimer (1976, str. 56).



Slika 1-10: Prvi velik Vierendeel-ov most, zgrajen leta 1904 v Avelgemu (Verswijver et al, 2010, str. 209)
Figure 1-10: Vierendeel's first large bridge in Avelgem built in 1904 (Verswijver et al, 2010, pp. 209)



Slika 1-11: Most na Lanayu (Albertov kanal), 1933, prvi zvarjen most v Belgiji (L'Ossature Métallique, po Wickersheimer, 1976, str. 56)
Figure 1-11: Bridge at Lanaye (on the Albert Canal), 1933, the first welded bridge in Belgium (L'Ossature Métallique, by Wickersheimer, 1976, pp. 56)

Vierendeel je konstrukcijski sistem, ki je še danes v uporabi. Pri tem še vedno prihaja do razlik v prvotnem pomenu besede, kot je opisal Verswijver (2010):

- izraz Vierendeel se očitno nanaša na inženirja ter iznajditelja Arthurja Vierendeela;
- na (poenostavljeno) metodo izračuna za okvire z varjenimi stiki (togi spoji) – pravi izvorni pomen;
- sistem oz. konstrukcijo s togimi povezavami namesto s členkastimi spoji;
- pomemben korak v procesu določanja (sekundarnih) napetosti v jeklenih okvirnih sistemih ("frameworks") ob koncu 19. stoletja;
- katerokoli konstrukcijo, ki uporablja toge spoje, ne nujno v obliki pravokotnega okvira. V glavnem je to najbolj primerna opredelitev, ki je primerna, za večino sedanjih "Vierendeel-ovih" sistemov.

Kot večina konstrukcijskih sistemov tudi Vierendeel-ov okvir pridobi na togosti z večjo višino. V primerjavi z enakovredno obremenjenim paličjem bo Vierendeel-ov okvir vsekakor težji. Čeprav so diagonale odstranjene, večji upogibi elementov okvira zahtevajo tudi večje prečne prereze profilov. Danes je Vierendeel-ov okvir priljubljen, predvsem zaradi funkcionalnega in estetskega vidika, vodenja inštalacij v stavbah itd. Te lastnosti Vierendeel-ovega okvira, kot je trdil Wickersheimer (1976) ga ohranjajo konkurenčnega.

Principe Vierendeel-ovega sistema se uporablja pri razvoju in analizi jeklenih nosilcev z odprtinami, še zlasti pri satastih nosilcih.

1.2.2 Satasti nosilci

Leta 1910 je Horace E. Horton, ustanovitelj podjetja Chicago Bridge and Iron Company, prvič predlagal izdelavo nosilca s kontinuiranimi odprtinami, s sestavljanjem dveh odrezanih polovic profila, da bi s tem povečal vztrajnostni moment prečnih prereзов (Das, P. K. in Srimani, S. L., 1984, cit. po Bake M. S., 2010). V 20-ih letih je bila izvedba satastih nosilcev zelo povezana z razcvetom električne varilne tehnologije v jeklenih konstrukcijah. V 30-ih letih je tudi v Evropi uporaba satastih nosilcev postala aktualna, in sicer, ko je tovarna Škoda v Pilsnerju (Češka) izdelala prve znane sataste nosilce (Radić in Markulak, 2007). To so bili strešni nosilci, razpona 12 metrov.

To idejo je leta 1935 neodvisno razvil G.M. Boyd, konstrukter v podjetju British Structural Steel Company, katera je bila kasneje patentirana v Združenem kraljestvu Velike Britanije (Knowles, P. R., 1991, cit. po Fares, S.S. et al., 2016). Izum satastih nosilcev, ki so bili prej znani kot "Boyd nosilci", mu je leta 1939 prinesel britansko nagrado za patente. Po zaslugi proizvajalca jekla Westok, se je leta 1987 nosilec s krožnimi odprtinami prvič uvedel v jeklarsko industrijo (Westok, 2016). Poleg tega, je sedaj podjetje Westok svetoven imetnik patenta nosilcev s krožnimi odprtinami. V zadnjih 20-ih letih se je pokazalo, da so ti nosilci imeli precej vpliva na razvoj jeklenih konstrukcij. Od leta 1997 so bili ti nosilci uporabljeni v več kot 4000 projektih in 20 državah (Bake M. S., 2010).

Nedolgo nazaj je ArcelorMittal, vodilno svetovno podjetje na področju proizvodnje jeklenih nosilcev predstavilo novo generacijo satastih nosilcev, imenovanih AngelinaTM nosilci. S pomočjo priznanega francoskega arhitekta Claudea Vasconija so z upoštevanjem estetske privlačnosti, kot pravijo Vassart et al (2008), zasnovali nosilec z večjimi odprtinami od tipičnih satastih nosilcev. Rezultat je nosilec, ki je vsestranski in ponuja nove arhitekturne možnosti, v okolju prijaznem pristopu.

1.3 Izdelava

V splošnem, imamo tri metode izdelave nosilcev z odprtinami, kot jih predstavita Lawson in Hicks (2011):

- standardizirani vroče valjani profili (večinoma I profili) so obdelani tako, da so posamične odprtine izrezane v stojini nosilca, na poljubnih mestih. Ta metoda se večinoma uporablja pri nosilcih z izoliranimi odprtinami, le-te so pravokotne ali okrogle oblike (slika 1-12).



Slika 1-12: Nosilci z izoliranimi odprtinami

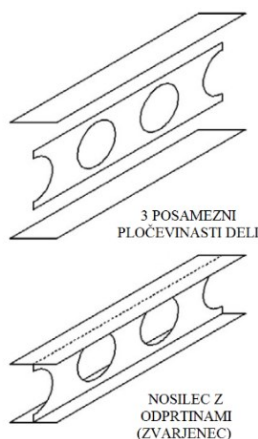
(http://www.steelconstruction.info/File:Economic_composite_cellular_beams.jpg, pridobljeno 5.8.2017.)

Figure 1-12: Beams with isolated web openings

(http://www.steelconstruction.info/File:Economic_composite_cellular_beams.jpg, obtained on 5.8.2017)

- Nosilci so izdelani iz treh posameznih pločevin, ki so zvarjene skupaj tako, da tvorijo I profil. "Najprej v pločevinasti stojini z avtomatskim izrezom izoblikujejo odprtine, nakar stojino zvarijo skupaj s pasnicami." (Bake M. S., 2010, str. 37). Nosilec je potemtakem definiran kot sestavljeni

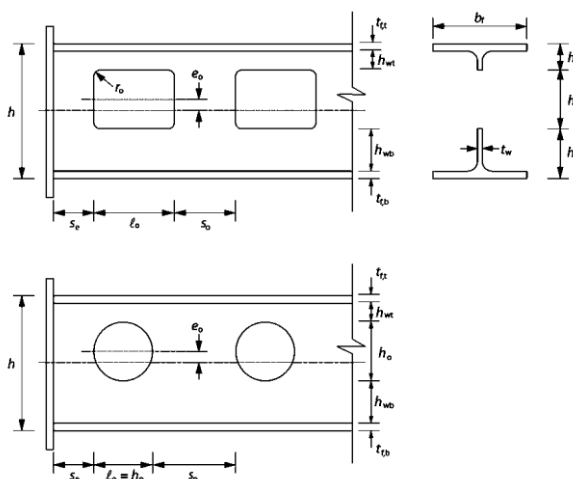
varjeni profil. Deli nosilca so lahko asimetrični, npr. z večjo spodnjo pasnico ali s spremenljivo višino prečnega prereza vzdolž dolžine nosilca. Tsavdaridis et al (2015) navajajo, da alternativna metoda sestavljanja ("the plate assembly technique") ponuja znatno povečanje svobode oblikovanja pri obliki in razporeditvi odprtin. Vendar pa velja za dražjo rešitev, zaradi dolge varilne linije vzdolž posameznih pločevin.



Slika 1-13: Alternativna metoda sestavljanja posameznih pločevinastih delov v nosilec z odprtinami (Tsavdaridis et al, 2015, str. 109)

Figure 1-13: Plate assembly manufacturing process – an alternative fabrication technique of beams with web openings (Tsavdaridis et al, 2015, pp. 109)

- Standardizirani vroče valjani jekleni profili (I ali H profili) so razrezani na dva enaka dela ter ponovno zvarjeni tako, da tvorijo višji prečni prerez nosilca. Imenujemo jih tudi satasti nosilci, ki imajo ponavljajoče se odprtine vzdolž celotne dolžine nosilca. Običajno so to nosilci s heksagonalnimi ali krožnimi odprtinami. Če sta T prereza nosilca razrezana iz različnih I profilov, dosežemo asimetrični prečni prerez. Možen je tudi prerez z asimetričnimi odprtinami (slika 1-14). Podrobnejša proizvodnja SN je opisana v poglavju 3.



Slika 1-14: Satasti nosilci z asimetričnim prerezom – ekscentričnost odprtine (Lawson in Hicks, 2011, str. 22)

Figure 1-14: Asymmetric cross-sections of beams with regular openings – eccentric opening (Lawson and Hicks, 2011, pp. 22)

Uporaba ene ali več teh metod je odvisna od števila in velikosti inštalacijskih kanalov ter cevi, ki jih je treba vključiti v konstrukcijsko zasnovo, ob upoštevanju zahtev za vzdrževanje inštalacij in spremembo uporabe prostora. Odprtine so lahko namensko oblikovane za specifične inštalacije ali pa se naknadno izdelajo na potrebnem mestu v stojini nosilca.

2 NOSILCI S POSAMEZNIMI ODPRTINAMI V STOJINI

2.1 Splošno

Višinske omejitve zaradi ekonomskih in estetskih razlogov so v večetažnih stavbah vedno bolj pogoste. Običajno so potrebni prostori, ki omogočajo prehod cevi in kanalov pod jeklenimi nosilci, kar vodi do neekonomičnih višin etaž. Vsesplošna sprejeta rešitev je uporaba odprtin v nosilcih, da se zagotovi potreben prostor za inštalacije (slika 2-1). Prisotnost posameznih odprtin v nosilcu nima večjega vpliva na zmanjšanje upogibne nosilnosti prereza, saj osrednji del stojine malo prinese k vztrajnostnemu momentu. Po Rodriguesu et al (2014) je nosilnost odvisna od oblik, velikosti in lokacij odprtin v nosilcu.



Slika 2-1: Vodenje inštalacij skozi posamezne odprtine v nosilcih (http://www.steelconstruction.info/Service_integration, pridobljeno 20.6.2017)

Figure 2-1: Service routing through steel beams with web openings (http://www.steelconstruction.info/Service_integration, obtained on 20.6.2017)

2.2 Splošna navodila pri načrtovanju

Lawson in Rackham (1989, str. 2) sta za sovprežne nosilce z izoliranimi odprtinami v stojini, predstavila splošne smernice načrtovanja, ki so:

- višina jeklenega nosilca je izbrana tako, da se lahko izreže dovolj velike, običajno pravokotne oblike odprtin (slika 2-2);
- odprtine ne smejo zasesti več kot 70% višine stojine, katere so ojačane z vodoravnimi rebri nad in pod odprtino;
- okrogle odprtine se lahko izvedejo na medsebojni razdalji polovice njihovega premera;
- velike pravokotne odprtine je potrebno izdelati v srednjo tretjino razpona nosilca, običajno dolžina odprtine ne sme presegati več kot 2-kratno višina nosilca;
- najboljše mesto za odprtine je v območju majhnih strižnih napetosti v nosilcu.



Slika 2-2: Izolirane odprtine pravokotnih oblik v sovprežnem nosilcu (Lawson in Hicks, 2011, str. 1)

Figure 2-2: Isolated rectangular openings in a composite beam (Lawson and Hicks, 2011, pp.1)

Navodila ne obsegajo vseh možnih primerov, kljub temu je zaželeno upoštevanje splošnih načel. Poleg tega, uvedba evrokod standardov (EC) zahteva, da so konstrukcijske metode skladne z načeli in pravili uporabe SIST EN 1993 ter SIST EN 1994, za projektiranje jeklenih in sovprežnih konstrukcij. Osnutek priloge Annex N: Openings in webs k predstandardu ENV 1993-1-1, ki je zajemal načrtovanje nosilcev z odprtinami, ni bil niti objavljen niti vključen v EC. "Umaknjen je bil zaradi nezanesljivosti analize, še posebej pri preverjanju lokalnega izbočenja območja med dvema sosednjimi polovicami odprtini ("web post buckling") in Vierendeel-ove porušitve." (Bake, M. S., 2010, str.51). Trenutno je v teku priprava osnutka predloga predstandarda EN 1993-1-13: Steel beams with large web openings – April 2017. Več o osnutku predstandarda bo govora v 5. poglavju.

2.3 Inštalacijski sistemi

Potreba po inštalacijah v stavbah se je močno povečala, prav tako je potrebno vključiti tehnologije z nizkim ogljičnim odtisom ("embodied carbon"). Aktualne so nove zahteve po učinkovitejših načinih hlajenja, prezračevanja, ogrevanja, informacijske tehnologije in komunikacijski sistemi ter nove oblike obnovljivih virov energije. Zato je potrebno poiskati rešitve za učinkovito organizacijo storitev znotraj stavb in tako olajšati njihovo prihodnje vzdrževanje ter prilagodljivost.

2.3.1 Vrste inštalacijskih sistemov

Sodobne stavbe zahtevajo različne vrste storitev, ki zagotavljajo zdravje in udobje uporabnikov. McKenna in Lawson (2009) sta storitve razdelila v naslednje kategorije:

- klimatizacijski in ventilacijski sistemi (vertikalni ventilacijski vodi zraka);
- ogrevanje in hlajenje, vključno s kontrolo temperature v vsaki etaži stavbe;
- protipožarni sistemi, ki vključujejo protipožarne brizgalke, naprave za odkrivanje požara, naprave za odvod dima ipd.;
- elektroinštalacije in komunikacijski sistemi;
- vodovodne in sanitarne inštalacije;
- tehnologije za proizvodnjo energije z nizkim ogljičnim odtisom (npr. toplotne črpalke).

Poleg tega, se mora zagotoviti vode, ki so namenjeni nemoteni distribuciji zgoraj omenjenih storitev. To so sistemi, ki vključujejo dovodne in odvodne cevi oz. kanale. Vključitev inštalacij znotraj konstrukcijskih elementov vodi do zmanjšanja višine etaž, kar ima dvojno korist, in sicer manjše povšine fasadnih sistemov ter manjše toplotne izgube skozi ovoj stavb. V večnadstropnih objektih lahko integracija omogoča dodatno nadstopje v isti celotni višini stavbe (slika 3-20).

3 SATASTI NOSILCI

3.1 Splošno

"Castellated beam" je po Boyerju (1964) izraz, ki se nanaša na tip nosilca z večjo višino prečnega prereza. Ime izhaja iz vzorca odprtini v stojini, saj "castellated" pomeni "built like a castle, having battlements, or regular holes in the walls, like a castle" (Boyer, J. P., 1964, str. 104). Iz tega je razvidno, da so nosilce s heksagonalnimi odprtinami poimenovali po zobčastem pročelju gradu.

Napredek v oblikovanju odprtin, od heksagonalnih do najbolj pogosto uporabljenih krožnih odprtin in novega izuma – satasti nosilci s sinusoidnim potekom odprtin kaže, da poleg načrtovanja nosilnosti lahko tudi estetski videz opraviči razvoj novega prereza nosilca (Tsavdaridis, K. D. et al, 2015).

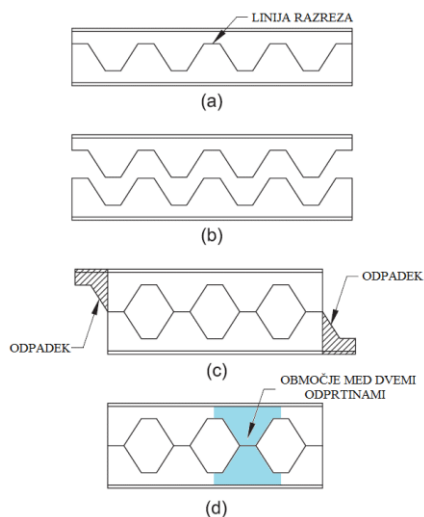
3.2 Vrste satastih nosilcev

Satasti nosilci so običajno razvrščeni glede na vrsto oz. obliko perforacije izdelane v stojini nosilca. V nadaljevanju so predstavljeni satasti nosilci, ki so razvrščeni glede na obliko odprtine.

3.2.1 Heksagonalne in oktagonalne odprtine

Satasti nosilci s heksagonalnimi odprtinami so izdelani z računalniško vodenim izrezom (plamenski ali plazemski rez) tako, da ustvarijo cikcak vzorec vzdolž stojine jeklenega vroče valjanega profila. Proces proizvodnje je prikazan na sliki 3-1. Koraki izdelave so sledeči (Fares, S. S. et al, 2016):

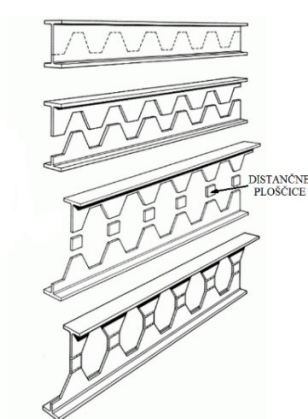
- v stojini tipskega profila se s plamenskimi rezom ustvari linijo razreza, v obliki izbranega vzorca, v tem primeru trapezne oblike (cikcak vzorec);
- ko je profil razrezan, se razdeli na polovici prečnega prereza;
- nato se polovici translatorno premakne in pozicionira tako, da odprtine predstavljajo pravilne šestkotnike;
- postopek se zaključi z varjenjem stojin dveh T prerezov. Običajno se izdela polno ali delno penetrirani zvar iz ene strani stojine. Odpadke se na koncih nosilca odstrani.



Slika 3-1: Izdelava SN s heksagonalnimi odprtinami (Fares et al, 2016, str. 1)
Figure 3-1: Manufacturing of a castellated beam (Fares et al, 2016, pp. 1)

Končni proizvod ima pri enaki teži nosilca večjo višino, s tem večji vztrajnostni moment okoli močnejše osi in posledično večjo upogibno nosilnost.

Višino satastega nosilca s heksagonalnimi odprtinami lahko dodatno povečamo, in sicer z varjenjem pločevinastih ploščic na mestu stičišča dveh T prerezov (Saneebamol, M. A. in Soni, S., 2016). S tem dosežemo povišane oktagonalne oz. osmerokotne odprtine v stojini nosilca (slika 3-2). Distančne ploščice so lahko kvadratne ali pravokotne oblike. Nosilec z oktagonalnimi odprtinami, je znan tudi kot "Litzka nosilec", ki ga je razvilo podjetje Litzka Stahlbau iz Bavarske, Nemčija (Boyer, J. P., 1964).



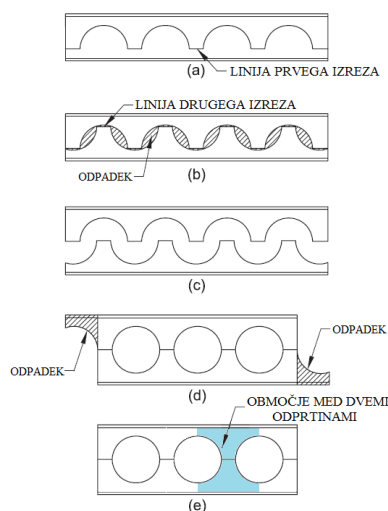
Slika 3-2: SN z osmerokotnimi odprtinami (višina je povečana z distančnimi ploščicami) – Litzka nosilec
(<http://www.grunbauer.nl/eng/wat.htm>, pridobljeno 3.8.2017.)
Figure 3-2: Castellated beam with octagonal web openings (depth is increased with increment plates) – Litzka beam
(<http://www.grunbauer.nl/eng/wat.htm>, obtained on 3.8.2017.)

3.2.2 Okrogle odprtine

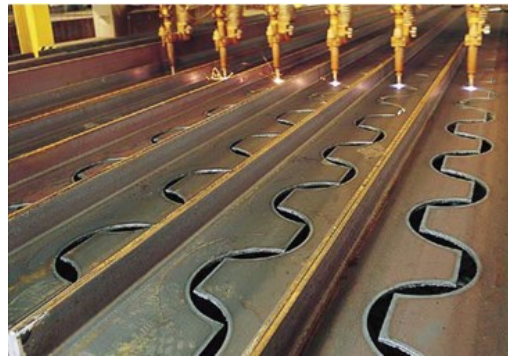
Satasti nosilci s krožnimi odprtinami so sodobnejša izvedba tradicionalnih nosilcev s heksagonalnimi odprtinami. So približno za 40-60% višji in do 1,5-krat bolj nosilni, kot v primerjavi s prvotnim profilom (Westok, 2016). Končna višina prereza nosilca, premer odprtine in prostor med odprtinami so lahko spremenljive.

"Celični" nosilci so izdelani z uporabo polkrožnega vzorca rezanja. Da bi dosegli ponavljajoči se vzorec, sta potrebna dva rezalna prehoda, kot je prikazano na sliki 3-3. Čas izdelave okroglih odprtin je daljši kot pri nosilcih s heksagonalnimi odprtinami. Faze izdelave po Fares et al (2016) so naslednje:

- prva linija izreza je izdelana z avtomatskim plamenskim izrezom v polkrožnem vzorcu;
- z drugim polkrožnim rezalnim prehodom (slika 3-4) dosežemo dodatne odpadke, v primerjavi z izrezom vzorca pri nosilcih s šesterokotnimi odprtinami;
- ko sta oba dela izrezana, sta polovici profila zamaknjeni in zvarjeni skupaj, da tvorita nosilec. Zatem, se odreže še odpadke materiala na koncih nosilca.



Slika 3-3: Izdelava SN s krožnimi odprtinami (Fares et al, 2016, pp. 2)
Figure 3-3: Manufacturing of a cellular beam (Fares et al, 2016, pp. 2)



Slika 3-4: Plamenski drugi izrez stojin vroče valjanih profilov, v polkrožnem vzorcu (Arcelor Mittal Ltd., Katalog izdelkov - ACB[®], str. 6)

Figure 3-4: A double cut-out in the webs by flame cutting hot rolled sections, in circular pattern (Arcelor Mittal Ltd., Product catalogue - ACB[®], pp. 6)

Alternativna metoda proizvodnje "celičnih" nosilcev temelji, na principu sestavljanja treh posameznih pločevin, ki jih zvarijo v končni nosilec ("the plate assembly technique"), kot je razvidno iz slike 3-5. To metodo za izdelavo nosilcev s krožnimi odprtinami uporabljajo v podjetjih Barnshaws in Fabsec, Združeno Kraljestvo.

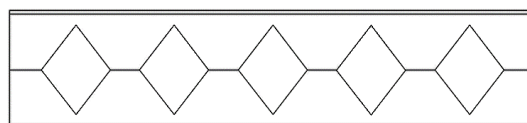


Slika 3-5: SN s krožnimi odprtinami, izdelani iz posameznih pločevinastih plošč (<http://www.barnshaws.com/news/curved-cellular-beams-adding-strength-to-remove-weight>, pridobljeno 3.8.2017.)

Figure 3-5: Cellular beams fabricated from steel plates (<http://www.barnshaws.com/news/curved-cellular-beams-adding-strength-to-remove-weight>, obtained on 3.8.2017.)

3.2.3 Diamantna oblika odprtine

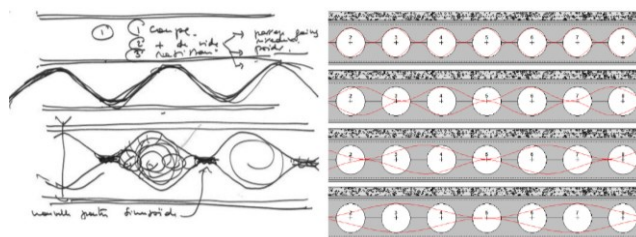
Sataste nosilce je možno optimizirati z diamantno obliko odprtine (slika 3-6). V parametrični študiji sta Jamadar in Kumbhar (2015) ugotovila, da so nosilci z diamantno obliko odprtin bolj odporni na lokalne porušitve, saj je na voljo večje območje prenosa strižnih napetosti, v primerjavi z nosilci s krožnimi odprtinami. Tudi mejna nosilnost je večja, kot pri "celičnih" nosilcih.



Slika 3-6: Primer SN z diamantno obliko odprtin
Figure 3-6: Example of a castellated beam with diamond shaped openings

3.2.4 Sinusoidna oblika odprtine

Vrsta satastih nosilcev s sinusoidno obliko odprtin ponuja novo rešitev nosilcev z odprtinami za doseganje velikih razponov. Patentiral jih je proizvajalec jekla ArcelorMittal (Luksemburg), pod imenom Angelina™. Z novo obliko odprtine (slika 3-7) so poenostavili proces gradnje in hkrati ohranili elegantnost konstrukcije. Za nov dizajn so leta 2007 na gradbenem sejmu Batimat v Parizu, prejeli nagrado, in sicer The Golden Design Medal (Vassart O. et al, 2008).

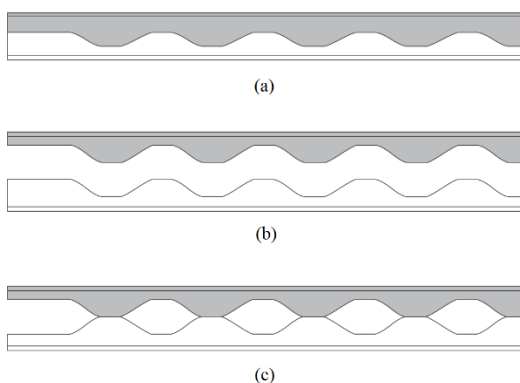


Slika 3-7: Prva skica Claudea Vasconija in postopek preoblikovanja nosilca s krožnimi odprtinami v Angelina™ nosilec (Vassart et al, 2008, str. 14)

Figure 3-7: First drawing from Mr Claude Vasconi and process of modification cellular beam to Angelina™ (Vassart et al, 2008, pp. 14)

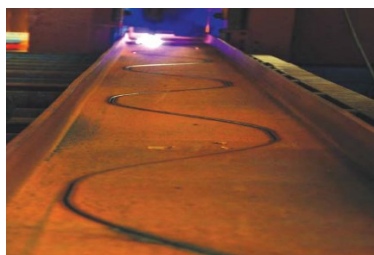
Patentirana metoda (slika 3-8), ki se uporablja za izdelavo Angelina™ nosilcev, temelji na izključni uporabi vroče valjanih profilov. Postopek izdelave je podoben, kot pri satastih nosilcih z drugimi oblikami odprtin (ArcelorMittal, 2015):

- a) po določeni sinusoidni črti, poteka izrez s plamenskim rezom v stojini profila (slika 3-9);
- b) dobljeni T polovici prereza se translatorno premakneta;
- c) T polovici se zvari skupaj, kar vodi do povečanja višine končnega nosilca.



Slika 3-8: Izdelava SN s sinusoidnim potekom odprtin – Angelina™ nosilec (ArcelorMittal, 2015, str. 7)

Figure 3-8: The fabrication of a castellated beam with sinusoidal openings – Angelina™ beam (ArcelorMittal, 2015, pp. 7)



Slika 3-9: Plamenski izrez v vzorcu sinusoide (ArcelorMittal, 2015, str. 8)

Figure 3-9: Flame cutting of sinusoidal pattern (ArcelorMittal, 2015, str. 8)

Nosilec je bil optimiziran za gradnjo večnadstropnih poslovnih objektov. Pri teh nosilcih lahko dosežemo manjšo težo konstrukcije in večji razpon, s čimer zagotovimo več koristnih površin brez stebrov. Zahvaljujoč krajšemu času proizvodnje in znatnim prihrankom materiala ter s tem manjšimi stroški izdelave, Angelina™ izpolnjuje tudi zahteve iz vidika trajnostne gradnje. (ArcelorMittal, 2015).

Pri raziskavi optimiranja višin prečnih prerezov nosilcev s heksagonalnimi odprtinami, so Wakchaure et al (2012) poročali o glavnih vzrokih porušitev. To so predvsem lokalna odpoved nosilca in koncentrirane strižne napetosti v vogalih heksagonalnih odprtin (Vierendeel-ov efekt). Kot modifikacija nosilcev s šesterokotnimi odprtinami, so odprtine Angelina™ nosilcev povečane in imajo zaobljene robove (slika 3-10). Prednosti kot sta jih predstavila Kumbhar in Jamadar (2015) so naslednje:

- večje odprtine omogočajo lažji prenos striga;
- zaradi zaobljenih robov se izognemo Vierendeel-ovemu efektu;
- izkaže se, da nosilci s sinusoidnimi odprtinami prenesejo večje obremenitve v primerjavi z drugimi oblikami odprtin.



Slika 3-10: Primerjava velikosti odprtine med SN s krožnimi odprtinami in Angelina™ nosilcem (ArcelorMittal, 2015, str. 3)
Figure 3-10: Size comparison of web opening between cellular and Angelina™ beams (ArcelorMittal, 2015, pp. 3)

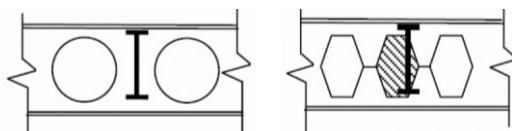
3.3 Primerjava nosilcev s heksagonalnimi in krožnimi odprtinami

Tako "celični" kot nosilci s heksagonalnimi odprtinami zagotavljajo prehod inštalacij in imajo večjo upogibno nosilnost v primerjavi s polnostenski nosilci.

Nosilci s krožnimi odprtinami so cenejši trdi Erdal (2011), zaradi njihove prilagodljive geometrije. Čeprav so dimenzije profila s heksagonalnimi odprtinami fiksne, kot so: višina prereza, premer odprtin in razmak med njimi, so v nosilcih s krožnimi odprtinami fleksibilne. Zaradi tega, so lahko "celični" nosilci lažji in običajno zahtevajo manj ojačitev (Bake, M. S., 2010).

Zapolnitve odprtin satastih nosilcev je potrebna v dveh primerih (Bake, M. S., 2010):

- na območju velikih strigov, kot npr. ob podporah ali/in pri drugih koncentriranih obtežbah;
- pri priključkih s sekundarnimi nosilci. Zaradi fleksibilnosti dimenzij "celičnih" nosilcev ni potrebe po zapolnitvah odprtin (glej sliko 3-11).



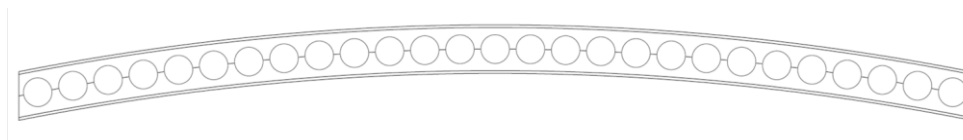
Slika 3-11: Primerjava uporabe zapolnitev odprtin s ploščami v SN, (Bake, 2010, str. 39)
Figure 3-11: Comparing use of infill plates in cellular (left) and castellated beams (right), (Bake, 2010, pp. 39)

Dodatna prednost nosilcev s krožnimi odprtinami je ta, da lahko izdelamo asimetrične prereze, kot npr. pri sovprežnih nosilcih, kjer je lahko del nosilca pod odprtino ("bottom tee") večjih dimenzij kot zgornji del ("top tee"). Nasprotno pa nosilci s heksagonalnimi odprtinami imajo lahko le simetrične prereze.

3.4 Modifikacija profila satastih nosilcev

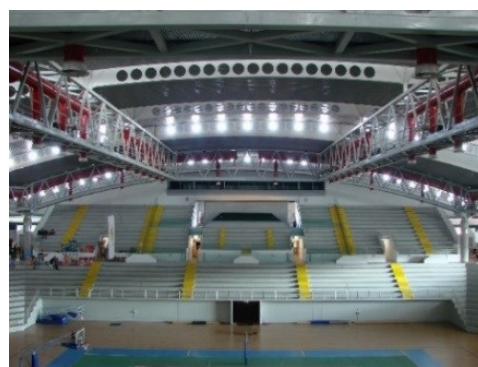
3.4.1 Ukrivljeni satasti nosilci

Željeno ukrivljenost satastega nosilca se brez velikih dodatnih stroškov lahko doseže med samo izdelavo (pred fazo varjenja), in sicer s prilagajanjem nagiba T prerezov razrezanega nosilca (slika 3-12).



Slika 3-12: Primer ukrivljenega SN s krožnimi odprtinami (ArcelorMittal, 2015, str. 9)
Figure 3-12: Example of a curved cellular beam (ArcelorMittal, 2015, pp. 9)

Ukrivljeni nosilci so še posebej primerni za strešne konstrukcije industrijskih hal in večnadstropnih poslovnih stavbah.

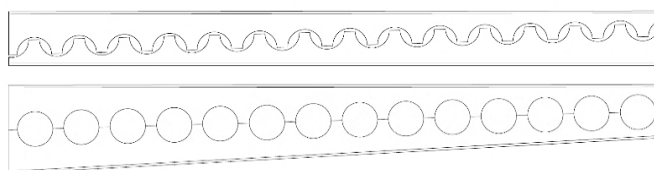


Slika 3-13: Spyros Kyprianou športni center, Ciper (ArcelorMittal, 2014, str. 10)
Figure 3-13: Spyros Kyprianou Athletic Center, Cyprus (ArcelorMittal, 2014, pp. 10)

Notranje sile v ukrivljenih nosilcih so različne od tistih v ravnih nosilcih. Ukrivljenost poleg globalnega upogibnega momenta in strižne sile ustvarja tudi osno silo, ki vpliva na notranje obremenitve okrog odprtin v stojini nosilca (Durif, S. et al, 2012).

3.4.2 Satasti nosilci s spremenljivo višino prečnega prereza

Sataste nosilce s spremenljivo višino prečnega prereza se oblikuje tako, da se vzorec rezanja vzdolž dolžine stojine vroče valjanega profila izreže pod poljubnim kotom. Zatem se eno od polovic izrezanega profila rotira za 180° in zvari skupaj stojine T prerezov, kot je prikazano na sliki 3-14.



Slika 3-14: Primer SN s krožnimi odprtinami s spremenljivo višino prečnega prereza (ArcelorMittal, 2014, str. 8)
Figure 3-14: Example of a tapered cellular beam (ArcelorMittal, 2014, pp. 8)

Tako prilagojeni nosilci so kot konstrukcijski elementi velikokrat uporabljeni za:

- konzole velikih razponov (npr. športni stadion, glej sliko 3-15),
- kontinuirane nosilce (most za pešce itd.),
- grede v okvirnih konstrukcijskih sistemih ipd.



Slika 3-15: Daljši SN z nekonstantno višino prečnega prereza (Fares et al, 2016, str. 8)
Figure 3-15: Tapered roof support beams with long span (Fares et al, 2016, pp. 8)



Slika 3-16: The Renault Centre, Swindon (<http://www.fosterandpartners.com/projects/renault-distribution-centre/>, pridobljeno 5.8.2017)

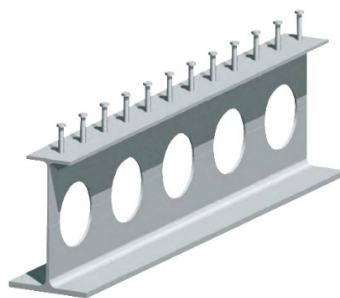
Figure 3-16: The Renault Centre, Swindon (<http://www.fosterandpartners.com/projects/renault-distribution-centre/>, obtained on 5.8.2017)

Notranje sile v nosilcih s spremenljivo višino prereza so različne od tistih v ravnih nosilcih, kljub temu se lahko uporabi enake principe izračuna nosilnosti kot za ravne nosilce (Durif, S. et al, 2012).

3.4.3 Asimetrični prerezi satastih nosilcev

Satasti nosilci z asimetričnimi prerezi so najbolj primerni za sovprežne konstrukcije. Poznamo dve metodi proizvodnje, in sicer:

- s povezovanjem dveh T prerezov različnih dimenzij ali celo razredov kvalitete jekla. Za medetažne konstrukcije se večinoma uporabi spodnji T prerez z večjo pasnico (slika 3-17), zaradi izpostavljenosti nateznim napetostim (ArcelorMittal, 2014).

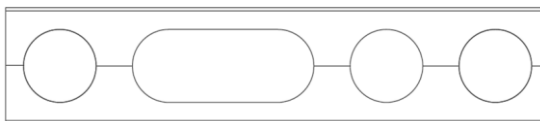


Slika 3-17: Sovprežni SN s krožnimi odprtinami z asimetričnim prečnim prerezom (ArcelorMittal, 2015, str. 10)
Figure 3-17: Asymmetrical cellular composite beam (ArcelorMittal, 2015, pp. 10)

- Z alternativno metodo sestavljanja nosilcev iz 3 pločevin ("the plate assembly technique").

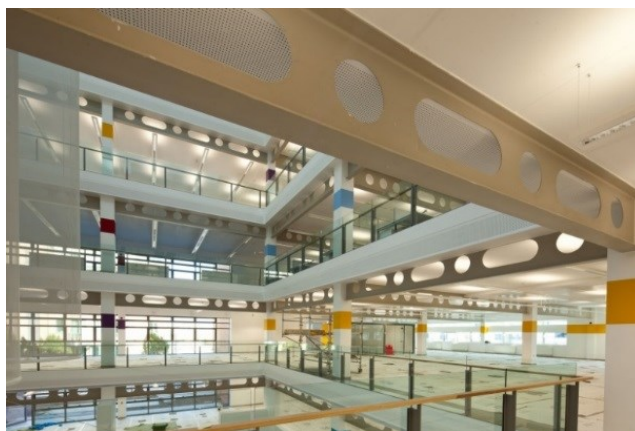
3.4.4 Podolgovate odprtine

Večkrat je potrebno dodatno odpreti prostor med dvema odprtinama, kar lahko dosežemo s podaljšanjem odprtine (slika 3-18). Takšne odprtine je potrebno pozicionirati blizu sredine razpona nosilca oz. v območju nizkih strižnih napetosti (ArcelorMittal, 2014). Če je zahtevano mesto podolgovate odprtine v bližini podpor jo je pogosto potrebno ojačati.



Slika 3-18: Primer podolgovate odprtine v SN s krožnimi odprtinami (ArcelorMittal, 2014, str. 9)
Figure 3-18: Example of cellular beam with elongated opening (ArcelorMittal, 2014, pp. 9)

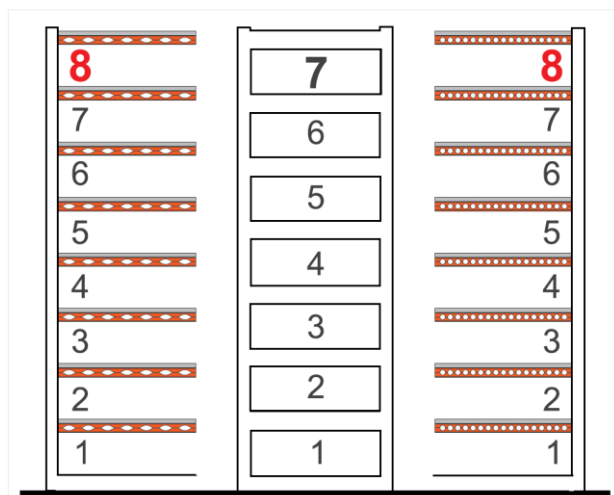
Izvedba podolgovatih odprtin v primerjavi z okroglimi ni ekonomična. Najbolj učinkovita gradnja s stroškovnega vidika je uporaba "celičnih" nosilcev in vodenje krožnih kanalov za inštalacije brez podolgovatih odprtin (Macsteel, 2003). Primer uporabe satastih nosilcev s podolgovatimi odprtinami je prikazan na sliki 3-19.



Slika 3-19: SN s krožnimi in podolgovatimi odprtinami, pisarne mestnega sveta v Birminghamu
(<http://www.steelconstruction.info/images/c/c0/C5fig24.jpg>, pridobljeno 5.8.2017)
Figure 3-19: Cellular beams combining circular and elongated openings, Birmingham City Council offices
(<http://www.steelconstruction.info/images/c/c0/C5fig24.jpg>, obtained on 5.8.2017)

3.5 Uporaba in prednosti satastih nosilcev

Kot je že bilo predhodno omenjeno, satasti nosilci v primerjavi s polnostenskimi nosilci ponujajo številne prednosti oblikovanja in gradnje. Na primer s povišanjem prereza nosilca in uvedbe odprtin v stojini dosežemo: večjo višino pri enaki teži, daljše razpone, boljše možnosti vodenja inštalacij, s čimer se zmanjša višina posameznega nadstropja (Fares, S. S. et al, 2016). Vassart et al (2008) v tem pogledu navajajo primer, da bi lahko v večetažnih stavbah z uporabo satastih nosilcev v primerjavi z drugimi vrstami jeklenih nosilcev (glej sliko 1-2), namesto sedem zgradili osem etaž (slika 3-20).



Slika 3-20: Dodatna etaža v večetažnem objektu, po zaslugi uporabe SN (ArcelorMittal, 2015, str. 27)

Figure 3-20: Additional level through cellular and Angelina™ beams in multi-storey building (ArcelorMittal, 2015, pp. 27)

Satasti nosilci na splošno omogočajo razpone do 40 m odvisno od pogojev podpiranja (slika 3-21). Veliki razponi in manjše število stebrov omogočajo večjo fleksibilnost pri načrtovanju ureditve prostorov, kot npr. v parkirnih hišah, industrijskih stavbah (hale), poslovnih objektih, nakupovalnih centrih, šolah, bolnišnicah, mostovih, stadionih, športnih objektih, ipd.



Slika 3-21: Ukrivljeni SN s krožnimi odprtinami, ki premošča 25m razpon; nakupovalni center Thionville, Francija (ArcelorMittal, 2015, str. 9)

Figure 3-21: Curved cellular beams spanning 25m; shopping centre Thionville, France (ArcelorMittal, 2015, pp. 9)

Parkirne hiše

V zadnjih 15 letih se je v načrtovanju parkirnih hiš uporaba satastih nosilcev znatno povečala. Običajno lahko zadostimo razpon v območju 16 m. Satasti nosilci omogočajo večjo naravno osvetljenost notranjosti objekta, kot polnostenski nosilci (slika 3-22). Poleg tega omogočajo odprtine boljše kroženje zraka med posameznimi prostori, kar prispeva k manjši onesnaženosti zraka z izpušnimi plini avtomobilov (ArcelorMittal, 2014).



Slika 3-22: Uporaba SN s sinusoidnim potekom odprtin (Angelina™) v parkirni hiši (ArcelorMittal, 2015, str.6)
Figure 3-22: Castellated beams (Angelina™) used in parking structure (ArcelorMittal, 2015, pp.6)

Z ukrivljanjem nosilcev lahko omočimo boljše odvodnjavanje meteornih vod (dež, sneg in led). Fares et al (2016) so tudi opozorili, da je potrebno pretehtati izbiro antikorozivne zaščite nosilcev in priporočili, da se jeklo zaščiti z vročim cinkanjem ("hot-dip galvanization coat").

Industrijski objekti

V industrijski objektih se pogosto uvaja dodatna oz. vmesna etaža, t.i. mezanin (slika 3-23), namenjena za: skladiščne viseče transportne ter prezračevalne sisteme in celo poslovne prostore. V teh primerih je zaradi manjšega števila stebrov uporaba satastih nosilcev optimalna.



Slika 3-23: Industrijska hala z mezaninom (Fares et al, 2016, str. 6)
Figure 3-23: Industrial facility with mezzanine (Fares et al, 2016, pp. 6)

Vodenje inštalacij

Ena od številnih prednosti satastih nosilcev je tudi nemoteno vodenje inštalacij. Lahko se uporabljajo za vgradnjo vodov, "HVAC" sistemov in protipožarnih sistemov ter drugih storitev (slika 3-24).

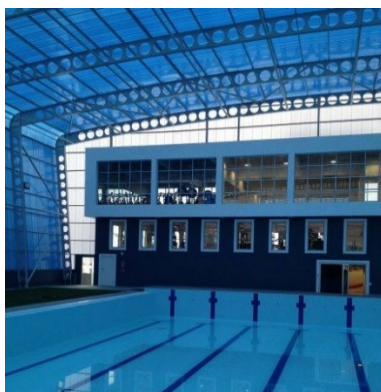


Slika 3-24: Vodenje inštalacij skozi odprtine SN (ArcelorMittal, 2014, str. 24 in 2015, str. 19)

Figure 3-24: Integration of the services through beams with web openings (ArcelorMittal, 2014, pp. 24 and 2015, pp. 19)

Satasti nosilci kot stebri in fasadni elementi

"Celični" nosilci uporabljeni kot stebri, so učinkoviti v primerih manjše vertikalne in horizontalne obtežbe. Če prevladuje obtežba vetra, se lahko uporabi nosilec z asimetričnim prerezo (Macsteel, 2003). Kjer je zahtevana višina objekta, uporaba "celičnih" stebrov postaja vedno bolj ekonomična v primerjavi s polnostenskimi. Glej sliko 3-25.



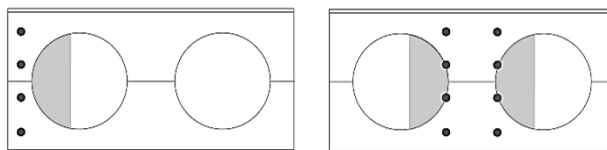
Slika 3-25: SN s krožnimi odprtinami kot stebri (<http://www.macsteel.co.za/files/imagecache/view/products/images/pool.jpg>, pridobljeno 5.8.2017)

Figure 3-25: Cellular beams as columns (<http://www.macsteel.co.za/files/imagecache/view/products/images/pool.jpg>, obtained on 5.8.2017)

3.6 Problematika uporabe satastih nosilcev

3.6.1 Priključki satastih nosilcev

Vzorec odprtini kot pravijo Fares et al (2016) se lahko prilagodi tako, da se na koncih nosilca oz. ob podporah zagotovi polno stojino v velikosti območja med dvema polovicami odprtini ("web post"). V primerih, ko to ni mogoče doseči, je potrebno odprtino v celoti zapolniti ali delno zapolniti eno ali dve odprtini, kot je prikazano na sliki 3-26. V splošnem se vrste spojev, ki se uporabljajo za sataste nosilce ne razlikujejo od tistih, ki se uporabljajo za polnostenske nosilce.



Slika 3-26: Primera delne zapolnitve odprtin pri izvedbi priključkov (ArcelorMittal, 2014, str. 12)
Figure 3-26: Examples of partially filled openings to allow for assembly joints (ArcelorMittal, 2014, pp. 12)

3.6.2 Koncentrirana obtežba

Običajno so satasti nosilci obremenjeni z enakomerno porazdeljeno linijsko obtežbo, pod določenimi pogoji tudi v kombinaciji s točkovnimi silami. Če zahtevana mejna nosilnost prereza presega mejno obremenitev nosilcev, je potrebno zagotoviti ojačitve v stojini nosilcev. Več o tem v poglavju 4.

3.6.3 Stabilnost nosilcev med gradnjo

Fares et al (2016) opozarjajo, da je treba SN zaradi nestabilnosti med transportom, dvigovanjem in manipulacijo bočno podpreti (slika 3-27). Zahteve glede načina podpiranja so praviloma določene s strani proizvajalcev jeklenih nosilcev.



Slika 3-27: Značilno bočno podpiranje SN med gradnjo (Fares et al, 2016, str. 10)
Figure 3-27: Typical erection bracing for cellular beams (similar application for castellated beams; Fares et al, 2016, pp. 10)

3.6.4 Vibracije

Ker so satasti nosilci v primerjavi s polnostenskimi višji za 40-60% in 1,5-krat bolj nosilni, imajo zato bolj tog prečni prerez (Westok, 2016). S povečano togostjo SN se zmanjšajo vplivi vibracij v konstrukcijah (talne, medetažne in stropne – strešna pohodna površina).

3.6.5 Požarna zaščita

Vse bolj prihaja v ospredje vprašanje požarne zaščite konstrukcij, še zlasti pri vidnih jeklenih elementih. Čeprav je jeklo negorljivo pa ima zelo nizko požarno odpornost. Jeklene konstrukcije je zato potrebno požarno zaščititi, saj se "nosilnost s povišano temperaturo hitro zmanjšuje, in ko je dosežena kritična temperatura, nastopi porušitev konstrukcije." (Hajdukovič, M. 2003, str.54).

Sčasoma se je na podlagi preizkušanj izkazalo, da predpostavka glede izračuna kritičnih temperatur za polnostenske nosilce ni pravilna, ko gre za sataste nosilce. Dokazano je bilo, da geometrija nosilcev definira mejno temperaturo in da jo je potrebno oceniti za vsaki "celični" nosilec posebej – ni

univerzalnih rešitev. ASFP in SCI so razvili konstrukcijske modele za nosilce s krožnimi in pravokotnimi odprtinami, ki omogočajo izračun mejne temperature kot funkcijo geometrije in obremenitve nosilca. Izračun za določitev pravilne debeline intumescentne prevleke nosilca temelji na podlagi faktorja prečnega prereza, izračunanega po enačbi (ASFP in SCI, Yellow Book, 2010):

$$\text{Faktor prečnega prereza} = \frac{1400}{t}, \text{ kjer je } t \text{ debelina stojine nosilca v mm.}$$

3.6.6 Antikorozijska zaščita

Antikorozijska zaščita je enaka tako za sataste nosilce kot tudi za druge konstrukcijske elemente. Vrsto zaščite je potrebno določiti glede na tip izpostavljenosti jekla in želeni čas vzdrževanja. Priporočljivo je uporabiti premaze na osnovi epoksi veziv ali vroče pocinkane prevleke ("hot-dipped galvanization coat"). Fares et al (2016) so ugotovili, da je vroče pocinkana prevleka primernejša za "celične" sataste nosilce kot pa za nosilce s heksagonalnimi odprtinami, saj pri ostrih robovih odprtin nastanejo razpoke.

3.6.7 Trajnostna gradnja

"Za trajnostne stavbe velja, da v času načrtovanja, gradnje, obratovanja in odstranitve sledijo načelu skrbnega ravnanja z okoljem in ohranjanja naravnih virov ter, da je njihova gradnja in uporaba ekonomična. Trajnostne stavbe morajo biti prijazne do uporabnika in njegovega zdravja, izpolnjevati pričakovanja glede funkcionalnosti in prispevati k ohranjanju družbenih in kulturnih vrednot." (GI ZRMK, str. 1).

Gradnja z uporabo satastih nosilcev (ACB[®] in Angelina[™]) sovпада z različnimi trajnostnimi vidiki, ki so povzeti v nadaljevanju (ArcelorMittal, 2014, str. 40; 2015, str. 26):

a) Okoljski vidiki

- Sestava: jeklo lahko recikliramo z minimalnim vplivom na njegovo kakovost. Satasti nosilci so izdelani iz 100% odpadnega materiala, od tega je 85% recikliranega jekla.
- Proizvodni proces: ArcelorMittal proizvaja vroče valjane profile s pomočjo elektroobločne peči, ki omogoča znatno zmanjšanje hrupa, emisij delcev in ogljikovega dioksida (CO₂) ter porabe vode, v primerjavi z drugimi tehnologijami proizvodnje jekel. Poleg tega, uporabljajo avtomatizirane tehnologije, ki omogočajo natančno rezanje s čim manjšim odpadkom.
- Prilagodljivost pri uporabi: prilagodljivost satastih nosilcev se izkaže zlasti pri prenovi obstoječih stavb.
- Ogljični odtis ("carbon footprint"): navadni satasti nosilci lahko vsebujejo do 25% manj ogljičnega odtisa od standardnih vroče valjanih profilov.

b) Ekonomski vidiki

- Stavbe morajo biti načrtovane in izdelane na najbolj učinkovit način.
- Z uporabo satastih nosilcev lahko v večetažnih stavbah zmanjšujemo višino etaže in tako pridobimo dodatno etažo (glej sliko 34) ali zmanjšamo celotno višino stavbe.
- Satasti nosilci zaradi večjih razponov stebrov pripomorejo k fleksibilnejši uporabi prostorov.

c) Družbeno-kulturna merila

- Z uporabo satastih nosilcev se lahko izpolni estetske zahteve širše skupnosti.
- Satasti nosilci uporabniku zagotavljajo več naravne svetlobe ter vitko in varno konstrukcijo.
- Poleg tega, zaradi min. izpustov škodljivih snovi je vpliv na okolje in zdravje ljudi zanemarljiv.

d) Tehnični vidiki in načrtovanje ter izvedba

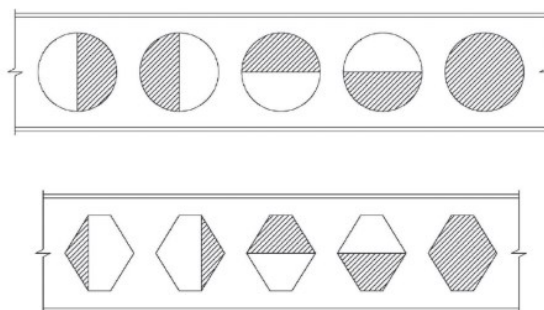
- Konstrukcije izdelane iz satastih nosilcev se dobro prilagajajo spremembam uporabe v svoji življenjski dobi brez poškodb ali izgube funkcionalnosti.
- Satasti nosilci so proizvodi, ki so na voljo v različnih velikostih in razredih kvalitete jekla. Izdelani in kontrolirani so v specializiranih delavnicah ter takoj pripravljeni za uporabo.
- Satasti nosilci omogočajo poenostavljeno gradnjo, z manj opreme ter manjšim obsegom gradbišča, s tem pa tudi manj hrupa in prahu.

4 OJAČITVE V STOJINI NOSILCEV Z ODPRTINAMI

V fazi projektiranja nosilcev z odprtinami (MSN in MSU) imamo pri optimiziranju stojine nosilcev na voljo naslednje možnosti: izbira višjega razreda jekla, zapolnitve odprtin, ojačitve odprtin, vzdolžne ali prečne ojačitve v stojini (ArcelorMittal, 2015, str. 11).

4.1 Zapolnitev odprtin

Če želimo doseči potrebno strižno odpornost stojine satastega nosilca (npr. blizu priključkov, glej sliko 4-2) so potrebne zapolnitve odprtin. Polnilo iz pločevine je enake debeline in razreda kakovosti jekla kot stojina nosilca. Vrste polnil, ki so razrezana v obliki odprtine in obojestransko zvarjena v stojino, so prikazane na sliki 4-1.



Slika 4-1: Tipični vzorci zapolnitev odprtin (Fares et al, 2016, str. 8)
Figure 4-1: Typical infill patterns (Fares et al, 2016, pp. 8)



Slika 4-2: SN s polno in delno zapolnjeno odprtino v priključku (ArcelorMittal, 2014, str. 9)
Figure 4-2: Cellular beam, with filled and partially closed openings for jointing (ArcelorMittal, 2014, pp. 9)

4.2 Ojačane odprtine satastih nosilcev

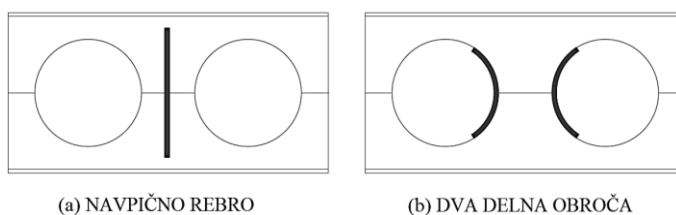
Če zaradi estetskih razlogov želimo ohraniti odprtino v satastem nosilcu, se za povečanje odpornosti prereza privari dodatno pločevino okoli odprtine. S tem preprečimo lokalno izbočenje stojine ("web post"), kot sta zapisala Lawson in Hicks (2011).



Slika 4-3: Primeri ojačanih odprtin; levo z jeklenim obročem ali desno okrog celotne odprtine (ArcelorMittal, 2015, str. 10)
Figure 4-3: Example of reinforced openings; left with ring stiffener or right around the opening (ArcelorMittal, 2015, pp. 10)

4.3 Navpične ojačitve

Za preprečitev lokalnega izbočenja stojine med sosednjima odprtinama ("web post") lahko kot alternativo uporabimo navpična rebra ali delne ojačitve dveh sosednjih odprtin (slika 4-4). Učinkovito uporabo tovrstnih ojačitev so s testiranjem dokazali proizvajalci jekla ArcelorMittal (2015).

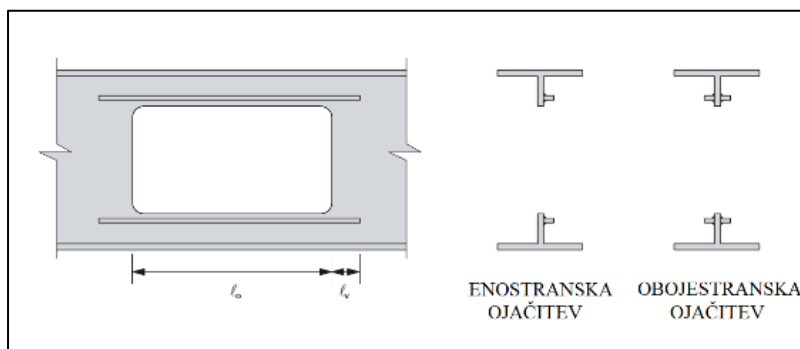


Slika 4-4: Primera ojačitev, s katerimi se izognemo lokalnemu izbočenju območja stojine med sosednjima odprtinama (ArcelorMittal, 2014, str. 10)

Figure 4-4: Options of reinforcement to avoid buckling of the web post (ArcelorMittal, 2014, pp. 10)

4.4 Vodoravne ojačitve

Vodoravna rebra (nad ali/in pod odprtino) so izdelana iz pločevin, ki so eno ali dvo-stransko zvarjena na stojino nosilca. Z njimi lahko preprečimo Vierendeel-ov efekt upogiba ter lokalno izbočenje stojine T prereza (Lawson, R.M. in Hicks, S.J., 2011). Vodoravna rebra so v primerjavi z vertikalnimi bolj učinkovita in stroškovno ugodnejša (Faras, S. S. et al, 2016).

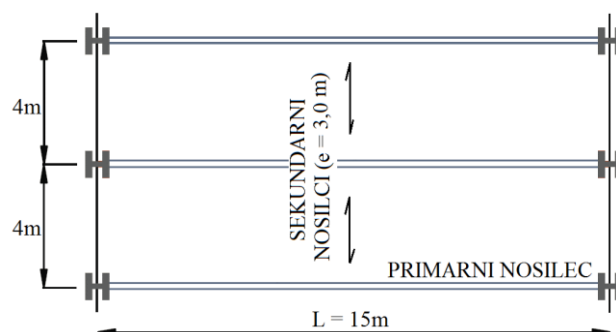


Slika 4-5: Primeri vodoravnih ojačitev nosilca (Lawson in Hicks, 2011, str. 65)
Figure 4-5: Example of a beam with horizontal stiffeners (Lawson and Hicks, 2011, pp. 65)

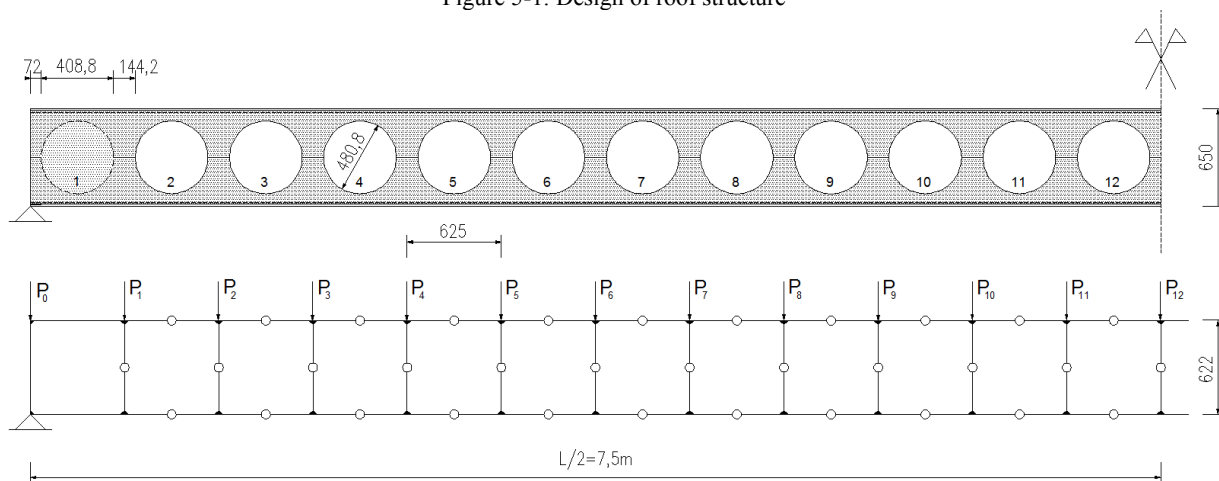
5 ANALIZA PRIMERA SATASTEGA NOSILCA S KROŽNIMI ODPRTINAMI

5.1 Splošno

V analizi je obravnavan primer izračuna satastega nosilca s krožnimi odprtinami ob upoštevanju pravil osnutka predloga predstandarda EN 1993-1-13: Steel beams with large web openings – April 2017. Prostoležeči nosilec razpona 15 m (kvaliteta jekla S275), obremenjen z enakomerno porazdeljeno obtežbo, predstavlja enega od primarnih strešnih nosilcev, med seboj oddaljenih za 4 m in bočno podprtih na razmakih 3 m (slika 5-1). Zaradi primerjave z rezultati izračuna mejnih stanj MSN in MSU, je bil satasti nosilec enakih geometrijskih karakteristik (kvaliteta jekla S355) preverjen z računalniškim programom ACB+ (verzija 3.13, ArcelorMittal). Rezultati so priloženi v prilogi A.



Slika 5-1: Zasnova strešne konstrukcije
Figure 5-1: Design of roof structure



Slika 5-2: Računski model nosilca s krožnimi odprtinami IPE 450
Figure 5-2: Model of cellular beam IPE 450

5.2 Materialne in geometrijske karakteristike

a) Materialne karakteristike jekla S275

$$\begin{aligned} f_y &= 27,5 \text{ kN/cm}^2 \\ f_u &= 43,0 \text{ kN/cm}^2 \\ E &= 21000 \text{ kN/cm}^2 \\ G &= 8076,9 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,92$$

$$\frac{f_u}{f_y} = \frac{43,0 \text{ kN/cm}^2}{27,5 \text{ kN/cm}^2} = 1,56 \geq 1,1$$

(SIST EN 1993-1-1: 3.2.2)

b) Geometrijske karakteristike izbranega profila IPE 450

$$h = 45,0 \text{ cm}$$

$$b = 19,0 \text{ cm}$$

$$t_f = 1,46 \text{ cm}$$

$$t_w = 0,94 \text{ cm}$$

$$h_w = 42,08 \text{ cm}$$

$$A = 98,80 \text{ cm}^2$$

$$c_w = 37,80 \text{ cm}$$

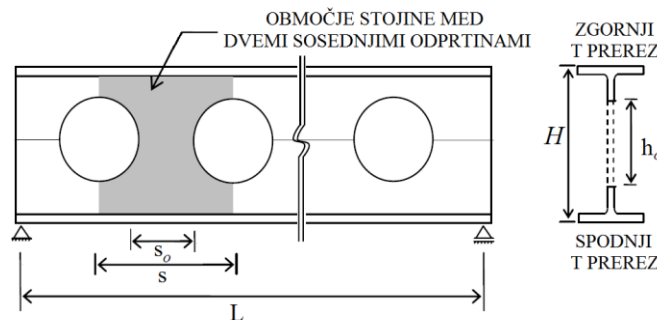
$$r = 2,10 \text{ cm}$$

$$I_y = 33740 \text{ cm}^4$$

$$W_{y,el} = 1500 \text{ cm}^3$$

$$W_{y,pl} = 1702 \text{ cm}^3$$

c) Geometrijske karakteristike satastega nosilca s krožnimi odprtinami



Slika 5-3: Geometrijske karakteristike satastega nosilca s krožnimi odprtinami
Figure 5-3: Geometrical parameters of cellular beam

$$h_0 = 48,08 \text{ cm}$$

$$H = 65,00 \text{ cm}$$

$$s = 62,50 \text{ cm}$$

$$n_0 = 24$$

$$s_0 = s - h_0 = 14,42 \text{ cm}$$

$$h_w = 62,08 \text{ cm}$$

$$c_w = 57,88 \text{ cm}$$

kjer je (slika 5-3):

h_0 premer odprtine v nosilcu,

H višina nosilca,

s širina območja stojine med robovi dveh sosednjih odprtin ("web post"),

s_0 razdalja med robovi dveh sosednjih odprtin,

n_0 število odprtin v nosilcu.

– Na mestu nosilca s polno stojino (slika 5-4, a):

$$A_{\text{bruto}} = 113,84 \text{ cm}^2$$

$$I_{y,\text{bruto}} = 74749,03 \text{ cm}^4$$

$$W_{y,\text{el}(\text{bruto})} = 2299,97 \text{ cm}^3$$

$$W_{y,\text{pl}(\text{bruto})} = 2668,27 \text{ cm}^3$$

kjer je:

A_{bruto}	površina bruto prečnega prereza,
$I_{y,\text{bruto}}$	vztrajnostni moment bruto prereza okrog osi y-y,
$W_{y,\text{el}(\text{bruto})}$	elastični odpornostni moment bruto prečnega prereza,
$W_{y,\text{pl}(\text{bruto})}$	plastični odpornostni moment bruto prečnega prereza.

– Na mestu nosilca z odprtino (slika 5-4, b):

$$A_{\text{neto}} = 68,64 \text{ cm}^2$$

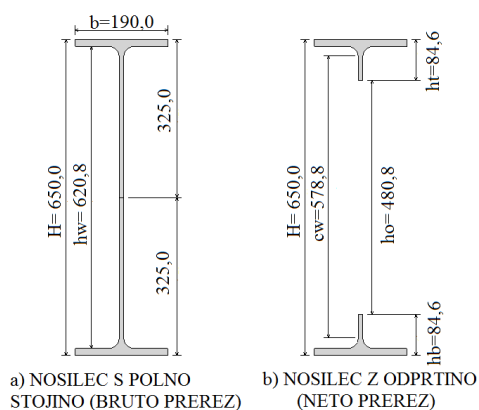
$$I_{y,\text{neto}} = 65989,84 \text{ cm}^4$$

$$W_{y,\text{el}(\text{neto})} = 2030,46 \text{ cm}^3$$

$$W_{y,\text{pl}(\text{neto})} = 2125,03 \text{ cm}^3$$

kjer je:

A_{neto}	površina neto prečnega prereza,
$I_{y,\text{neto}}$	vztrajnostni moment prereza okrog osi y-y,
$W_{y,\text{el}(\text{neto})}$	elastični odpornostni moment neto prečnega prereza,
$W_{y,\text{pl}(\text{neto})}$	plastični odpornostni moment neto prečnega prereza.



Slika 5-4: Dimenzije prečnega prereza satastega nosilca
Figure 5-4: Cross-section properties of cellular beam

d) Geometrijske karakteristike T prereza ("tee")

$$h_t = h_b = 8,64 \text{ cm}$$

$$h_{w,t} = h_{w,b} = 7,00 \text{ cm}$$

$$t_{w,t} = t_{w,b} = 0,94 \text{ cm}$$

$$A_{a,t} = A_{a,b} = 34,32 \text{ cm}^2$$

$$S_{y,t} = 52,89 \text{ cm}^3$$

$$z_{T,t} = 1,54 \text{ cm}$$

$$I_{y,t}^T = 100,57 \text{ cm}^4$$

$$A_{v,t} = A_{v,b} = 12,20 \text{ cm}^2$$

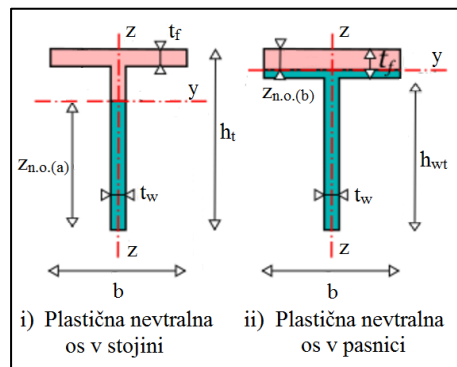
$$M_{pl,Rd,t} = 13,27 \text{ kNm}$$

kjer je:

h_t	višina zgornjega T prereza,
h_b	višina spodnjega T prereza,
$A_{a,t}$	površina zgornjega T prereza,
$A_{a,b}$	površina spodnjega T prereza,
$S_{y,t}$	statični moment zgornjega T prereza,
$z_{T,t}$	težišče zgornjega T prereza,
$I_{y,t}^T$	vztrajnostni moment zgornjega T prereza okrog osi y-y,
$A_{v,t}$	površina strižnega zgornjega T prereza,
$A_{v,b}$	površina strižnega spodnjega T prereza,
$M_{pl,Rd,t}$	plastična upogibna nosilnost zgornjega T prereza.

Izračun plastične upogibne nosilnosti zgornjega T prereza $M_{pl,Rd,t}$:

- za enojnosimetrični prerez dobimo položaj nevtralne osi polno plastificiranega prereza iz pogoja, da mora biti rezultanta notranjih sil enaka nič (Kržič, F., 1994, str. 146).
- Imamo dva možna položaja plastične nevtralne osi v prerezu, in sicer os lahko leži v stojini ali pa v pasnici T prereza (slika 5.5).



Slika 5-5: Plastična nevtralna os v T prerezu
Figure 5-5: The plastic neutral axis of T cross section

(i) Nevtralna os leži v stojini T prereza:

$$\Sigma F = 0: \quad \sigma * [b * t_f + t_w * (h_t - z_{n.o.(a)} - t_f) - t_w * z_{n.o.(a)}] = 0$$

$$z_{n.o.(i)} = \frac{b * t_f + t_w * h_t - t_w * t_f}{2 * t_w} = \frac{19,0 * 1,46 + 0,94 * 8,46 - 0,94 * 1,46}{2 * 0,94} = 18,25 \text{ cm}$$

$$z_{n.o.(a)} = 18,25 \text{ cm} > h_{wt} = 7,0 \text{ cm} \quad \text{NI OK}$$

kjer je:

$z_{n.o.(a)}$ razdalja med spodnjim robom stojine in plastično nevtralno osjo prereza,
 $\sigma = f_y$ mejna napetost, ki je enaka meji tečenja f_y .

(ii) Nevtralna os leži v pasnici T prereza:

$$\Sigma F = 0: \quad \sigma * [b * z_{n.o.(b)} - b * (t_f - z_{n.o.(b)}) - t_w * h_{wt}] = 0$$

$$z_{n.o.(ii)} = \frac{b * t_f + t_w * h_{wt}}{2 * b} = \frac{19,0 * 1,46 + 0,94 * 7}{2 * 0,94} = 0,90 \text{ cm} < t_f = 1,46 \text{ cm} \quad \text{OK}$$

kjer je $z_{n.o.(ii)}$ razdalja med plastično nevtralno osjo in zgornjim robom pasnice (v nadaljevanju $z_{n.o.}$).

Iz momentnega pogoja na nevtralno os dobimo:

$$\begin{aligned} M_{pl,Rd,t} &= f_y * \left[b * \frac{(z_{n.o.})^2}{2} + b * \frac{(t_f - z_{n.o.})^2}{2} + t_w * h_{wt} * \left(\frac{h_{wt}}{2} + t_f - z_{n.o.} \right) \right] = \\ &= f_y * \left[19,0 * \frac{(0,9)^2}{2} + 19,0 * \frac{(1,46 - 0,9)^2}{2} + 0,94 * 7 * \left(\frac{7}{2} + 1,46 - 0,9 \right) \right] = \\ &= f_y * 37,39 = 27,5 \text{ kN/cm}^2 * 37,39 \text{ cm}^3 = 1028,23 \text{ kNcm} \rightarrow M_{y,pl,t} = 10,28 \text{ kNm} \end{aligned}$$

e) Geometrijske omejitve za odprtine (predlog osnutka EN 1993-1-13: 6.7.1)

– pogoj za uvrstitev med nosilce s pogostimi odprtinami: $s_o < h_o$

$$s_o = 14,42 \text{ cm} < h_o = 48,08 \text{ cm} \quad \text{OK}$$

– pogoj za minimalno širino območja med robovi dveh sosednjih odprtin ("web post"): $s_o \geq 0,1 * h_o$

$$s_o = 14,42 \text{ cm} \geq 0,1 * h_o = 4,81 \text{ cm} \quad \text{OK}$$

5.3 Obtežbe in obtežne kombinacije

a) Obtežbe

- lastna teža: $g_{l.t.} = 0,71 \text{ kN/m}$
- stalna obtežba: $g_s = 1,25 \text{ kN/m}^2 * 4,0 \text{ m} = 5,0 \text{ kN/m}$
- spremenljiva obtežba: $q = 1,78 \text{ kN/m}^2 * 4,0 \text{ m} = 7,12 \text{ kN/m}$

b) Obtežne kombinacije

– kombinacija za mejno stanje nosilnosti (MSN)

V skladu s točko 6.4.3(2) standarda EN 1990 upoštevamo naslednjo kombinacijo vplivov:

$$\begin{aligned} q_{Ed}^{MSN} &= 1,35 * G_k + 1,5 * Q_k = 1,35 * (g_{l.t.} + g_s) + 1,5 * q = \\ &= 1,35 * (0,71 + 5,0) + 1,5 * 7,12 = 18,39 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

– karakteristična kombinacija za mejno stanje uporabnosti (MSU)

Po slovenskem nacionalnem dodatku A.1.4.2(2) k SIST EN 1990 je potrebno pomike preveriti za naslednjo karakteristično kombinacijo MSU:

$$q_{Ed}^{MSU} = G_k + Q_k = (g_{l.t.} + g_{stalna}) + q = (0,71 + 5,0) + 7,12 = 12,83 \text{ kN/m}$$

5.4 Mejno stanje nosilnosti (MSN)

5.4.1 Notranje sile in momenti

Potek upogibnih momentov M_{Ed} ter prečnih sil V_{Ed} za izračun MSN določimo za izbran prostoležeči nosilec z linijsko obtežbo q_{Ed} (preglednica 5-1).

$$M_{Ed}(x) = R_A * x - \frac{q_{Ed} * x^2}{2}, \quad \text{kjer je } R_A = \frac{q_{Ed} * L}{2} = \frac{18,39 * 15}{2} = 137,93 \text{ kN}$$

$$V_{Ed}(x) = R_A - q_{Ed} * x$$

Preglednica 5-1: Potek upogibnih momentov in prečnih sil vzdolž nosilca
Table 5-1: Bending moments and shear forces in the beam

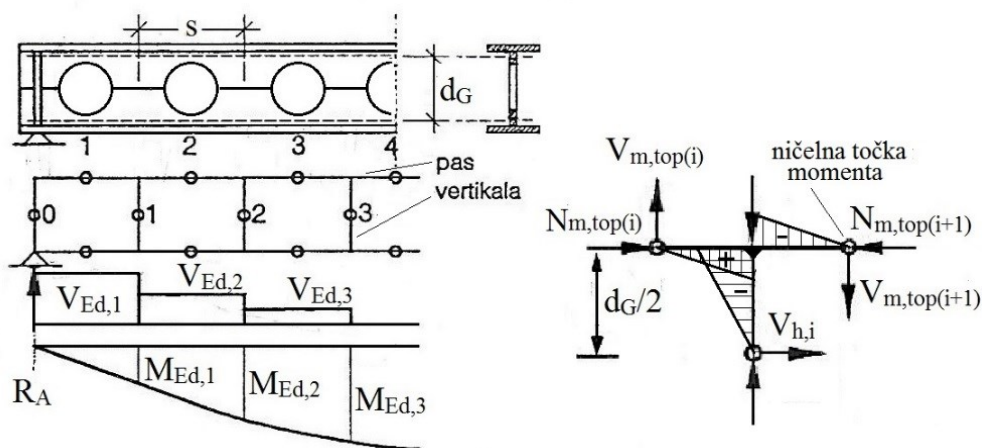
Pozicija	x (m)	M_{Ed} (kNm)	V_{Ed} (kN)
1	0	0,00	-137,93
2	0,313	42,20	-132,18
3	0,625	82,61	-126,43
4	0,938	121,22	-120,68
5	1,250	158,04	-114,94
6	1,563	193,06	-109,19
7	1,875	226,28	-103,44
8	2,188	257,71	-97,70
9	2,500	287,34	-91,95
10	2,813	315,18	-86,20
11	3,125	341,22	-80,46
12	3,438	365,47	-74,71
13	3,750	387,91	-68,96
14	4,063	408,57	-63,22
15	4,375	427,42	-57,47
16	4,688	444,48	-51,72
17	5,000	459,75	-45,98
18	5,313	473,22	-40,23
19	5,625	484,89	-34,48
20	5,938	494,77	-28,73
21	6,250	502,85	-22,99
22	6,563	509,14	-17,24
23	6,875	513,63	-11,49
24	7,188	516,32	-5,75
25	7,500	517,22	0,00
26	7,813	516,32	5,75

Prečno silo V_{Ed} razdelimo polovico na zgornji pas ($V_{m,top}$) in polovico na spodnji pas nosilca ($V_{m,bot}$), kot je prikazano na sliki 5-6. Osne sile $N_{m,i}$ dobimo iz ravnotežnega pogoja upoštevaje simetrije prereza (Kržič, 1994):

$$N_{m,i} = \frac{M_{Ed,i+1} - M_{Ed,i}}{(2 * d_G)}, \quad d_G = \frac{H}{2} - z_{T,t} = \frac{H}{2} - z_{T,b},$$

kjer je d_G oddaljenost med težišči T prerezov. Prečno silo $V_{h,i}$ dobimo z razliko osnih sil med dvema odprtinama:

$$V_{h,i} = N_{m,i+1} - N_{m,i}$$



Slika 5-6: Vierendeel-ov model za izračun notranjih sil in momentov (prirejeno po Kržič, 1994, str. 137)
Figure 5-6: Vierendeel analysis for internal forces and moments (adapted according to Kržič, 1994, pp. 137)

V preglednici 5-2 so prikazani rezultati osnih sil med robovi dveh sosednjih odprtin ("web post").

Preglednica 5-2: Notranje sile med robovi dveh sosednjih krožnih odprtin
Table 5-2: Internal forces in the web post between circular openings

Odprtina	Nm,top (kN)	Nm,bot (kN)	Vm,top (kN)	Vh,Ed (kN)
1	zapolnjena odprtina			
2	195,77	-195,77	-60,34	
3	311,79	-311,79	-54,60	116,01
4	416,20	-416,20	-48,85	104,41
5	509,01	-509,01	-43,10	92,81
6	590,22	-590,22	-37,35	81,21
7	659,83	-659,83	-31,61	69,61
8	717,84	-717,84	-25,86	58,01
9	764,24	-764,24	-20,11	46,41
10	799,05	-799,05	-14,37	34,80
11	822,25	-822,25	-8,62	23,20
12	833,85	-833,85	-2,87	11,60
13	833,85	-833,85	2,87	0,00
14	822,25	-822,25	8,62	-11,60
15	799,05	-799,05	14,37	-23,20
16	764,24	-764,24	20,11	-34,80
17	717,84	-717,84	25,86	-46,41
18	659,83	-659,83	31,61	-58,01
19	590,22	-590,22	37,35	-69,61
20	509,01	-509,01	43,10	-81,21
21	416,20	-416,20	48,85	-92,81
22	311,79	-311,79	54,60	-104,41
23	195,77	-195,77	60,34	-116,01
24	zapolnjena odprtina			

5.4.2 Klasifikacija prerezov

a) Kompaktnost bruto prereza satastega nosilca (SIST EN 1993-1-1: 6.2)

– pasnica, tlak

$$\frac{c}{t_f} = \frac{6,93 \text{ cm}}{1,46 \text{ cm}} = 4,73 \leq 9 * \varepsilon = 8,28 \quad \text{– 1. razred kompaktnosti}$$

– stojina, čisti upogib

$$\frac{c_w}{t_w} = \frac{57,88 \text{ cm}}{0,94 \text{ cm}} = 61,57 \leq 72 * \varepsilon = 66,24 \quad \text{– 1. razred kompaktnosti}$$

Prerez je v 1. razredu kompaktnosti.

– stojina, strig

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{62,08 \text{ cm}}{0,94 \text{ cm}} = 66,04 > 72 * \frac{\varepsilon}{\eta} = 72 * \frac{0,92}{1,2} = 55,20$$

Stojina prereza je vitka v strigu, zato je potrebna kontrola nosilnosti proti lokalnemu izbočenju v strigu.

b) Kompaktnost T prerezov ("tees") (Predlog osnutka EN 1993-1-13: 5.2 in 5.3)

– stojina, čisti upogib

$$h_{wt} = 7,0 \text{ cm} < 10 * \varepsilon * t_w = 10 * 0,92 * 0,94 = 8,65 \text{ cm} \quad \text{– 2. razred kompaktnosti}$$

Predlog osnutka EN 1993-1-13: 5.3 (5) določa, da za 1. in 2. razred kompaktnosti stojine velja, da natezna osna sila zaradi upogiba spremeni mesto nevtralne osi v T prerezu. Vendar je ta vpliv pomemben samo pri velikih vrednostih nateznih sil in ga običajno lahko zanemarimo.

– stojina, strig

Po predlogu osnutka EN 1993-1-13: 5.3 (2) je stojina nad odprtino zgornjega T prereza klasificirana glede na razmerja efektivne dolžine l_t in višine d_t (v našem primeru h_{wt}) stojine T prereza:

$$l_t = 0,7 * h_o = 0,7 * 48,08 = 33,66 \text{ cm} > 32 * \varepsilon * t_w = 27,67 \text{ cm}, \quad \text{OK}$$

$$d_t = 7,0 \text{ cm} \leq \frac{10 * \varepsilon * t_w}{\sqrt{1 - \left(\frac{32 * \varepsilon * t_w}{l_t}\right)^2}} = \frac{10 * 0,92 * 0,94}{\sqrt{1 - \left(\frac{32 * 0,92 * 0,94}{33,66}\right)^2}} = 15,19 \text{ cm}, \quad \text{OK}$$

sledi, da je stojina nad odprtino T prereza v 2. razredu kompaktnosti.

Stojina T prereza je v 2. razredu kompaktnosti.

– odprtine

Po predlogu osnutka standarda EN 1993-1-13: 6.8 (8) se odprtine klasificira z višjim razredom kompaktnosti med kompaktnostjo pasnice in stojine nosilca z odprtinami.

Odprtine so v 2. razredu kompaktnosti.

5.4.3 Nosilnost prerezov

5.4.3.1 Kontrola nosilnosti prereza nad odprtino

V podpoglavju 6.8(2) predloga osnutka predstandarda EN 1993-1-13 je podano, da se upogibno in strižno nosilnost preveri v prerezih nad odprtinami (prerez a-a, slika 5-6).

a) Plastična upogibna nosilnost

Mesto največjega momenta je na polovici razpona, to je na 7,5m. Kontrolo upogibne nosilnosti opravimo v 12 odprtini (pozicija 24) ob uporabi karakteristik neto plastičnega prereza nosilca:

$$M_{pl,Rd(neto)} = W_{y,pl(neto)} * f_y = 2125,03 \text{ cm}^3 * 27,5 \text{ kN/cm}^2 = 58438,3 \text{ kNcm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd(neto)}} = \frac{517,22 \text{ kNm}}{584,38 \text{ kNm}} = 0,89 \leq 1,0 \quad \text{OK}$$

kjer je:

$M_{pl,Rd(neto)}$ plastična upogibna nosilnost prereza na mestu odprtine

b) Strižna nosilnost

Strižna nosilnost prereza nad odprtinami $V_{o,pl,Rd}$ je po predlogu osnutka predstandarda EN 1993-1-13: 6.2(1) podana z izrazom:

$$V_{o,pl,Rd} = \left[V_{pl,Rd} - \frac{h_o * t_w * f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} \right] = \left[1111,88 - \frac{48,08 * 0,94 * 27,5}{\sqrt{3} * 1,0} \right] = 394,31 \text{ kN},$$

kjer je:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v * f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} = \frac{70,03 * 27,5}{\sqrt{3} * 1,0} = 1111,88 \text{ kN}$$

$V_{pl,Rd}$ plastična strižna nosilnost nosilca s polno stojino po SIST EN 1993-1-1: 6.2.6(2),

A_v površina strižnega prereza nosilca s polno stojino

$$A_{v,bruto} = \max \begin{cases} A_{bruto} - 2 * b * t_f + (t_w + 2 * r) * t_f = 65,68 \text{ cm}^2 ; \\ \eta * h_w * t_w = 70,03 \text{ cm}^2 \end{cases}$$

$$A_{v,bruto} = 70,03 \text{ cm}^2$$

Efektivna debelina stojine T prereza po podpoglavju 6.2.(2) in ob upoštevanju SIST EN 1993-1-1: 6.2.8(3):

$$t_{w,eff} = t_w * (1 - \rho) \quad \text{za } \rho > 0,5$$

$$t_{w,eff} = t_w \quad \text{za } \rho \leq 0,5$$

$$\rho = \left(\frac{2 * V_{Ed}}{V_{o,pl,Rd} - 1} \right)^2 = \left(\frac{2 * 120,68}{394,31 - 1} \right)^2 = 0,38 < 0,5 \rightarrow t_{w,eff} = t_w \quad \text{OK}$$

kjer je:

$t_{w,eff}$ efektivna debelina stojine T prereza, ki se jo uporabi pri preverbi Vierendeel-ovega upogiba,
 V_{Ed} prečna sila v območju prve odprtine (pozicija 4).

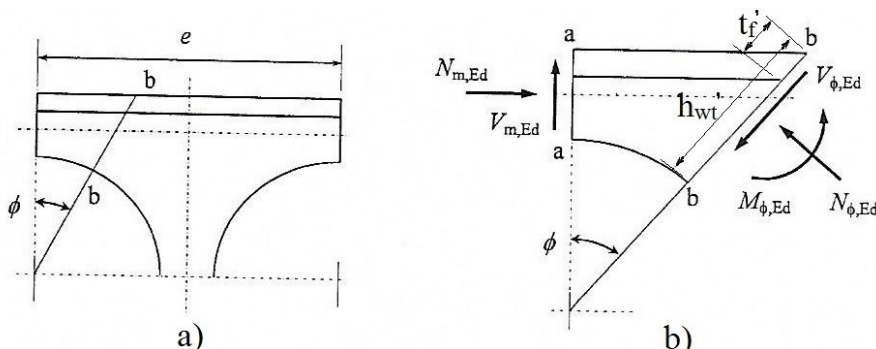
Kontrola nosilnosti pri največji prečni sili V_{Ed} (prva odprtina na poziciji 4):

$$V_{Ed} = 120,68 \text{ kN} \leq V_{o,pl,Rd} = 394,31 \text{ kN}, \text{ oz.} \quad \text{OK}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{o,pl,Rd}} = \frac{120,68 \text{ kN}}{394,31 \text{ kN}} = 0,31 \leq 1,0 \quad \text{OK}$$

5.4.3.2 Kontrola nosilnosti T prerezov okrog odprtin (Vierendeel-ov upogib)

Nosilnost prerezov okrog odprtin se po predlogu osnutka standarda EN 1993-1-13: 6.8 lahko preveri z alternativno metodo, ki je primerna za valjane sataste nosilce s krožnimi odprtinami. Kontrolo nosilnosti Vierendeel-ovega upogiba se izvede v radialnih ravninah, ki jih določajo koti ϕ : 0° , 5° , 10° , 15° , 20° itn. s prirastkom 5° (prerez b-b na sliki 5-7). Kritični prerez je definiran s kritičnim kotom ϕ .



Slika 5-7: Notranje sile in momenti v kritičnem prerezu okrog odprtine (predlog osnutka EN 1993-1-13, 2017, str. 23)
 Figure 5-7: Internal forces and moments at the critical section around opening (Draft of EN 1993-1-13, 2017, pp. 23)

Izračunane geometrijske karakteristike T prereza za različne kote ϕ so prikazane v preglednici 5-3.

Preglednica 5-3: Geometrijske karakteristike T prerezov pri različnih kotih ϕ
 Table 5-3: Tees sections properties calculated with different critical angles ϕ

ϕ (°)	t_f' (cm)	h_{wt}' (cm)	$A_{a,t'}=A_{a,b'}$ (cm ²)	$S_{y'}$ (cm ³)	$z_{T,t'}$ (cm)	$W_{y,pl'}$ (cm ³)
0	1,46	7,00	34,32	52,89	1,54	37,39
5	1,47	7,12	34,54	54,03	1,56	38,33
10	1,48	7,48	35,20	57,59	1,64	41,29
15	1,51	8,09	36,33	64,00	1,76	46,64
20	1,55	8,99	37,97	74,07	1,95	55,10
25	1,61	10,21	40,20	89,10	2,22	67,83
30	1,69	11,80	43,13	111,17	2,58	86,70
35	1,78	13,85	46,89	143,58	3,06	114,66
40	1,91	16,48	51,70	191,68	3,71	156,50
45	2,06	19,86	57,90	264,37	4,57	220,26

kjer je:

$$t_f' = \frac{t_f}{\cos \Phi} \quad \text{višina pasnice zgornjega T prereza,}$$

$$h_{wt}' = \frac{\frac{H}{2} t_f}{\cos \Phi} - \frac{h_o}{2} \quad \text{višina stojine zgornjega T prereza,}$$

$$A_{a,t}' = b * t_f' + t_w * h_{wt}' \quad \text{površina zgornjega T prereza,}$$

$$S_{y,t}' \quad \text{statični moment zgornjega T prereza,}$$

$$z_{T,t}' \quad \text{težišče zgornjega T prereza,}$$

$$W_{y,pl}' \quad \text{plastični odpornostni moment, izračunan glede na karakteristike kritičnega prereza.}$$

Notranje količine $N_{\Phi,Ed}$, $V_{\Phi,Ed}$ in $M_{\Phi,Ed}$ v prerezu b-b izračunamo za različne kote Φ s pomočjo ravnotežnih pogojev kot sledi iz slike 5-7,b:

$$N_{\Phi,Ed} = N_{m,Ed} * \cos \Phi - V_{m,Ed} * \sin \Phi ,$$

$$V_{\Phi,Ed} = - N_{m,Ed} * \sin \Phi + V_{m,Ed} * \cos \Phi ,$$

$$M_{\Phi,Ed} = N_{m,Ed} (z_{T,t}' - z_{T,t}) - V_{m,Ed} * \left(\frac{H}{2} - z_{T,t}' \right) * \tan \Phi .$$

kjer je (glej sliko 5-7, b):

$$N_{\Phi,Ed} \quad \text{osna sila, ki deluje pravokotno na prerez b-b,}$$

$$V_{\Phi,Ed} \quad \text{prečna sila, ki deluje vzdolž prereza b-b,}$$

$$M_{\Phi,Ed} \quad \text{upogibni moment v prerezu b-b.}$$

Če je prečna sila V_{Ed} manjša od 50% plastične strižne nosilnosti $V_{pl,Rd}$, se mora njen vpliv na kombinacijo upogibne in osne nosilnosti zanemariti (ne upoštevamo interakcije M-V in M-V-N).

$$V_{Ed} < 0,5 * V_{pl,Rd} \quad \text{(SIST EN 1993-1-1: 6.2.8 in 6.2.10)}$$

$$V_{Ed} = 120,68 \text{ kN} < 0,5 * V_{o,pl,Rd} = 0,5 * 394,31 \text{ kN} = 197,15 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

kjer je:

$$V_{Ed} \quad \text{prečna sila v območju prve odprtine na poziciji 4}$$

$$V_{o,pl,Rd} \quad \text{strižna nosilnost prereza nad odprtinami (glej 5.4.3.1, b)}$$

V preglednici 5-4 so prikazane vrednosti $N_{\Phi,Ed}$ in $M_{\Phi,Ed}$ za kote Φ : 20°, 25°, 30°, 35° in 40°, ki se jih uporabi pri kontroli normalnih napetosti (interakcija M-N) ter vrednosti $N_{\Phi,Ed}$ pri $\Phi = 0^\circ$ ($M_{\Phi,Ed} = 0$), ki se jih uporabi pri kontroli nosilnosti na osno silo.

Preglednica 5-4: Rezultati izračuna notranjih sil in momentov po alternativni metodi Vierendeel-ovega upogiba
Table 5-4: The values of internal forces and moments calculate with alternative method for Vierendeel bending

	N Φ , Ed (kN)	N Φ , Ed (kN)	M Φ , Ed (kNm)	N Φ , Ed (kN)	M Φ , Ed (kNm)	N Φ , Ed (kN)	M Φ , Ed (kNm)	N Φ , Ed (kN)	M Φ , Ed (kNm)	N Φ , Ed (kN)	M Φ , Ed (kNm)
Odprtina	($\phi = 0^\circ$)	($\phi = 20^\circ$)	($\phi = 20^\circ$)	($\phi = 25^\circ$)	($\phi = 25^\circ$)	($\phi = 30^\circ$)	($\phi = 30^\circ$)	($\phi = 35^\circ$)	($\phi = 35^\circ$)	($\phi = 40^\circ$)	($\phi = 40^\circ$)
1	zapolnjena odprtina, preverjeno kontroli nosilnosti prereza nad odprtino (5.4.3.3)										
2	195,77	156,40	7,19	145,49	9,43	133,46	11,93	120,42	14,76	106,47	18,02
3	311,79	262,68	7,04	248,50	9,40	232,42	12,13	214,58	15,32	195,11	19,10
4	416,20	358,51	6,83	341,44	9,30	321,76	12,21	299,64	15,71	275,24	19,93
5	509,01	443,91	6,59	424,31	9,12	401,48	12,18	375,60	15,92	346,86	20,53
6	590,22	518,87	6,29	497,12	8,87	471,58	12,04	442,46	15,97	409,97	20,89
7	659,83	583,39	5,95	559,85	8,54	532,06	11,78	500,22	15,85	464,57	21,00
8	717,84	637,47	5,57	612,52	8,14	582,92	11,40	548,87	15,56	510,65	20,87
9	764,24	681,11	5,14	655,12	7,66	624,15	10,91	588,43	15,10	548,23	20,51
10	799,05	714,31	4,66	687,65	7,11	655,77	10,31	618,89	14,48	577,30	19,90
11	822,25	737,07	4,14	710,12	6,48	677,76	9,59	640,24	13,68	597,86	19,05
12	833,85	749,39	3,58	722,51	5,78	690,13	8,75	652,50	12,71	609,91	17,96
24	zapolnjena odprtina, preverjeno kontroli nosilnosti prereza nad odprtino (5.4.3.3)										

Kontrola normalnih napetosti se izvede za kritični prerez:

$$\frac{N_{\Phi,Ed}}{N_{\Phi,Rd}} + \frac{M_{\Phi,Ed}}{M_{\Phi,Rd}} \leq 1,0,$$

kjer je:

$$N_{\Phi,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{nosilnost na osno silo v kritičnem prerezu,}$$

$$M_{\Phi,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{plastična upogibna nosilnost v kritičnem prerezu.}$$

Po predlogu osnutka standarda EN 1993-1-13: 6.8 (7) so projektne nosilnosti prerezov okrog odprtin $N_{\Phi,Rd}$, $V_{\Phi,Rd}$ in $M_{\Phi,Rd}$ določene glede na klasifikacijo odprtin. Ker so prerezi v 2. razredu kompaktnosti, se pri izračunu upošteva plastične nosilnosti, ki prikazane v preglednici 5-5.

Preglednica 5-5: Osnova in upogibne nosilnosti zgornje T prereza
Table 5-5: The resistance of top tee to axial force and bending moment

ϕ (°)	0	20	25	30	35	40
N $_{pl,Rd}$ (kN)	943,80	1044,25	1105,61	1185,94	1289,36	1421,83
M $_{pl,Rd}$ (kNm)	10,28	15,15	18,65	23,84	31,53	43,04

Iz rezultatov kontrol normalnih napetosti (interakcija M-N), ki so prikazani v preglednici 5-6, je razvidno, da je kritični prerez v ravnini pri kotu $\phi = 25^\circ$.

Preglednica 5-6: Kontrole nosilnosti prečnih prerezov (interakcija M-N) okrog odprtin
Table 5-6: Checkings of net sections (interaction M-N) around openings

	N ($\phi = 0^\circ$)	M - N ($\phi = 20^\circ$)	M - N ($\phi = 25^\circ$)	M - N ($\phi = 30^\circ$)	M - N ($\phi = 35^\circ$)	M - N ($\phi = 40^\circ$)
Odprtina						
1	zapolnjena odprtina, preverjeno kontroli nosilnosti prereza nad odprtino (5.4.3.3)					
2	0,21	0,62	0,64	0,61	0,56	0,49
3	0,33	0,72	0,73	0,70	0,65	0,58
4	0,44	0,79	0,81	0,78	0,73	0,66
5	0,54	0,86	0,87	0,85	0,80	0,72
6	0,63	0,91	0,93	0,90	0,85	0,77
7	0,70	0,95	0,96	0,94	0,89	0,81
8	0,76	0,98	0,99	0,97	0,92	0,84
9	0,81	0,99	1,00	0,98	0,94	0,86
10	0,85	0,99	1,00	0,99	0,94	0,87
11	0,87	0,98	0,99	0,97	0,93	0,86
12	0,88	0,95	0,96	0,95	0,91	0,85
24	zapolnjena odprtina, preverjeno kontroli nosilnosti prereza nad odprtino (5.4.3.3)					

5.4.3.3 Kontrola nosilnosti stojine na lokalno izbočenje

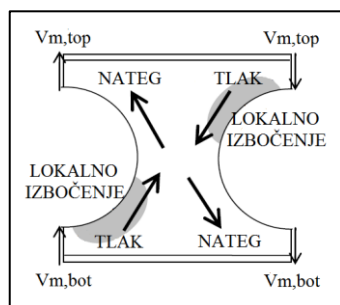
Kontrola nosilnosti stojine v območju med robovi dveh sosednjih odprtin ("web post") na lokalno izbočenje je po predlogu osnutka predstandarda EN 1993-1-13 možno izračunati na podlagi dveh metod, in sicer po splošni metodi ter alternativni metodi.

Izravnavna enačbe za določitev kritičnih napetosti pri alternativni metodi ("web post modeling") temelji na empirični študiji analize končnih elementov. Pri splošni metodi ("strut analogy method") se tlačne napetosti preverjajo na podlagi EC3. Poleg tega je splošna metoda enostavnejša in hitrejša od alternativne ter omogoča analizo asimetričnih prerezov (Panedpojaman, P., 2012).

a) Splošna metoda ("strut analogy method")

Nosilnost na lokalno izbočenje stojine zaradi tlačnih napetosti lahko izračunamo po predlogu osnutka predstandarda EN 1993-1-13: 6.7.3. Splošno metodo se lahko uporabi za sataste nosilce s krožnimi ali pravokotnimi odprtinami.

Model za izračun lokalnega izbočenja stojine, v kateri nastopajo tlačne in natezne napetosti je prikazan na sliki 5-8.



Slika 5-8: Model za izračun lokalnega izbočenja zaradi upogiba v območju stojine med sosednjimi odprtinami
Figure 5-8: Strut model of web post buckling

Tlačne napetosti, ki delujejo v območju stojine nosilca so predstavljene z efektivnimi horizontalnimi strižnimi napetostmi $\sigma_{wp,Ed}$:

$$\sigma_{wp,Ed} = \frac{V_{wp,Ed}}{(s_o * t_w)} < 0,577 * f_y ,$$

$$\sigma_{wp,Ed} = \frac{116,01}{(14,42 * 0,94)} = 8,56 \text{ kN/cm}^2 < 0,577 * 27,5 = 15,87 \text{ kN/cm}^2 \quad \text{OK}$$

kjer je:

$$V_{wp,Ed} = V_{h,Ed} \quad \text{strižna sila, ki deluje v središčni osi stojine (s_o).}$$

Izračunamo relativno vitkost območja stojine $\bar{\lambda}$ in določimo redukcijski faktor χ_{wp} :

$$\bar{\lambda} = \frac{1,75 * \sqrt{s_{o,eff}^2 + h_o^2}}{t_w} * \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1,75 * \sqrt{(14,42)^2 + (48,08)^2}}{0,94} * \frac{1}{86,39} = 1,08$$

$$\bar{\lambda} = 1,08 \rightarrow \chi_{wp} = 0,61 ,$$

kjer je:

$$\lambda_1 = \pi * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9 * \varepsilon = 86,39 ,$$

$$s_{o,eff} = s_o = 14,42 \text{ cm} ,$$

$s_{o,eff}$ efektivna razdalja med robovi dveh sosednjih odprtin

χ_{wp} redukcijski faktor, ki je definiran v SIST EN 1993-1-1: 6.3.1.2 glede na krivuljo a

Tlačna nosilnost območja stojine med robovi dveh sosednjih odprtin se izračuna z naslednjim izrazom:

$$\sigma_{b,wp,Rd} = \chi_{wp} * \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,61 * \frac{27,5 \text{ kN/cm}^2}{1,0} = 16,77 \text{ kN/cm}^2$$

Do lokalnega izbočenja zaradi upogiba ne pride, če je izpolnjen pogoj:

$$\sigma_{wp,Ed} \leq \sigma_{b,wp,Rd}$$

$$\sigma_{wp,Ed} = 8,56 \text{ kN/cm}^2 < \sigma_{b,wp,Rd} = 18,18 \text{ kN/cm}^2 \quad \text{OK}$$

b) Alternativna metoda ("web post modeling")

Alternativna metoda izračuna lokalnega izbočenja stojine zaradi upogiba je predstavljena v predlogu osnutka predstandarda EN 1993-1-13: 6.9, namenjena pa je za vroče valjane profile z naslednjimi splošnimi omejitvami:

$$- \quad 0,1 \leq \frac{s_o}{h_o} \leq 0,5 \quad \text{in} \quad s_o \geq 50 \text{ mm}$$

$$0,1 < \frac{s_o}{h_o} = \frac{14,42 \text{ cm}}{48,08 \text{ cm}} = 0,3 < 0,5 \text{ in } s_o = 144,2 \text{ mm} > 50 \text{ mm}$$

OK

$$- \frac{h_o}{t_w} \leq 60 * \varepsilon$$

$$\frac{h_o}{t_w} = \frac{48,08 \text{ cm}}{0,94 \text{ cm}} = 51,15 < 60 * \varepsilon = 60 * 0,92 = 55,2$$

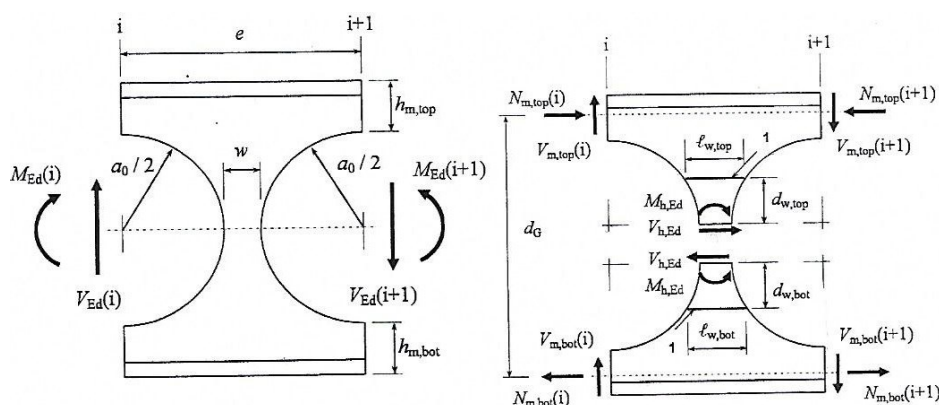
OK

Kritični prerez je od središča odprtine oddaljen za d_w s širino l_w , kot je prikazano na sliki 5-9:

$$d_w = \frac{h_o}{2} * \sqrt{\frac{\sqrt{\alpha^4 + 8 * \alpha^2} - 2 - \alpha^2}{2}} = \frac{48,08}{2} * \sqrt{\frac{\sqrt{1,3^4 + 8 * 1,3^2} - 2 - 1,3^2}{2}} = 10,15 \text{ cm},$$

$$\text{kjer je } \alpha = \frac{s}{h_o} = \frac{62,50 \text{ cm}}{48,08 \text{ cm}} = 1,3,$$

$$l_w = h_o * \left(\alpha - \sqrt{1 - \left(\frac{2 * d_w}{h_o} \right)^2} \right) = 48,08 * \left(1,3 - \sqrt{1 - \left(\frac{2 * 10,15}{48,08} \right)^2} \right) = 18,92 \text{ cm}.$$



Slika 5-9: Notranje sile in momenti na območju med okroglimi odprtinami (predlog osnutka EN 1993-1-13, 2017, str. 24)
Figure 5-9: Internal forces and moments in the web post between circular openings (Draft of EN 1993-1-13, 2017, pp. 24)

Za vsa območja nosilca med robovi dveh sosednjih odprtini je potrebno opraviti kontrolo lokalnega izbočenja ("web post buckling"). Primer izračuna za območje št. 2 (med drugo in tretjo odprtino):

Tlačne napetosti v kritičnem območju določimo na naslednji način:

$$\sigma_{w,Ed} = \frac{6 * M_{c,Ed}}{l_w^2 * t_w * \left(1 - 4 * \left(\frac{d_w}{h_o} \right)^2 \right)} = \frac{6 * 11,76 * 100}{18,92^2 * 0,94 * \left(1 - 4 * \left(\frac{10,15}{48,08} \right)^2 \right)} = 25,52 \text{ kN/cm}^2,$$

kjer je $M_{c,Ed}$ moment v kritičnem prerezu določen z:

$$M_{c,Ed,top} = V_{h,Ed} * d_{w,top} - M_{h,Ed} = 116,01 * (10,15 \text{ cm} * 0,01) - 0 = 11,76 \text{ kNm}$$

$$M_{c,Ed,bot} = V_{h,Ed} * d_{w,bot} - M_{h,Ed} = 11,76 \text{ kNm}$$

Prenos strižne sile med zgornjim in spodnjim T prerezom je odvisen od faktorja k_{Av} :

$$k_{Av,top} = \frac{A_{v,o,top}^\eta}{A_{v,o,top}^\eta + A_{v,o,bot}^\eta} = 0,5 \quad \text{in} \quad k_{Av,bot} = \frac{A_{v,o,bot}^\eta}{A_{v,o,top}^\eta + A_{v,o,bot}^\eta} = 0,5,$$

kjer sta $A_{v,o,t}$ in $A_{v,o,b}$ strižna prereza zgornjega in spodnjega T prereza, ki sta v našem primeru zaradi simetrije enaka. Pri tem je

$$\eta = \frac{1}{9,48 - 4,84 * \alpha} = 0,314 \quad \text{za} \quad \alpha = 1,3 \leq 1,5.$$

Nosilnost območja stojine na lokalno izbočenje ("web post buckling") je določena z $\sigma_{w,Rd}$:

$$\sigma_{w,Rd} = \frac{\chi * \xi * f_y}{\gamma_{M1}},$$

kjer je:

χ redukcijski faktor, ki je definiran v SIST EN 1993-1-1: 6.3.1.2 glede na krivuljo a,

ξ oblikovni koeficient kritičnega prereza, izračunan po izrazu:

$$\xi = 1,5 + \frac{2 * 10^{-5}}{(1 - \alpha)^4} = 1,50.$$

Vitkost območja $\bar{\lambda}$ med med dvema sosednjima polovicama odprtin je določena s koeficientom:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{\xi * f_y}{\sigma_{w,cr}}},$$

kjer so:

$\sigma_{w,cr}$ največje napetosti v kritičnem prerezu ob robu odprtine. Določi se jih lahko na podlagi empirične študije (glej Ward, J.K., 1990, str. 5) ali z metodo končnih elementov (MKE).

Vrednosti za $\sigma_{w,cr}$ so povzete iz analize izvedene s programom ACB+ za razred jekla S355 (priloga A), kot sledi:

$$\sigma_{w,cr,top} = 99,11 \text{ kN/cm}^2, \quad \sigma_{w,cr,bot} = 107,20 \text{ kN/cm}^2.$$

Sledi izračun zgornjega $\bar{\lambda}_t$ in spodnjega $\bar{\lambda}_b$ T prereza in določitev redukcijskih faktorjev χ_t ter χ_b :

$$\bar{\lambda}_t = \sqrt{\frac{1,50 * 27,5}{99,11}} = 0,645 \rightarrow \chi_t = 0,871$$

$$\bar{\lambda}_b = \sqrt{\frac{1,50 * 27,5}{107,20}} = 0,620 \rightarrow \chi_b = 0,881$$

Post-kritični faktor se izračuna z naslednjo enačbo:

$$\kappa = 1 + 0,625 * (\psi - 0,3) = 1 + 0,625 * (0,3 - 0,3) = 1,0, \quad 1,0 \leq \kappa \leq 1,25$$

kjer je:

ψ razmerje momentov,

$$\psi = \frac{M_{pl,Rd,t}}{s * V_{m,t}} = \frac{10,27 \text{ kNm}}{0,625 \text{ m} * 60,34 \text{ kN}} = 0,27 \cong 0,3 \text{ (velja za zgornji in spodnji T prerez)}$$

Izračunamo odpornost zgornjega in spodnjega T prereza:

$$\sigma_{w,Rd,top} = \frac{\chi_t * \xi * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,871 * 1,50 * 27,5}{1,0} = 35,93 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{w,Rd,bot} = \frac{\chi_b * \xi * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,881 * 1,50 * 27,5}{1,0} = 36,34 \text{ kN/cm}^2$$

Opravimo kontrolo lokalnega izbočenja:

$$\frac{\sigma_{w,Ed,top}}{\kappa * \sigma_{w,Rd,top}} = \frac{25,52 \text{ kN/cm}^2}{1,0 * 35,93 \text{ kN/cm}^2} = 0,71 \leq 1,0 \quad \text{OK}$$

$$\frac{\sigma_{w,Ed,bot}}{\kappa * \sigma_{w,Rd,bot}} = \frac{25,52 \text{ kN/cm}^2}{1,0 * 36,34 \text{ kN/cm}^2} = 0,70 \leq 1,0 \quad \text{OK}$$

5.4.3.4 Kontrola strižne nosilnosti nad podporo

Ker je stojina nosilca vitka v strigu je potrebno preveriti odpornost proti lokalnemu izbočenju v strigu. Stojine nosilcev z razmerjem h_w / t_w večjim od $72 / \eta * \epsilon$, je potrebno ob podporah ojačati s prečnimi ojačitvami (Beg, D. in Pogačnik, A., 2009). Za jeklo S275 se privzame $\eta = 1,2$. Največja prečna sila $V_{Ed,max}$ je nad podporo v območju zapolnjene odprtine.

Predpostavimo, da ima nosilec prečne ojačitve samo na mestu podpor, brez vmesnih ojačitev. Postopek za določitev $\bar{\lambda}_w$ in χ_w je naslednji (Beg, D. in Pogačnik, A., 2009):

$$\alpha = \frac{a}{h_w} \ll 1,0 ; \quad a = L,$$

$$\alpha = \frac{1500 \text{ cm}}{62,08 \text{ cm}} = 24,16 > 1 \rightarrow k_\tau = 5,34 + \frac{4,0}{\alpha^2} = 5,34 + \frac{4,0}{(24,16)^2} = 5,34,$$

$$\bar{\lambda}_w = \sqrt{\frac{f_y}{3 * \tau_{cr}}} = \frac{h_w}{37,4 * t_w * \epsilon * \sqrt{k_\tau}} = \frac{62,08}{37,4 * 0,94 * 0,92 * \sqrt{5,34}} = 0,83 > \frac{0,83}{\eta} = 0,69$$

$$\chi_w = \frac{0,83}{\bar{\lambda}_w} = 0,88,$$

$$V_{b,Rd} = \frac{\chi_w * f_y * h_w * t_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}} = \frac{0,880 * 27,5 * 62,08 * 0,94}{\sqrt{3} * 1,0} = 815,33 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{137,93 \text{ kN}}{815,33 \text{ kN}} = 0,17 \leq 1,0. \quad \text{OK}$$

Kriterij je izpolnjen, zato prečne ojačitve niso potrebne.

5.4.4 Odpornost satastega nosilca proti bočni zvrnitvi

Predlog osnutka predstandarda EN 1993-1-13 v podpoglavju 6.11 določa, da bočno zvrnitev nosilca kontroliramo po SIST EN 1993-1-1: 6.3.2.3. Kontrola nosilca na bočno zvrnitev upošteva pristop za polnostenske I profile, vendar z geometrijskimi karakteristikami oslabljenega prereza (čez odprtino).

Kot je v podpoglavju 5.1. določeno, je nosilec bočno podprt na razmakih 3m. V tem primeru preverimo satasti nosilec na bočno zvrnitev na območju med 17. in 25. pozicijo v nosilcu. Sledi prikaz izračuna geometrijskih karakteristik neto prereza satastega nosilca nad odprtino, kot navajajo Sonck et al (2010, str. 581).

Poleg že znanih geometrijskih značilnosti neto prereza nosilca, določimo še:

$$I_{z,neto} = 2 * \frac{b^3 * t_f}{12} + \frac{(\alpha) * t_f^3}{12} =$$

$$= 2 * \frac{(19,0)^3 * 1,46}{12} + \frac{14 * (1,46)^3}{12} = 1672,65 \text{ cm}^4$$

$$I_{\omega} = \frac{h_w^2}{2} * \frac{b^3 * t_f}{12} = \frac{(62,08)^2}{2} * \frac{(19,0)^3 * 1,46}{12} = 1608073,27 \text{ cm}^6$$

$$I_t = 2 * \frac{b^3 * t_f}{16} * \left[\frac{16}{3} - 3,36 * \frac{t_f}{b} * \left(1 - \frac{t_f^4}{12 * b^4} \right) \right] +$$

$$+ \frac{(\alpha) * t_w^3}{16} * \left[\frac{16}{3} - 3,36 * \frac{t_w}{(\alpha)} * \left(1 - \frac{t_w^4}{12 * b(\alpha)^4} \right) \right] =$$

$$= 2 * \frac{(19,0)^3 * 1,46}{16} * \left[\frac{16}{3} - 3,36 * \frac{1,46}{19,0} * \left(1 - \frac{1,46^4}{12 * (19,0)^4} \right) \right] +$$

$$+ \frac{14,0 * 0,94^3}{16} * \left[\frac{16}{3} - 3,36 * \frac{0,94}{14,0} * \left(1 - \frac{0,94^4}{12 * 19,0(14,0)^4} \right) \right] = 6471,72 \text{ cm}^4$$

kjer je:

$$\alpha = (h_w - h_o) = (62,08 - 48,08) = 14,0 \text{ cm},$$

$I_{z,neto}$ vztrajnostni moment prereza nad odprtino v nosilcu okrog šibke osi z,

I_{ω} torzijski vztrajnostni moment pri ovirani torziji,

I_t torzijski vztrajnostni moment pri enakomerni (Saint-Venantovi) torziji.

Izračun kritičnega momenta bočne zvrnitve M_{cr} poteka po znanem postopku, in sicer na podlagi nosilca, ki je na koncih torzijsko podprt z viličastimi podporami. Imamo dvojnosiometrični prerez, obtežba deluje v težišču prereza:

$$M_{cr} = C_1 * \frac{\pi}{k_z * l} * \sqrt{E * I_z * G * I_t + \frac{\pi^2}{k_{\omega} * l^2} * E * I_z * E * I_{\omega}} =$$

$$= \frac{\pi}{300} * \sqrt{21000 * 1672,65 * 8076,9 * 6471,72 + \frac{\pi^2}{(300)^2} * 21000^2 * 1672,65 * 1608073,27}$$

$$= 0,01047 * 44339769,37 = 464089,59 \text{ kNcm} \rightarrow M_{cr} = 4640,9 \text{ kNm}$$

kjer je:

$C_1 = 1,0$, koeficient, ki zajema vpliv poteka upogibnih momentov vzdolž nosilca,
 $k_z = k_\omega = 1,0$, robni pogoji za vzbočenje prečnega prereza nosilca.

Vitkost $\bar{\lambda}_{LT}$ prereza nad odprtino se izračuna z izrazom: (SIST EN 1993-1-1: 6.3.2.2)

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{y,pl(neto)} * f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{2134,63 \text{ cm}^3 * 27,5 \text{ kN/cm}^2}{464089,59 \text{ kNcm}}} = 0,36 < \bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \quad \text{OK}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} < \bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \rightarrow \chi_{LT} = 1,0$$

V primeru, ko vrednost $\bar{\lambda}_{LT}$ presega največjo vrednost $\bar{\lambda}_{LT,0}$, se redukcijski faktor χ_{LT} upošteva za zmanjšanje projektne upogibne nosilnosti bočne zvrnitve $M_{b,Rd}$ (SIST EN 1993-1-1: 6.3.2.3).

Kontrola bočne zvrnitve satastega nosilca s krožnimi odprtinami:

$$M_{Ed} \leq M_{b,Rd} = \chi_{LT} * W_{y,pl(neto)} * \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$M_{Ed} = 51722 \text{ kNcm} \leq M_{b,Rd} = 1,0 * 2134,63 * \frac{27,5}{1,0} = 58702 \text{ kNcm} \quad \text{OK}$$

5.5 Mejno stanje uporabnosti (MSU)

5.5.1 Kontrola upogibkov satastega nosilca

Za mejno stanje uporabnosti je potrebno dokazati, da upogibki strešnega nosilca pri karakteristični kombinaciji vplivov w_{max} ne presegajo $L/200$ (nacionalni dodatek A.1.4.1(2), preglednica N1).

Odprtine v nosilcih povzročajo dodatne vertikalne pomike zaradi vpliva upogiba in striga, ki morajo biti izračunani s primerno metodo, ki temelji na elastičnem obnašanju nosilca. Po predlogu osnutka predstandarda EN 1993-1-13: 7 (2) se praviloma ne preverja napetosti na mestu odprtin, razen v primeru dinamične obtežbe, ki lahko vodi do porušitve zaradi utrujanja.

Dodatni pomik v satastem nosilcu s krožnimi odprtinami zaradi Vierendeel-ovega upogiba, ki je obremenjen z enakomerno porazdeljeno obtežbo, je podan z enačbami:

(Predlog osnutka EN 1993-1-13: 7)

$$\frac{w_{add}}{w_b} = 10 * n_o * \left(\frac{h_o}{H}\right)^3 * \left(\frac{H}{L}\right)^2 \quad \text{za } s_o < 0,35 * h_o,$$

$$\frac{w_{\text{add}}}{w_b} = 3,5 * n_o * \left(\frac{h_o}{H}\right)^3 * \left(\frac{h_o}{s_o}\right) * \left(\frac{h}{L}\right)^2 \quad \text{za } s_o > 0,35 * h_o ,$$

kjer je:

w_{add} dodatni pomik satastega nosilca na polovici razpona,
 w_b poves nosilca zaradi čistega upogiba, na mestu polne stojine ter izračunanega z $I_{y,\text{bruto}}$,
 n_o število odprtin v nosilcu,
 H višina satastega nosilca,
 h_o premer odprtine,
 s_o dolžina stojine med dvema odprtinami,
 L razpon nosilca.

Izračun maksimalnega upogibka nosilca (bruto prerez):

$$w_b = \frac{5 * q_{\text{Ed}}^{\text{MSU}} * l^4}{384 * E * I_{y,\text{bruto}}} = \frac{5 * 12,83 \text{ kN/m} * (1500 \text{ cm})^4 * 0,01}{384 * 21000 \text{ kN/m}^2 * 74749,03 \text{ cm}^4} = 5,39 \text{ cm}$$

Ker velja, da je $s_o = 14,42 \text{ cm} > 0,35 * h_o = 0,35 * 48,08 \text{ cm} = 16,83 \text{ cm}$, sledi:

$$\frac{w_{\text{add}}}{w_b} = 3,5 * 24 * \left(\frac{48,08}{65,0}\right)^3 * \left(\frac{48,08}{14,42}\right) * \left(\frac{65,0}{1500}\right)^2 = 0,213$$

$$w_{\text{add}} = 0,213 * w_b = 0,213 * 5,39 \text{ cm} = 1,15 \text{ cm}$$

Celotni pomik nosilca in kontrola povesa:

(SIST EN 1990-A1.4.2)

$$w_{\text{tot}} = w_b + w_{\text{add}} = 5,39 \text{ cm} + 1,15 \text{ cm} = 6,54 \text{ cm} \leq \frac{L}{200} = \frac{1500 \text{ cm}}{200} = 7,5 \text{ cm} \quad \text{OK}$$

6 ZAKLJUČEK

Predmet diplomske naloge je obravnava jeklenih nosilcev z odprtinami v stojini s poudarkom na opisu smiselnosti njihove uporabe, pregledu možnih rešitev in razlagi osnovnih problemov, ki se pojavijo pri projektiranju tovrstnih nosilcev. S tehnološkim razvojem in z vse večjimi potrebami po konstrukcijah večjih razponov, različnih oblik in materialov, prihajajo vse bolj v ospredje številne možnosti uporabe jeklenih nosilcev z odprtinami. Tudi z vidika zmanjšanja stroškov proizvodnje postajajo jekleni nosilci pri večjih razponih konkurenčnejši od betonskih, kjer se pretežni del prenosa obtežbe porabi za prenos lastne teže. S težnjo po optimizaciji rešitev z vidika nosilnosti, uporabnosti (npr. vodenje inštalacij), estetskem videzu in stroških proizvodnje gre razvoj vse bolj v smeri uporabe nosilcev s povišano stojino. Pri tem gre za sataste nosilce, ki jih dobimo z razrezom in varjenjem dveh delov profila, ki so lahko različnih dimenzij. Danes se jekleni nosilci z odprtinami vse bolj uporabljajo kot sovprežni nosilci.

Pomemben premik na področju projektiranja jeklenih konstrukcij je ob koncu 18. stoletja pomenil Vierendeel-ov model nosilca. Za razliko od paličja, kjer se v členkastih spojih pojavljajo samo osne sile, je Vierendeel-ov nosilec sestavljen iz vrste pravokotnih okvirov, v katerih so diagonale odstranjene. Zaradi tega spojenih pasov in navpičnih delov okvirov se prečna oz. strižna sila prenaša preko pasov na vertikale z upogibnimi momenti. Poenostavljena metoda izračuna notranjih sil in momentov temelji na predpostavki, da je na sredini dolžine pasov in vertikal (v središčni liniji odprtine) moment enak nič. Principi "Vierendeel-ovega upogiba" so vključeni tudi v pripravo novega standarda iz skupine Evrokod 3, ki bo podal navodila za projektiranje jeklenih nosilcev z odprtinami.

Po predlogu predstandarda EN 1993-1-13 (april 2017) je med drugim potrebno preveriti notranje sile in nosilnosti prereзов okrog odprtin ter nosilnost na lokalno izbočenje stojine med odprtinami. Predlog standarda vključuje tudi metode izračuna nosilnosti, ki so v nalogi uspešno preizkušene na računskem primeru jeklenega nosilca s krožnimi odprtinami. Avtor za kontrolo nosilnosti prereзов v ravninah okrog odprtin uporabi alternativno metodo, pri kateri je potrebno rezultate izračuna Vierendeel-ovega nosilca kontrolirati za kritične prereze pri različnih kotih (korak 5°). Da je v teh primerih primernejša uporaba računalnika je pokazal izračun nosilca z računalniškim programom ACB+ (ArcelorMittal). Druga pomembna alternativna metoda, ki se poleg splošne uporablja za kontrolo nosilnosti na lokalno izbočenje stojine med odprtinami ("web post buckling"), temelji na empirični študiji analize končnih elementov. V nalogi sta pri kontroli izbočenja stojine uporabljeni obe metodi.

Na podlagi uporabe navodil bodočega standarda avtor meni, da bo kljub določenim omejitvam omogočena njegova široka uporaba v praksi, saj ga bo možno uporabiti tako pri projektiranju nosilcev z odprtinami iz vroče valjanih ali varjenih profilov, satastih nosilcev ali nosilcev s posameznimi odprtinami različnih oblik in dimenzij. Za razliko od razvitih držav, v Sloveniji še ne koristimo vseh možnosti tega proizvoda. Ostaja še odprto vprašanje ali bo lahko bodoči standard EN 1993-1-13 prispeval k večji uporabi nosilcev z odprtinami.

VIRI

Uporabljeni viri

Bake, M. S. 2010. Behaviour of Cellular Beams and Cellular Composite Floors at Ambient and Elevated Temperatures. Doctoral Dissertation. Manchester, University of Manchester, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering: 261 str.

<https://www.escholar.manchester.ac.uk/api/datastream?publicationPid=uk-ac-man-scw:87592&datastreamId=FULL-TEXT.PDF> (Pridobljeno 12.7.2017.)

Beg, D. (ur.) in Pogačnik, A. (ur.). 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: 1077 str.

Best practice in steel construction – commercial buildings. 2008. Berkshire, The Steel Construction Institute: 56 str.

http://www.steelconstruction.info/File:SCI_EP35.pdf?internal_link (Pridobljeno 2.8.2017.)

Boyer, J. P. 1964. Castellated Beams – New developments. AISC Engineering Journal, Vol.1: 104-108.

<http://www.arch.mcgill.ca/prof/sijpkcs/U2-winter-2008/presentation-turcot/repairs/beam-solution/Castellated%20Beams%20-%20New%20Developments.pdf> (Pridobljeno 20.6.2017.)

Darwin, D. 2000. Design of composite beams with web openings. Prog. Struct. Engng Mater. 2:157 – 163

https://kuscholarworks.ku.edu/bitstream/handle/1808/20510/darwin_design.pdf?sequence=1&isAllowed=y (Pridobljeno 11.7.2017.)

Darwin, D. 1990. Design of steel and composite beams with web openings. Kansas, American Institute of Steel Construction: 66 str.

<https://www.aisc.org/globalassets/unsearched/manuals/reference-list/steel-and-composite-beams-with-web-openings.pdf> (Pridobljeno 12.6.2017.)

Durif, S., Bouchair, A. H. in Vassart, O. 2012. Validation of an analytical model for curved and tapered cellular beams at normal and fire conditions. Periodica polytechnica Civil Engineering, 57/1 (2013): 83-95.

<https://pp.bme.hu/ci/article/view/2144/1278> (Pridobljeno 14.7.2017.)

Fares, S.S., Coulson, J. in Dinehart, D.W. 2016. Castellated and cellular beam design. Kansas, AISC: 110 str.

<https://www.aisc.org/globalassets/unsearched/design-guides/design-guide-31--castellated-and-cellular-beam-design.pdf> (Pridobljeno 20.6.2017.)

Fire Protection For Structural Steel In Buildings (Yellow Book). 2010. Bordon, ASFP in SCI: 93 str.

<https://www.scribd.com/document/282559191/ASFP-Yellow-Book-4th-Edition-Vol-1-TextPagesAug2010-1-pdf> (Pridobljeno 12.7.2017.)

Erdal, F. 2011. Ultimate load capacity of optimally designed cellular beams. Doctoral Dissertation. Middle East Technical University: 184 str.

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.633.1010&rep=rep1&type=pdf> (Pridobljeno 12.7.2017.)

Hajdukovič, M. 2003. Požarnozaščitni premazi za jeklene konstrukcije. Gradbeni vestnik – 3 – 2003: 54-57.

<http://www.zveza-dgits.si/3334/pdf:1> (Pridobljeno 14.7.2017.)

Jamadar, A. M. in Kumbhar, P. D. 2015. Parametric study of castellated beam with circular and diamond shaped openings. IRJET, Vol. 2, No. 2: 715-722.

<https://www.irjet.net/archives/V2/i2/Irjet-v2i2129.pdf> (Pridobljeno 12.7.2017.)

Kriteriji za trajnostno gradnjo in zeleno javno načrtovanje. Ljubljana, GI ZRMK d.o.o.: 12 str.

[http://www.gi-zrmk.si/media/uploads/public/document/70-](http://www.gi-zrmk.si/media/uploads/public/document/70-kriteriji_za_trajnostno_gradnjo_in_zeleno_javno_narocanje_gi_zrmk_sl.PDF)

[kriteriji_za_trajnostno_gradnjo_in_zeleno_javno_narocanje_gi_zrmk_sl.PDF](http://www.gi-zrmk.si/media/uploads/public/document/70-kriteriji_za_trajnostno_gradnjo_in_zeleno_javno_narocanje_gi_zrmk_sl.PDF) (Pridobljeno 17.7.2017.)

Kržič, F. 1994. Jeklene konstrukcije I. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 208 str.

Lawson, R.M. in Hicks, S.J. 2011. Design of composite beams with large web openings (P355). Berkshire, SCI: 120 str.

<http://www.steelconstruction.info/index.php?title=Special:ImagePage&t=SCI+P355.pdf> (Pridobljeno 11.6.2017.)

Lawson, R. M. in Rackham, J. W. 1989. Design of Haunched Composite Beams in Buildings (P060). Berkshire, SCI: 79 str.

http://www.steelconstruction.info/File:SCI_P60.pdf?internal_link (Pridobljeno 20.7.2017.)

Mckenna, R.D. in Lawson, R.M. 1997. Design of steel framed buildings for service integration (P166). Berkshire, SCI: 139 str.

<http://www.steelconstruction.info/index.php?title=Special:ImagePage&t=SCI+P166.pdf> (Pridobljeno 10.7.2017.)

Panepojaman, P. 2012. Buckling analysis for web post of cellular beams. IPEC-10: 1-5.

<http://phoenix.eng.psu.ac.th/qa/Reference54/IPEC10/p12.pdf> (Pridobljeno 7.8.2017.)

Radić, I. in Markulak, D. 2007. Lateral buckling of castellated beams. Tehnički vjesnik, 14: 25-35.

<http://hrcak.srce.hr/file/20736> (Pridobljeno 11.7.2017.)

Saneebamol, M. A. in Soni S. 2016. Experimental Investigation on Castellated steel beam having spacer plates (Litzka Beam). ISR Journals and Publications, Vol. 3, No. 1: 244-247.

[http://www.isrjournals.org/journals/civil_environmental_journals/experimentalinvestigationoncastellatedsteelbeamhavingspacerplates\(litzkabeam\)1448039037.pdf](http://www.isrjournals.org/journals/civil_environmental_journals/experimentalinvestigationoncastellatedsteelbeamhavingspacerplates(litzkabeam)1448039037.pdf) (Pridobljeno 3.8.2017.)

Slivnik, L. 2003. Kristalna palača – nov arhitekturni tip javnega prostora. Revija AR Arhitektura, AR2003/1, Letnik IV: 46-51.

<https://www.dlib.si/stream/URN:NBN:SI:DOC-9KSZP5JE/c4d0914d-ee6c-468d-92dd-262c3b3d4e54/PDF> (Pridobljeno 3.8.2017.)

Sonck, D., Vanlaere, W. in Van Impe, R. 2010. Elastic lateral-torsional buckling of cellular beams. International Symposium "SSCS 2010", No. 10: 573-583.

https://www.researchgate.net/profile/Delphine_Sonck/publication/268870277_Elastic_lateral-torsional_buckling_of_cellular_beams/links/562f3f6108ae518e348458e8.pdf (Pridobljeno 26.8.2017.)

Tsavidaridis, K. D., Kingman, J. J. in Toporov V. V. 2015. Application of structural topology optimisation to perforated steel beams. Computer and Structures, Vol. 158: 108-123.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045794915001418> (Pridobljeno 3.8.2017.)

Vassart, O., Cajot, L. G. in Muzeau, J. P. et al. 2008. Development of a new composite cellular beam. The Singapore Engineer: 14-16.

https://www.researchgate.net/publication/278673222_Development_of_a_new_composite_cellular_beam (Pridobljeno 5.8.2017.)

Verswijver, K., De Meyer, R., Denys, R. in Belis J. 2010. Development of the Vierendeel: calculation, aesthetics, welding, concrete. Day of Research 2010: 206-211.

https://www.researchgate.net/publication/267919741_DEVELOPMENT_OF_THE_VIERENDEEL_CALCULATION_AESTHETICS_WELDING_CONCRETE (Pridobljeno 3.8.2017.)

Wakchaure, M.R., Sagade, A. V. in Auti, V.A. 2012. Parametric study of castellated beam with varying depth of web opening. IJSRP, Vol. 2: 287-292.

<http://www.ijserp.org/research-paper-0812/ijserp-p0880.pdf> (Pridobljeno 3.8.2017.)

Ward, J.K. 1990. Design of composite and non – composite cellular beams. Berkshire, The Steel Construction Institute: 58 str.

Web openings in composite beams, steel industry guidance notes (SIGNS). 2009. London. BCSA Ltd., SIGNS SN37, 07/2009: 1-2.

<https://www.steelconstruction.org/custom/uploads/2016/04/SIGNS-SN37.pdf> (Pridobljeno 12.7.2017.)

Wickersheimer, D.J. 1976. The Vierendeel. JSAH, Vol. 35, No. 1: 54-60.

<http://www.arch.mcgill.ca/prof/sijpkcs/aaresearch-2012/12-student-files/Vierendeel.pdf> (Pridobljeno 3.8.2017.)

Standardi

Osutek predloga predstandarda EN 1993-1-13: Steel beams with large web openings – April 2017.

SIST EN 1990:2004. Evrokod – Osnove projektiranja konstrukcij.

SIST EN 1991-1-1:2004. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-1. del: Splošni vplivi – Prostorninske teže, lastna teža, koristne obtežbe stavb.

SIST EN 1993-1-1:2005. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe.

Ostali viri

Godec, M., Franić, S., Sonjara, N. et al. 1998. Englesko – hrvatski strokovni rječnik: Graditeljstvo, Zagreb, Altermedia: 257 str.

<https://www.scribd.com/doc/39063300/Rjecnik-ENG-HRV-Strukovni> (Pridobljeno 10.6.2017.)

Koler, P. T. in Turk, G. Navodila za oblikovanje visokošolskih dek na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo in navajanje virov. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

[https://www.fgg.uni-lj.si/wp-content/uploads/2016/09/UL_FGG -](https://www.fgg.uni-lj.si/wp-content/uploads/2016/09/UL_FGG_-_Pr_10_Navodila_za_oblikovanje_UL_FGG_Koler_Povh_in_Turk_k.pdf)

[_Pr. 10 Navodila za oblikovanje UL FGG Koler Povh in Turk k.pdf](https://www.fgg.uni-lj.si/wp-content/uploads/2016/09/UL_FGG_-_Pr_10_Navodila_za_oblikovanje_UL_FGG_Koler_Povh_in_Turk_k.pdf) (Pridobljeno 26.6.2017.)

Kovačič, D. 2010. Nosilnost jeklenih nosilcev z odprtinami v stojini in jeklenih satastih nosilcev. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Kovačič): 162 str.

Proizvajalec satastih nosilcev ArcelorMittal:

ArcelorMittal Ltd. Product catalogue - ACB[®]. 2014. Luxembourg, ArcelorMittal Commercial Sections: 46 str.

http://sections.arcelormittal.com/fileadmin/redaction/4-Library/1-Sales_programme_Brochures/ACB/ACB_EN.pdf (Pridobljeno 5.6.2017.)

ArcelorMittal Ltd. Product catalogue - ACB[®] and Angelina[™] beams. 2015. Luxembourg, ArcelorMittal Commercial Sections: 62 str.

http://sections.arcelormittal.com/fileadmin/redaction/4-Library/1-Sales_programme_Brochures/Castellated_beams/Castellated_EN.pdf (Pridobljeno 5.6.2017.)

Proizvajalec satastih nosilcev Macsteel:

Macsteel Trading Ltd. Cellular beams design guide. 2003. Johannesburg, Macsteel Trading: 20 str.

https://www.macsteel.co.za/files/data_downloads/25/macsteel-trading-cellular-beams-design-guide.pdf (Pridobljeno 12.7.2017.)

Proizvajalec satastih nosilcev Westok:

Kloeckner Metals UK Westok. 2016. Brochure – cellular beams. Leeds, Westok: 20 str.

<https://www.kloecknermetalsuk.com/wp-content/uploads/2016/12/Westok-Brochure.pdf> (Pridobljeno 2.8.2017.)

Slovar slovenskega knjižnega jezika: SSKJ. 2000. Ljubljana. Izdala Slovenska akademija znanosti in umetnosti [in] Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti, Inštitut za slovenski jezik Frana Ramovša ZRC SAZU, Založba ZRC: 1714 str.

Stanić, A. 2013. Optimizacija jeklenih vitkih elementov z odprtinami. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Stanić): 65 str.

PRILOGE

PRILOGA A: IZRAČUN SATASTEGA NOSILCA S KROŽNIMI ODPRTINAMI Z
RAČUNALNIŠKIM PROGRAMOM ACB+ (ARCELORMITTAL)

**PRILOGA A: IZRAČUN SATASTEGA NOSILCA S KROŽNIMI ODPRTINAMI Z
RAČUNALNIŠKIM PROGRAMOM ACB+ (ARCELORMITTAL)**

ACB+
v 3.13

PRELIMINARY DESIGN NOTE

Primarni strešni nosilec (IPE 450)



User : Polona Ivančič
Company : UNI (B) - GR
Project : Dipl. nal.: Projektiranje nosilcev z odprtinami
Beam Ident : Primarni strešni nosilec (IPE 450)
Comment : Satasti nosilec s krožnimi odprtinami
File :

03/09/2017

Software use conditions apply

1 / 26

ACB+ v 3.13	UNI (B) - GR - Polona Ivančič		
	Dipl. nal.: Projektiranje nosilcev z odprtinami - Primarni strešni nosilec (IPE 450)		

Parameters

General Parameters

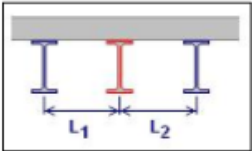
Non composite Beam

Configuration :	Straight beam with constant height		
Cutting :	Process ArcelorMittal Cellular Beam		
End supports :	Simply supported beam		
Horizontal span length :	L = 15,00 m		
Total number of openings :	n = 24		
Diameter of the openings :	a ₀ = 480,8 mm		
Spacing between openings center :	e = 625,0 mm		
Web post width :	w = e - a ₀ = 144,2 mm		
Web post slenderness :	α _w = e / a ₀ = 1,300		
End web posts widths :	w _{end,l} = 72,1 mm	w _{end,r} = 72,1 mm	
Height of the cellular beam :	H _t = 650,0 mm		
Mass :	m = 1090 kg		
Total paint surface :	S = 22,71 m ²		
Paint surface (without upper face) :	S' = 19,86 m ²		
Massiveness :	M = 163,54 m ⁻¹		
Massiveness (without upper face) :	M' = 143,02 m ⁻¹		
Ratio of flanges area :	(b _f t _f) _{max} / (b _f t _f) _{min} = 1,00 < 4,50		
Ratio H _t / a ₀ :	H _t / a ₀ = 1,35 1,25 < H _t / a ₀ < 4,00		
Opening slenderness :	β = a ₀ / t _w = 51,15 < 90,00		
Web slenderness :	h _w / t _w = 61,57 < 124,0; α _w = 100,9		

Position of the beam

The studied beam is an intermediate beam.

Spacing of the beam	- to the adjacent left beam :	L ₁ = 4,000 m
	- to the adjacent right beam :	L ₂ = 4,000 m



Width for the calculation of the surface loads supported by the beam :	
on the left side :	d ₁ = 2,000 m
on the right side :	d ₂ = 2,000 m
Total width :	d ₁ + d ₂ = 4,000 m

Lateral restraint

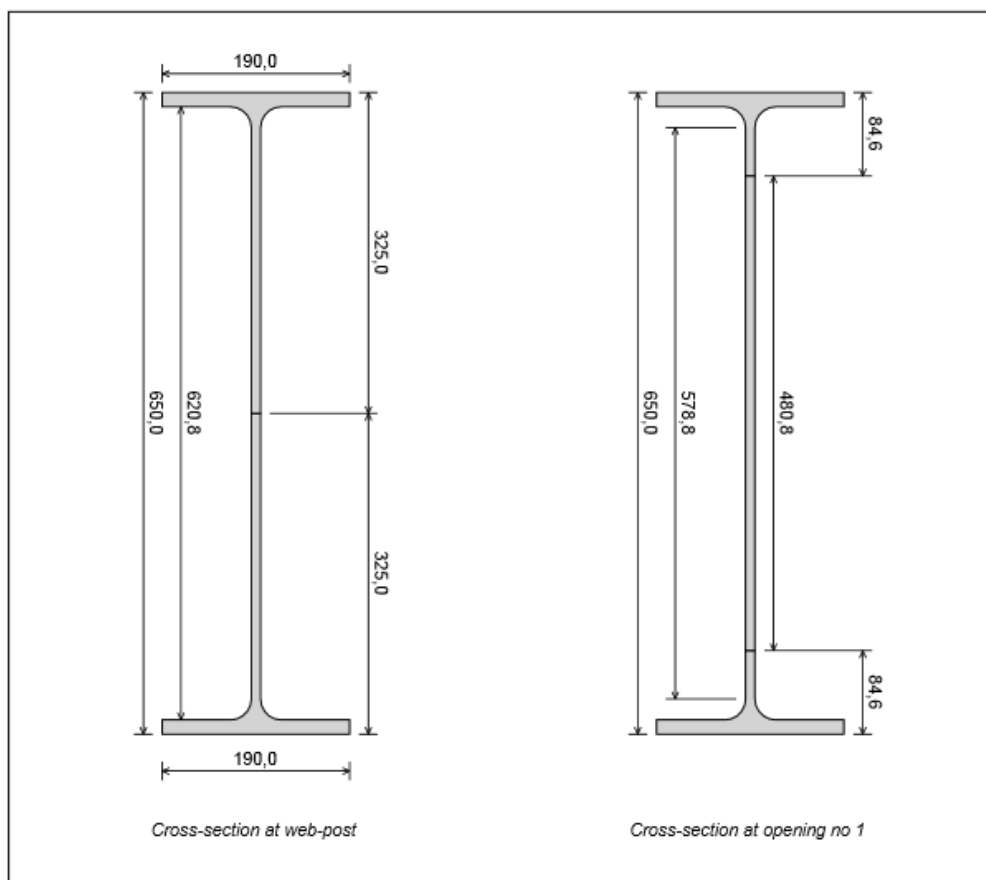
Concentrated lateral restraints :

	x (m)	Lateral restraints	
1	0,0	Both flanges	Origin section
2	3,000	Both flanges	
3	6,000	Both flanges	
4	9,000	Both flanges	
5	12,00	Both flanges	
6	15,00	Both flanges	End section

03/09/2017
Software use conditions apply
2 / 26

Cross-section

	Upper chord	Lower chord
Base profile	IPE 450	IPE 450
Grade	S355	S355
h_t (mm)	450,0	450,0
b_f (mm)	190,0	190,0
t_f (mm)	14,6	14,6
t_w (mm)	9,4	9,4
r_g (mm)	21,0	21,0

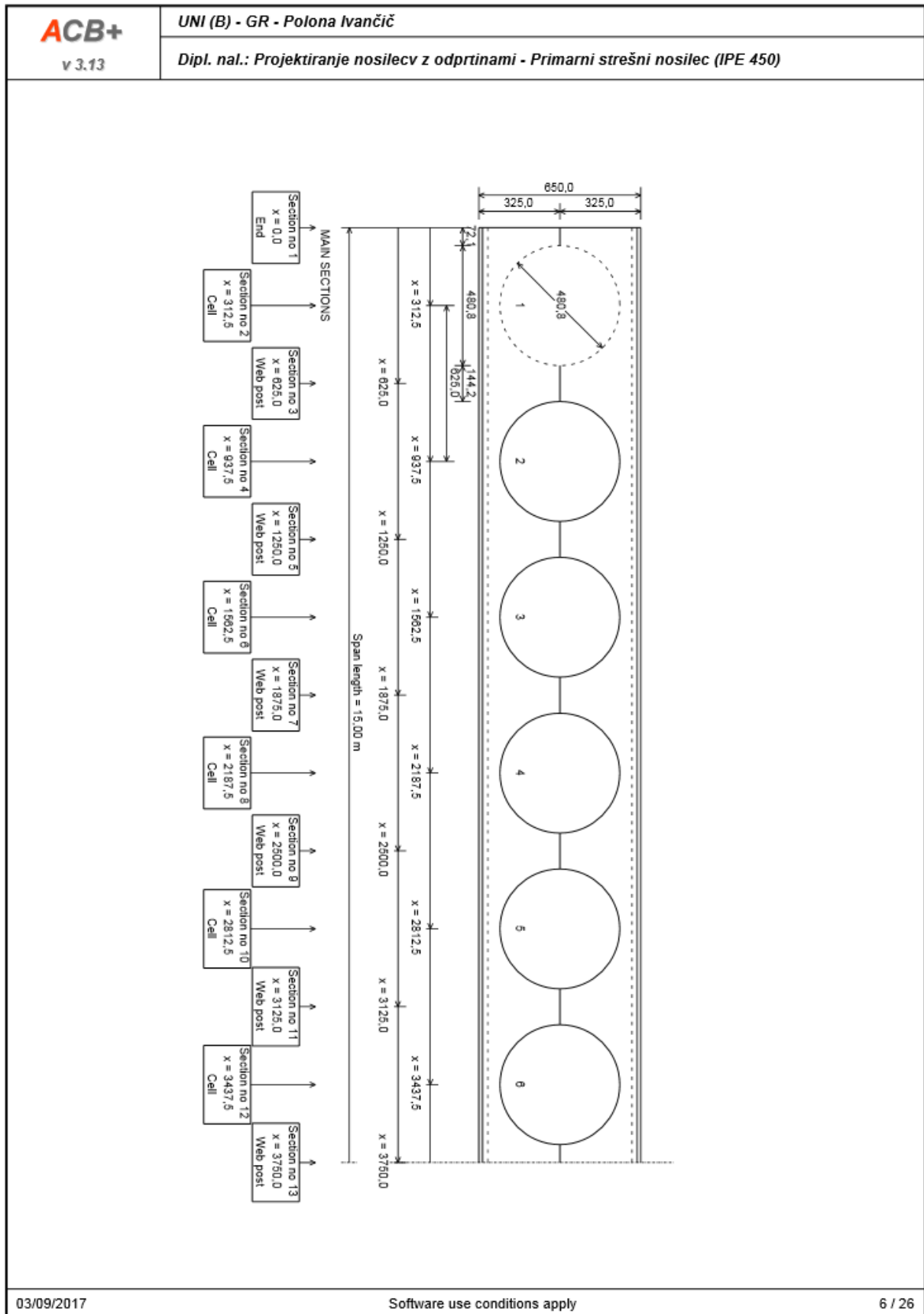


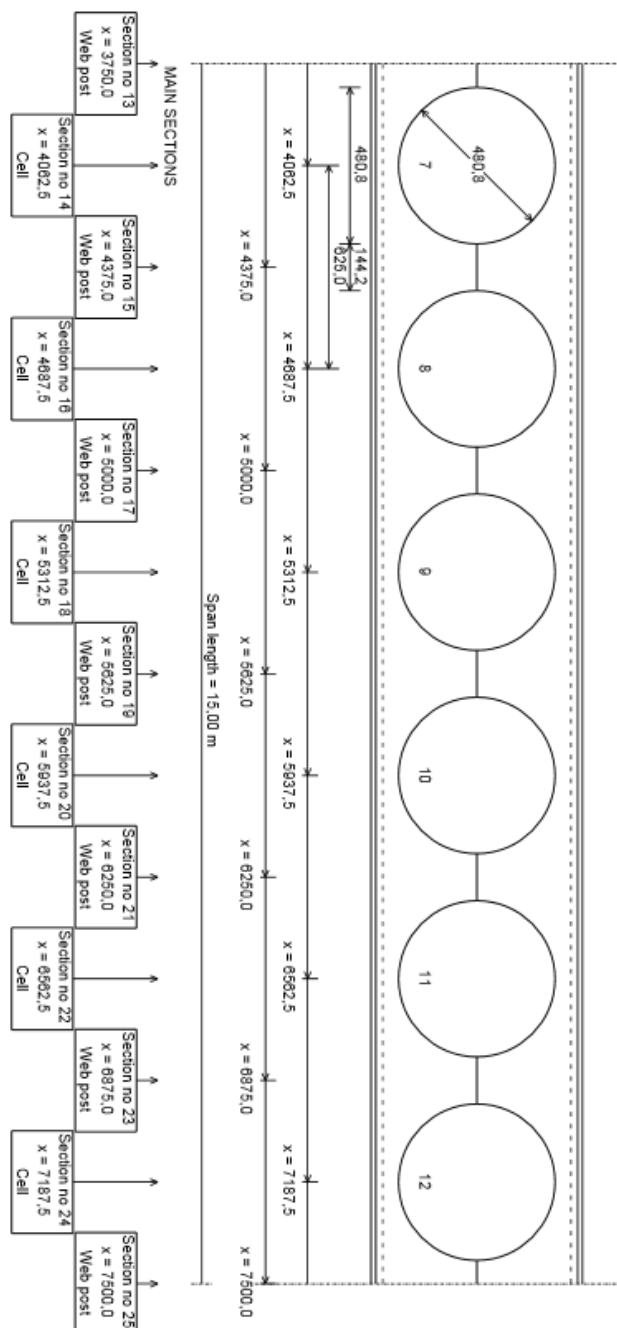
Cross-section properties

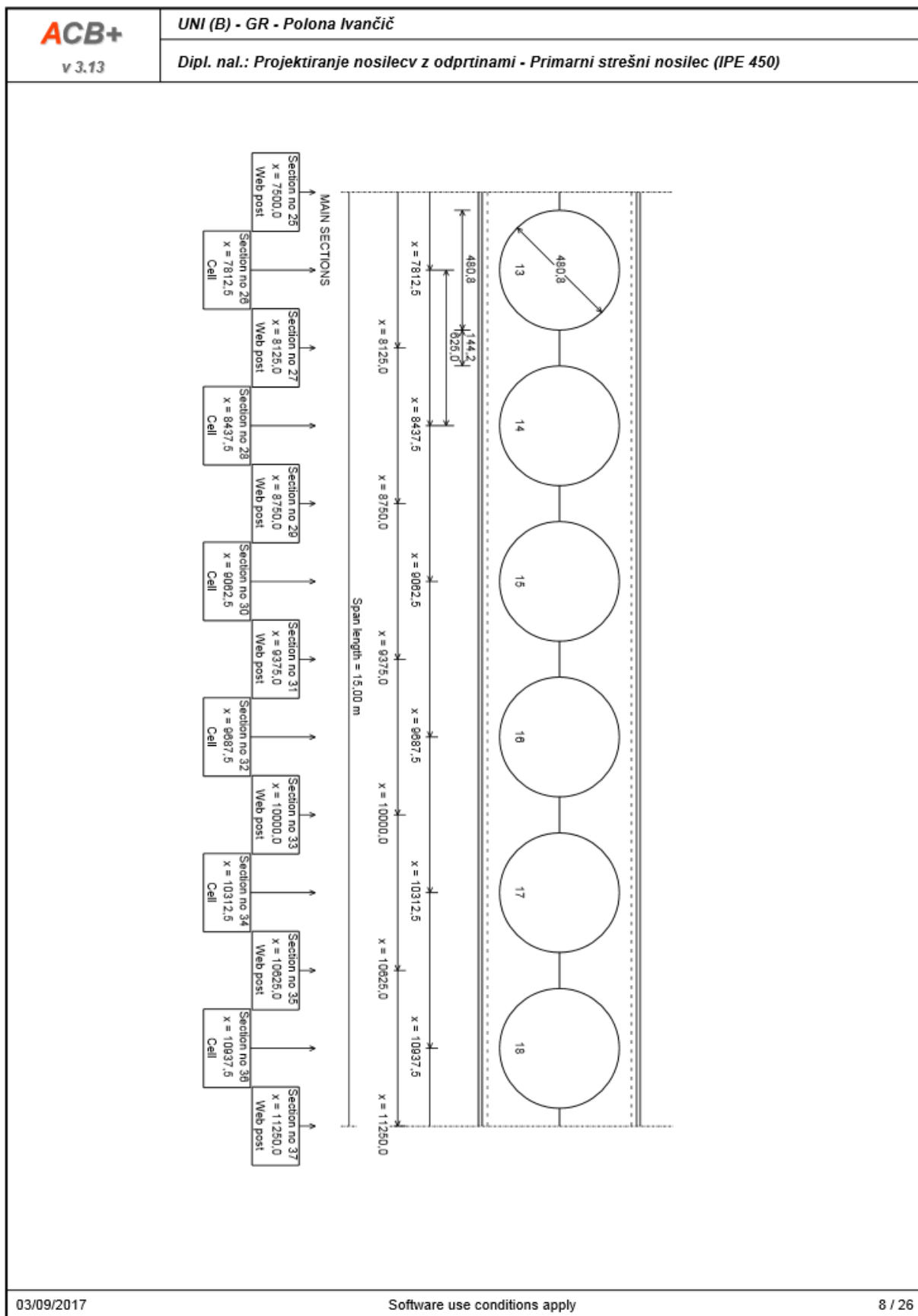
	Gross section	Net section
Area (cm ²)	117,6	72,43
Position of the centroid (mm)	325,0	325,0
Inertia /yy (cm ⁴)	78285	69583
Inertia /zz (cm ⁴)	1676	1673

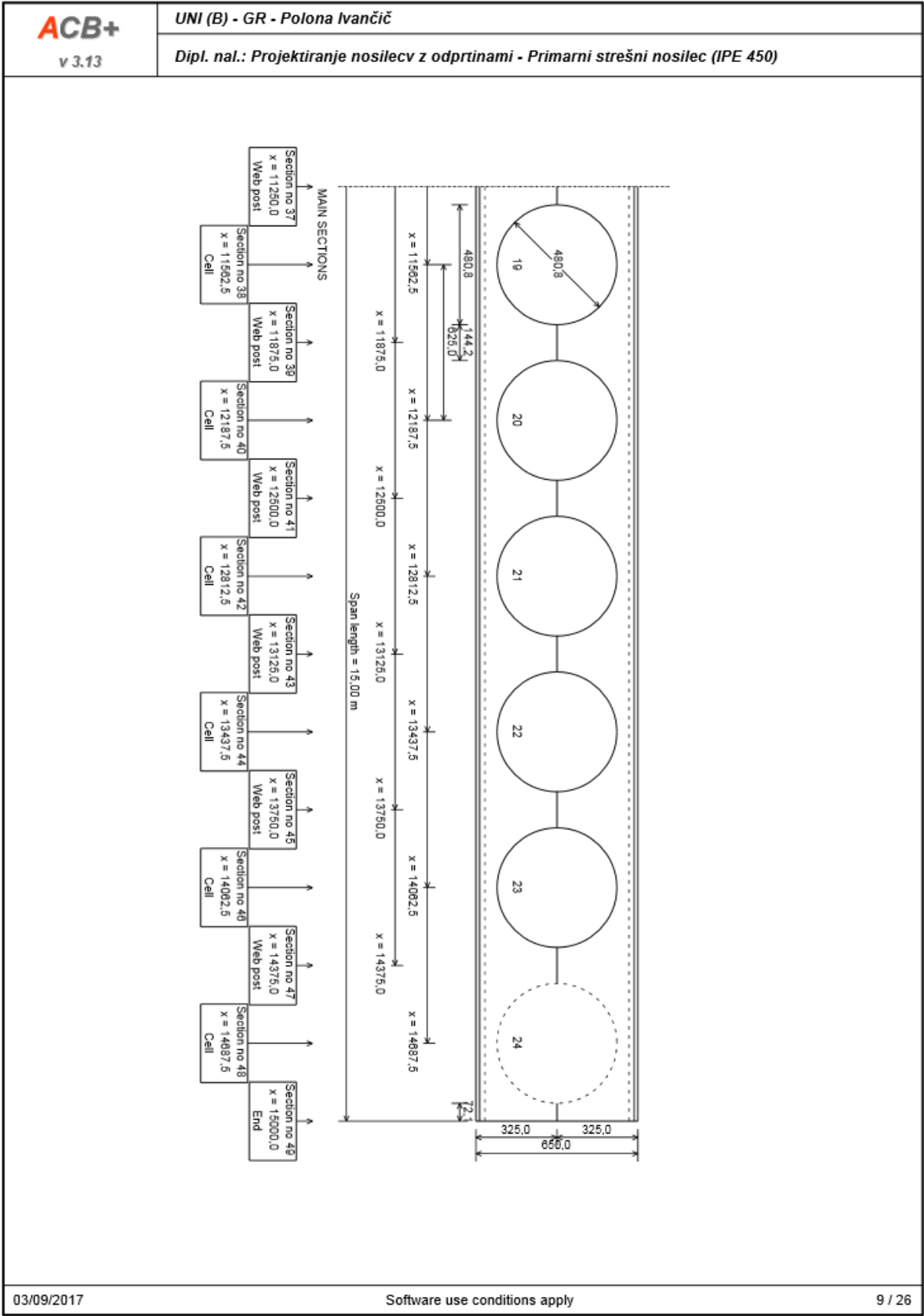
ACB+ v 3.13	UNI (B) - GR - Polona Ivančič																																								
Dipl. nal.: Projektiranje nosilcev z odprtini - Primarni strešni nosilec (IPE 450)																																									
Load cases Permanent loads (G) Dead load : 0,71 kN/m Arising from : Mass of the steel beam : 1090 kg Distributed loads : <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Location x_1 (m)</th> <th>Intensity q_1 (kN/m)</th> <th>Location x_2 (m)</th> <th>Intensity q_2 (kN/m)</th> <th>Orientation</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">0,0</td> <td style="text-align: center;">5,000</td> <td style="text-align: center;">15,00</td> <td style="text-align: center;">5,000</td> <td style="text-align: center;">Vertical</td> </tr> </tbody> </table> Reactions at supports : Left end : $R_{Av} = 42,85$ kN Right end : $R_{Bv} = 42,85$ kN Koristna obtežba (Q) Psi factor $\psi_0 = 1,00$ Distributed loads : <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Location x_1 (m)</th> <th>Intensity q_1 (kN/m)</th> <th>Location x_2 (m)</th> <th>Intensity q_2 (kN/m)</th> <th>Orientation</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">0,0</td> <td style="text-align: center;">7,120</td> <td style="text-align: center;">15,00</td> <td style="text-align: center;">7,120</td> <td style="text-align: center;">Vertical</td> </tr> </tbody> </table> Reactions at supports : Left end : $R_{Av} = 53,40$ kN Right end : $R_{Bv} = 53,40$ kN Partial factors Factors on the loads : $\gamma_{G, sup} = 1,350$ $\gamma_{G, inf} = 1,000$ $\gamma_Q = 1,500$ Factors on the resistance : $\gamma_{M0} = 1,000$ $\gamma_{M1} = 1,000$ $\gamma_{M2} = 1,250$ $\gamma_{M, fi} = 1,000$ Steel properties <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Both chords</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Steel</td> <td>S355 M/ML</td> </tr> <tr> <td>Reduction curve from</td> <td>EN 10025-4</td> </tr> <tr> <td>Standard</td> <td>EN 10025-4 : 2004</td> </tr> <tr> <td>Flange $f_y f_u$ (MPa)</td> <td>355 470</td> </tr> <tr> <td>Web $f_y f_u$ (MPa)</td> <td>355 470</td> </tr> <tr> <td>Cross-section $f_y f_u$ (MPa)</td> <td>355 470</td> </tr> <tr> <td>Cross-section ϵ</td> <td>0,814</td> </tr> </tbody> </table> Databases 2017-01			Location x_1 (m)	Intensity q_1 (kN/m)	Location x_2 (m)	Intensity q_2 (kN/m)	Orientation	2	0,0	5,000	15,00	5,000	Vertical		Location x_1 (m)	Intensity q_1 (kN/m)	Location x_2 (m)	Intensity q_2 (kN/m)	Orientation	1	0,0	7,120	15,00	7,120	Vertical		Both chords	Steel	S355 M/ML	Reduction curve from	EN 10025-4	Standard	EN 10025-4 : 2004	Flange $f_y f_u$ (MPa)	355 470	Web $f_y f_u$ (MPa)	355 470	Cross-section $f_y f_u$ (MPa)	355 470	Cross-section ϵ	0,814
	Location x_1 (m)	Intensity q_1 (kN/m)	Location x_2 (m)	Intensity q_2 (kN/m)	Orientation																																				
2	0,0	5,000	15,00	5,000	Vertical																																				
	Location x_1 (m)	Intensity q_1 (kN/m)	Location x_2 (m)	Intensity q_2 (kN/m)	Orientation																																				
1	0,0	7,120	15,00	7,120	Vertical																																				
	Both chords																																								
Steel	S355 M/ML																																								
Reduction curve from	EN 10025-4																																								
Standard	EN 10025-4 : 2004																																								
Flange $f_y f_u$ (MPa)	355 470																																								
Web $f_y f_u$ (MPa)	355 470																																								
Cross-section $f_y f_u$ (MPa)	355 470																																								
Cross-section ϵ	0,814																																								
03/09/2017	Software use conditions apply																																								
4 / 26																																									

 v 3.13	UNI (B) - GR - Polona Ivančič														
	Dipl. nal.: Projektiranje nosilcev z odprtinami - Primarni strešni nosilec (IPE 450)														
Load combinations <table> <tr> <td>Ultimate Limit States</td> <td>U5 =</td> <td>1,35 G +</td> <td>1,50 Q</td> </tr> <tr> <td>Serviceability Limit States</td> <td>S1 =</td> <td>1,00 G +</td> <td>1,00 Q</td> </tr> <tr> <td>Fire Ultimate Limit States</td> <td colspan="3">No combination</td> </tr> </table>				Ultimate Limit States	U5 =	1,35 G +	1,50 Q	Serviceability Limit States	S1 =	1,00 G +	1,00 Q	Fire Ultimate Limit States	No combination		
Ultimate Limit States	U5 =	1,35 G +	1,50 Q												
Serviceability Limit States	S1 =	1,00 G +	1,00 Q												
Fire Ultimate Limit States	No combination														
03/09/2017 Software use conditions apply 5 / 26															









ACB+

v 3.13

UNI (B) - GR - Polona Ivančič

Dipl. nal.: Projektiranje nosilcev z odprtinami - Primarni strešni nosilec (IPE 450)

Section properties of the chord in relation with the angle

All openings - $a_0 = 480,8 \text{ mm}$								
ϕ (°)	h (mm)	A (cm ²)	A _v (cm ²)	Z _G (mm)	I _v (cm ⁴)	A _m /V (m ⁻¹)	Z _{ANP} (mm)	W _{pl} (cm ³)
0	84,6	36,21	12,23	69,00	127,59	146,7	75,08	39,29
1	84,7	36,22	12,23	69,04	127,81	146,7	75,13	39,33
2	84,8	36,25	12,25	69,16	128,48	146,7	75,27	39,44
3	85,1	36,29	12,27	69,37	129,60	146,6	75,51	39,63
4	85,4	36,35	12,31	69,65	131,18	146,6	75,84	39,90
5	85,9	36,43	12,35	70,02	133,24	146,5	76,27	40,24
6	86,4	36,53	12,41	70,47	135,79	146,4	76,79	40,66
7	87,1	36,64	12,47	71,00	138,85	146,3	77,41	41,16
8	87,8	36,77	12,55	71,62	142,46	146,2	78,13	41,75
9	88,7	36,92	12,64	72,32	146,63	146,1	78,95	42,43
10	89,6	37,09	12,73	73,10	151,43	145,9	79,87	43,19
11	90,7	37,28	12,84	73,98	156,87	145,8	80,89	44,06
12	91,9	37,49	12,96	74,93	163,02	145,6	82,01	45,02
13	93,2	37,71	13,09	75,98	169,92	145,4	83,24	46,08
14	94,6	37,96	13,23	77,12	177,65	145,2	84,58	47,25
15	96,1	38,22	13,39	78,35	186,27	145,0	86,02	48,54
16	97,7	38,51	13,55	79,67	195,86	144,7	87,58	49,96
17	99,5	38,81	13,73	81,09	206,53	144,5	89,25	51,50
18	101,3	39,14	13,92	82,60	218,36	144,3	91,04	53,18
19	103,3	39,49	14,12	84,22	231,47	144,0	92,95	55,01
20	105,5	39,87	14,34	85,93	246,00	143,7	94,98	57,00
21	107,7	40,26	14,57	87,75	262,08	143,4	97,14	59,16
22	110,1	40,68	14,81	89,67	279,89	143,1	99,43	61,49
23	112,7	41,13	15,07	91,70	299,60	142,8	101,86	64,03
24	115,4	41,60	15,34	93,85	321,42	142,5	104,42	66,77
25	118,2	42,10	15,63	96,11	345,59	142,1	107,13	69,73
26	121,2	42,62	15,93	98,49	372,35	141,8	109,99	72,94
27	124,4	43,18	16,25	100,99	402,02	141,4	113,01	76,41
28	127,7	43,76	16,59	103,63	434,90	141,1	116,18	80,16
29	131,2	44,37	16,95	106,39	471,39	140,7	119,53	84,21
30	134,9	45,02	17,32	109,29	511,89	140,3	123,05	88,60
31	138,8	45,70	17,71	112,33	556,89	139,9	126,74	93,34
32	142,8	46,41	18,13	115,52	606,92	139,5	130,63	98,47
33	147,1	47,16	18,56	118,87	662,59	139,1	134,72	104,0
34	151,6	47,95	19,02	122,38	724,59	138,7	139,02	110,0
35	156,4	48,78	19,50	126,05	793,71	138,3	143,53	116,6
36	161,3	49,65	20,00	129,91	870,85	137,9	148,27	123,6
37	166,6	50,57	20,53	133,95	957,02	137,5	153,25	131,3
38	172,0	51,53	21,09	138,18	1053,40	137,0	158,49	139,6
39	177,8	52,54	21,67	142,61	1161,31	136,6	163,99	148,6
40	183,9	53,60	22,28	147,27	1282,29	136,1	169,77	158,4
41	190,2	54,71	22,93	152,15	1418,10	135,7	175,85	169,1
42	196,9	55,89	23,61	157,27	1570,76	135,2	182,24	180,7
43	204,0	57,12	24,32	162,64	1742,61	134,8	188,96	193,3

03/09/2017

Software use conditions apply

10 / 26



UNI (B) - GR - Polona Ivančič

Dipl. nal.: Projektiranje nosilcev z odprtini - Primarni strešni nosilec (IPE 450)

INTERNAL FORCES AND MOMENTS

Under elementary load cases

Permanent loads (G)

Reactions at supports :

Left end : $R_{Av} = 42,85 \text{ kN}$

Right end : $R_{Bv} = 42,85 \text{ kN}$

Maximum moment :

$M_{Max} = 160,7 \text{ kNm}$ in section no 25

Maximum shear force :

$V_{Max} = 42,85 \text{ kN}$ in section no 49

	x (m)	M (kNm)	V_L (kN)	V_R (kN)	N_L (kN)	N_R (kN)
1	0,000	0,0	-	-42,85	-	0,0
2	0,313	13,1	-41,06	-41,06	0,0	0,0
3	0,625	25,7	-39,28	-39,28	0,0	0,0
4	0,938	37,7	-37,49	-37,49	0,0	0,0
5	1,250	49,1	-35,71	-35,71	0,0	0,0
6	1,563	60,0	-33,92	-33,92	0,0	0,0
7	1,875	70,3	-32,14	-32,14	0,0	0,0
8	2,188	80,1	-30,35	-30,35	0,0	0,0
9	2,500	89,3	-28,57	-28,57	0,0	0,0
10	2,813	97,9	-26,78	-26,78	0,0	0,0
11	3,125	106,0	-24,99	-24,99	0,0	0,0
12	3,438	113,5	-23,21	-23,21	0,0	0,0
13	3,750	120,5	-21,42	-21,42	0,0	0,0
14	4,063	126,9	-19,64	-19,64	0,0	0,0
15	4,375	132,8	-17,85	-17,85	0,0	0,0
16	4,688	138,1	-16,07	-16,07	0,0	0,0
17	5,000	142,8	-14,28	-14,28	0,0	0,0
18	5,313	147,0	-12,50	-12,50	0,0	0,0
19	5,625	150,6	-10,71	-10,71	0,0	0,0
20	5,938	153,7	-8,93	-8,93	0,0	0,0
21	6,250	156,2	-7,14	-7,14	0,0	0,0
22	6,563	158,2	-5,36	-5,36	0,0	0,0
23	6,875	159,6	-3,57	-3,57	0,0	0,0
24	7,188	160,4	-1,79	-1,79	0,0	0,0
25	7,500	160,7	0,00	0,00	0,0	0,0
26	7,813	160,4	1,79	1,79	0,0	0,0
27	8,125	159,6	3,57	3,57	0,0	0,0
28	8,438	158,2	5,36	5,36	0,0	0,0
29	8,750	156,2	7,14	7,14	0,0	0,0

ACB+ v 3.13		UNI (B) - GR - Polona Ivančič				
		Dipl. nal.: Projektiranje nosilcev z odprtinami - Primarni strešni nosilec (IPE 450)				
	x (m)	M (kNm)	V _L (kN)	V _R (kN)	N _L (kN)	N _R (kN)
30	9,063	153,7	8,93	8,93	0,0	0,0
31	9,375	150,6	10,71	10,71	0,0	0,0
32	9,688	147,0	12,50	12,50	0,0	0,0
33	10,000	142,8	14,28	14,28	0,0	0,0
34	10,313	138,1	16,07	16,07	0,0	0,0
35	10,625	132,8	17,85	17,85	0,0	0,0
36	10,938	126,9	19,64	19,64	0,0	0,0
37	11,250	120,5	21,42	21,42	0,0	0,0
38	11,563	113,5	23,21	23,21	0,0	0,0
39	11,875	106,0	24,99	24,99	0,0	0,0
40	12,188	97,9	26,78	26,78	0,0	0,0
41	12,500	89,3	28,57	28,57	0,0	0,0
42	12,813	80,1	30,35	30,35	0,0	0,0
43	13,125	70,3	32,14	32,14	0,0	0,0
44	13,438	60,0	33,92	33,92	0,0	0,0
45	13,750	49,1	35,71	35,71	0,0	0,0
46	14,063	37,7	37,49	37,49	0,0	0,0
47	14,375	25,7	39,28	39,28	0,0	0,0
48	14,688	13,1	41,06	41,06	0,0	0,0
49	15,000	0,0	42,85	-	0,0	-



UNI (B) - GR - Polona Ivančič

Dipl. nal.: Projektiranje nosilcev z odprtini - Primarni strešni nosilec (IPE 450)

Koristna obtežba (Q)

Reactions at supports :

Left end : $R_{Av} = 53,40 \text{ kN}$
Right end : $R_{Bv} = 53,40 \text{ kN}$

Maximum moment :

$M_{Max} = 200,3 \text{ kNm}$ in section no 25

Maximum shear force :

$V_{Max} = -53,40 \text{ kN}$ in section no 1

	x (m)	M (kNm)	V_L (kN)	V_R (kN)	N_L (kN)	N_R (kN)
1	0,000	0,0	-	-53,40	-	0,0
2	0,313	16,3	-51,18	-51,18	0,0	0,0
3	0,625	32,0	-48,95	-48,95	0,0	0,0
4	0,938	46,9	-46,73	-46,73	0,0	0,0
5	1,250	61,2	-44,50	-44,50	0,0	0,0
6	1,563	74,7	-42,28	-42,28	0,0	0,0
7	1,875	87,6	-40,05	-40,05	0,0	0,0
8	2,188	99,8	-37,83	-37,83	0,0	0,0
9	2,500	111,3	-35,60	-35,60	0,0	0,0
10	2,813	122,0	-33,38	-33,38	0,0	0,0
11	3,125	132,1	-31,15	-31,15	0,0	0,0
12	3,438	141,5	-28,93	-28,93	0,0	0,0
13	3,750	150,2	-26,70	-26,70	0,0	0,0
14	4,063	158,2	-24,48	-24,48	0,0	0,0
15	4,375	165,5	-22,25	-22,25	0,0	0,0
16	4,688	172,1	-20,03	-20,03	0,0	0,0
17	5,000	178,0	-17,80	-17,80	0,0	0,0
18	5,313	183,2	-15,58	-15,58	0,0	0,0
19	5,625	187,7	-13,35	-13,35	0,0	0,0
20	5,938	191,6	-11,13	-11,13	0,0	0,0
21	6,250	194,7	-8,90	-8,90	0,0	0,0
22	6,563	197,1	-6,68	-6,68	0,0	0,0
23	6,875	198,9	-4,45	-4,45	0,0	0,0
24	7,188	199,9	-2,23	-2,23	0,0	0,0
25	7,500	200,3	0,00	0,00	0,0	0,0
26	7,813	199,9	2,23	2,23	0,0	0,0
27	8,125	198,9	4,45	4,45	0,0	0,0
28	8,438	197,1	6,68	6,68	0,0	0,0
29	8,750	194,7	8,90	8,90	0,0	0,0
30	9,063	191,6	11,13	11,13	0,0	0,0
31	9,375	187,7	13,35	13,35	0,0	0,0
32	9,688	183,2	15,58	15,58	0,0	0,0
33	10,000	178,0	17,80	17,80	0,0	0,0

	x (m)	M (kNm)	V _L (kN)	V _R (kN)	N _L (kN)	N _R (kN)
34	10,313	172,1	20,03	20,03	0,0	0,0
35	10,625	165,5	22,25	22,25	0,0	0,0
36	10,938	158,2	24,48	24,48	0,0	0,0
37	11,250	150,2	26,70	26,70	0,0	0,0
38	11,563	141,5	28,93	28,93	0,0	0,0
39	11,875	132,1	31,15	31,15	0,0	0,0
40	12,188	122,0	33,38	33,38	0,0	0,0
41	12,500	111,3	35,60	35,60	0,0	0,0
42	12,813	99,8	37,83	37,83	0,0	0,0
43	13,125	87,6	40,05	40,05	0,0	0,0
44	13,438	74,7	42,28	42,28	0,0	0,0
45	13,750	61,2	44,50	44,50	0,0	0,0
46	14,063	46,9	46,73	46,73	0,0	0,0
47	14,375	32,0	48,95	48,95	0,0	0,0
48	14,688	16,3	51,18	51,18	0,0	0,0
49	15,000	0,0	53,40	-	0,0	-

Under ULS Combinations

$$U5 = 1,35 G + 1,50 Q$$

Reactions at supports :

Left end : $R_{Av} = 137,94 \text{ kN}$

Right end : $R_{BV} = 137,94 \text{ kN}$

Maximum moment :

$M_{Max} = 517,3 \text{ kNm}$ in section no 25

Maximum shear force :

$V_{Max} = 137,9 \text{ kN}$ in section no 49

	x (m)	M (kNm)	V _L (kN)	V _R (kN)	N _L (kN)	N _R (kN)
1	0,000	0,0	-	-137,9	-	0,0
2	0,313	42,2	-132,2	-132,2	0,0	0,0
3	0,625	82,6	-126,4	-126,4	0,0	0,0
4	0,938	121,2	-120,7	-120,7	0,0	0,0
5	1,250	158,1	-115,0	-115,0	0,0	0,0
6	1,563	193,1	-109,2	-109,2	0,0	0,0
7	1,875	226,3	-103,5	-103,5	0,0	0,0
8	2,188	257,7	-97,7	-97,7	0,0	0,0
9	2,500	287,4	-92,0	-92,0	0,0	0,0
10	2,813	315,2	-86,2	-86,2	0,0	0,0
11	3,125	341,3	-80,5	-80,5	0,0	0,0
12	3,438	365,5	-74,7	-74,7	0,0	0,0
13	3,750	388,0	-69,0	-69,0	0,0	0,0



UNI (B) - GR - Polona Ivančič

Dipl. nal.: Projektiranje nosilcev z odprtinami - Primarni strešni nosilec (IPE 450)

	x (m)	M (kNm)	V _L (kN)	V _R (kN)	N _L (kN)	N _R (kN)
14	4,063	408,6	-63,2	-63,2	0,0	0,0
15	4,375	427,5	-57,5	-57,5	0,0	0,0
16	4,688	444,5	-51,7	-51,7	0,0	0,0
17	5,000	459,8	-46,0	-46,0	0,0	0,0
18	5,313	473,3	-40,2	-40,2	0,0	0,0
19	5,625	485,0	-34,5	-34,5	0,0	0,0
20	5,938	494,8	-28,7	-28,7	0,0	0,0
21	6,250	502,9	-23,0	-23,0	0,0	0,0
22	6,563	509,2	-17,2	-17,2	0,0	0,0
23	6,875	513,7	-11,5	-11,5	0,0	0,0
24	7,188	516,4	-5,7	-5,7	0,0	0,0
25	7,500	517,3	0,0	0,0	0,0	0,0
26	7,813	516,4	5,7	5,7	0,0	0,0
27	8,125	513,7	11,5	11,5	0,0	0,0
28	8,438	509,2	17,2	17,2	0,0	0,0
29	8,750	502,9	23,0	23,0	0,0	0,0
30	9,063	494,8	28,7	28,7	0,0	0,0
31	9,375	485,0	34,5	34,5	0,0	0,0
32	9,688	473,3	40,2	40,2	0,0	0,0
33	10,000	459,8	46,0	46,0	0,0	0,0
34	10,313	444,5	51,7	51,7	0,0	0,0
35	10,625	427,5	57,5	57,5	0,0	0,0
36	10,938	408,6	63,2	63,2	0,0	0,0
37	11,250	388,0	69,0	69,0	0,0	0,0
38	11,563	365,5	74,7	74,7	0,0	0,0
39	11,875	341,3	80,5	80,5	0,0	0,0
40	12,188	315,2	86,2	86,2	0,0	0,0
41	12,500	287,4	92,0	92,0	0,0	0,0
42	12,813	257,7	97,7	97,7	0,0	0,0
43	13,125	226,3	103,5	103,5	0,0	0,0
44	13,438	193,1	109,2	109,2	0,0	0,0
45	13,750	158,1	115,0	115,0	0,0	0,0
46	14,063	121,2	120,7	120,7	0,0	0,0
47	14,375	82,6	126,4	126,4	0,0	0,0
48	14,688	42,2	132,2	132,2	0,0	0,0
49	15,000	0,0	137,9	-	0,0	-

Open.	Sect.	N _{m,top} (kN)	N _{m,bot} (kN)	V _{m,top} (kN)	V _{m,bot} (kN)

ACB+ v 3.13		UNI (B) - GR - Polona Ivančič			
		Dipl. nal.: Projektiranje nosilcev z odprtinami - Primarni strešni nosilec (IPE 450)			
Open.	Sect.	N _{m,top} (kN)	N _{m,bot} (kN)	V _{m,top} (kN)	V _{m,bot} (kN)
1	2	Infilled opening			
2	4	195,938	-195,938	-60,351	-60,351
3	6	312,049	-312,049	-54,603	-54,603
4	8	416,550	-416,550	-48,855	-48,855
5	10	509,439	-509,439	-43,108	-43,108
6	12	590,717	-590,717	-37,360	-37,360
7	14	660,384	-660,384	-31,612	-31,612
8	16	718,439	-718,439	-25,865	-25,865
9	18	764,884	-764,884	-20,117	-20,117
10	20	799,717	-799,717	-14,369	-14,369
11	22	822,939	-822,939	-8,622	-8,622
12	24	834,551	-834,551	-2,874	-2,874
13	26	834,551	-834,551	2,874	2,874
14	28	822,939	-822,939	8,622	8,622
15	30	799,717	-799,717	14,369	14,369
16	32	764,884	-764,884	20,117	20,117
17	34	718,439	-718,439	25,865	25,865
18	36	660,384	-660,384	31,612	31,612
19	38	590,717	-590,717	37,360	37,360
20	40	509,439	-509,439	43,108	43,108
21	42	416,550	-416,550	48,855	48,855
22	44	312,049	-312,049	54,603	54,603
23	46	195,938	-195,938	60,351	60,351
24	48	Infilled opening			

ACB+ v 3.13	UNI (B) - GR - Polona Ivančič Dipl. nal.: Projektiranje nosilcev z odprtini - Primarni strešni nosilec (IPE 450)
ULTIMATE LIMIT STATES (ULS)	
Note: the calculation method applies to steel rolled profiles only.	
Summary of the criteria	
S = Satisfactory NS = Not satisfactory	
Checkings of net sections at openings	
Resistance to bending moment (Open. no 2 - Comb. U5) :	$\Gamma_{M,max}$ = 0,383 < 1 S
Resistance to normal force (Open. no 12 - Comb. U5) :	$\Gamma_{N,max}$ = 0,649 < 1 S
Resistance to shear force (Open. no 14 - Comb. U5) :	$\Gamma_{V,max}$ = 0,496 < 1 S
Resistance to M+N interaction (Open. no 9 - Comb. U5) :	$\Gamma_{MN,max}$ = 0,718 < 1 S
Resistance to N+V interaction (Open. no 12 - Comb. U5) :	$\Gamma_{NV,max}$ = 0,649 < 1 S
Resistance to M+V interaction (Open. no 2 - Comb. U5) :	$\Gamma_{MV,max}$ = 0,383 < 1 S
Resistance to M+N+V interaction (Open. no 9 - Comb. U5) :	$\Gamma_{MNV,max}$ = 0,718 < 1 S
Web checkings	
Shear buckling check required (Cell 24 - Comb. U5) :	$\Gamma_{Vbw,max}$ = 0,125 < 1 S
Posts checkings	
Resistance to shear (Post no 2 - Comb. U5) :	$\Gamma_{Vh,max}$ = 0,418 < 1 S
Resistance to buckling (Post no 2 - Comb. U5) :	$\Gamma_{b,max}$ = 0,553 < 1 S
Minimum throat thickness (Post no 2 - Comb. U5) :	a_{min} = 1,67 mm
Warning: the throat thickness is assessed by assuming two welds	
The total thickness of welds should be at least 3,34 mm	
Warning : the throat thickness of the fillet weld must be at least 3 mm (EC3)	
Gross sections checkings	
Resistance to bending (Post no 12 - Comb. U5) :	$\Gamma_{Mg,max}$ = 0,523 (Classe 2) < 1 S
Resistance to shear (Right end - Comb. U5) :	$\Gamma_{Vg,max}$ = 0,097 < 1 S
Other checkings	
Resistance to lateral torsional buckling	$\Gamma_{LT,max}$ = 0,995 < 1 S

03/09/2017

Software use conditions apply

17 / 27



UNI (B) - GR - Polona Ivančič

Dipl. nal.: Projektiranje nosilcev z odprtinami - Primarni strešni nosilec (IPE 450)

Open.	Chord	Class	Γ_N	Γ_V	Γ_M	Γ_{NV}	Γ_{MN}	Γ_{MV}	Γ_{MNV}
18	Top	2	0,514 (-1°)	0,444 (36°)	0,314 (31°)	0,514 (-1°)	0,696 (22°)	0,314 (31°)	0,696 (22°)
	Bot	1	0,514 (1°)	0,444 (-36°)	0,314 (-31°)	0,514 (1°)	0,696 (-22°)	0,314 (-31°)	0,696 (-22°)
19	Top	2	0,460 (-1°)	0,416 (34°)	0,331 (30°)	0,460 (-1°)	0,672 (22°)	0,331 (30°)	0,672 (22°)
	Bot	1	0,460 (1°)	0,416 (-34°)	0,331 (-30°)	0,460 (1°)	0,672 (-22°)	0,331 (-30°)	0,672 (-22°)
20	Top	2	0,397 (-2°)	0,382 (32°)	0,346 (29°)	0,397 (-2°)	0,639 (23°)	0,346 (29°)	0,639 (23°)
	Bot	1	0,397 (2°)	0,382 (-32°)	0,346 (-29°)	0,397 (2°)	0,639 (-23°)	0,346 (-29°)	0,639 (-23°)
21	Top	2	0,325 (-3°)	0,345 (29°)	0,360 (28°)	0,325 (-3°)	0,596 (23°)	0,360 (28°)	0,596 (23°)
	Bot	1	0,325 (3°)	0,345 (-29°)	0,360 (-28°)	0,325 (3°)	0,596 (-23°)	0,360 (-28°)	0,596 (-23°)
22	Top	2	0,244 (-4°)	0,307 (24°)	0,372 (27°)	0,244 (-4°)	0,545 (23°)	0,372 (27°)	0,545 (23°)
	Bot	1	0,244 (4°)	0,307 (-24°)	0,372 (-27°)	0,244 (4°)	0,545 (-23°)	0,372 (-27°)	0,545 (-23°)
23	Top	2	0,155 (-7°)	0,277 (16°)	0,383 (26°)	0,155 (-7°)	0,484 (24°)	0,383 (26°)	0,484 (24°)
	Bot	1	0,155 (7°)	0,277 (-16°)	0,383 (-26°)	0,155 (7°)	0,484 (-24°)	0,383 (-26°)	0,484 (-24°)
24	Infilled opening - Checked as a gross section								

Verifications in the post sections

Post	Γ_{vh}	Γ_b
1	0,00	0,00
2	0,42	0,55
3	0,38	0,49
4	0,33	0,42
5	0,29	0,36
6	0,25	0,30
7	0,21	0,24
8	0,17	0,19
9	0,13	0,15
10	0,08	0,16
11	0,04	0,12
12	0,00	0,00
13	0,04	0,12
14	0,08	0,16
15	0,13	0,15
16	0,17	0,19
17	0,21	0,24
18	0,25	0,30
19	0,29	0,36
20	0,33	0,42
21	0,38	0,49
22	0,42	0,55

ACB+ v 3.13	UNI (B) - GR - Polona Ivančič Dipl. nal.: Projektiranje nosilcev z odprtinami - Primarni strešni nosilec (IPE 450)							
<table> <tr> <th>Post</th><th>Γ_{vh}</th><th>Γ_b</th></tr> <tr> <td>23</td><td>0,00</td><td>0,00</td></tr> </table>	Post	Γ_{vh}	Γ_b	23	0,00	0,00		
Post	Γ_{vh}	Γ_b						
23	0,00	0,00						
Detailed checkings								
Net section at opening no 2 - Resistance to bending moment								
Combination U5								
Bending moment	$M_{Ed} = 121,2 \text{ kNm}$							
Shear forces	$V_{Ed,l} = -120,7 \text{ kN}$	$V_{Ed,r} = -120,7 \text{ kN}$						
Axial forces	$N_{Ed,l} = 0,0 \text{ kN}$	$N_{Ed,r} = 0,0 \text{ kN}$						
Axial forces in chord	$N_{m,sup,l} = 195,9 \text{ kN}$	$N_{m,sup,r} = 195,9 \text{ kN}$						
	$N_{m,inf,l} = -195,9 \text{ kN}$	$N_{m,inf,r} = -195,9 \text{ kN}$						
Shear forces in chord	$V_{m,sup,l} = -60,35 \text{ kN}$	$V_{m,sup,r} = -60,35 \text{ kN}$						
	$V_{m,inf,l} = -60,35 \text{ kN}$	$V_{m,inf,r} = -60,35 \text{ kN}$						
Angle	$\phi = -26,0$							
Partial factor	$\gamma_{M0} = 1,00$							
Yield strengths	$f_{y,top} = 355 \text{ MPa}$	$f_{y,bot} = 355 \text{ MPa}$						
Top chord								
Inclined Tee section	$h_u = 121 \text{ mm}$							
	$A_u = 4262 \text{ mm}^2$	$A_{vu} = 1593 \text{ mm}^2$						
Projected forces	$N_u = 149,7 \text{ kN}$	$V_u = -86,35 \text{ kN}$						
	$M_u = 9,907 \text{ kNm}$							
Class of the chord	Class 2							
Bending resistant moment	$M_{c,Rd,u} = 25,89 \text{ kNm}$							
Criterion	$\Gamma_M = 0,383$							
Net section at opening no 12 - Resistance to normal force								
Combination U5								
Bending moment	$M_{Ed} = 516,4 \text{ kNm}$							
Shear forces	$V_{Ed,l} = -5,748 \text{ kN}$	$V_{Ed,r} = -5,748 \text{ kN}$						
Axial forces	$N_{Ed,l} = 0,0 \text{ kN}$	$N_{Ed,r} = 0,0 \text{ kN}$						
Axial forces in chord	$N_{m,sup,l} = 834,6 \text{ kN}$	$N_{m,sup,r} = 834,6 \text{ kN}$						
	$N_{m,inf,l} = -834,6 \text{ kN}$	$N_{m,inf,r} = -834,6 \text{ kN}$						
Shear forces in chord	$V_{m,sup,l} = -2,874 \text{ kN}$	$V_{m,sup,r} = -2,874 \text{ kN}$						
	$V_{m,inf,l} = -2,874 \text{ kN}$	$V_{m,inf,r} = -2,874 \text{ kN}$						
Angle	$\phi = 0,0$							
Partial factor	$\gamma_{M0} = 1,00$							
Yield strengths	$f_{y,top} = 355 \text{ MPa}$	$f_{y,bot} = 355 \text{ MPa}$						
Top chord								
Inclined Tee section	$h_u = 84,6 \text{ mm}$							
	$A_u = 3621 \text{ mm}^2$	$A_{vu} = 1223 \text{ mm}^2$						
Projected forces	$N_u = 834,6 \text{ kN}$	$V_u = -2,874 \text{ kN}$						
	$M_u = 0,0 \text{ kNm}$							
Class of the chord	Class 2							
Normal resistant force	$N_{c,Rd,u} = 1286 \text{ kN}$							
Criterion	$\Gamma_N = 0,649$							
03/09/2017	Software use conditions apply	20 / 26						

 v 3.13		UNI (B) - GR - Polona Ivančič	
		Dipl. nal.: Projektiranje nosilcev z odprtini - Primarni strešni nosilec (IPE 450)	
Shear force	V_{Ed}	=	132,20 kN
Shear buckling resistance	$V_{bw,Rd}$	=	1056,66 kN
Check	Γ_{Vbw}	=	0,125
Shear resistance of Web post no 2			
Combination U5			
Tee geometrical centres	d_G	=	618,8 mm
Bending moments	$M_{Ed,l}$	=	121,2 kNm
Axial forces in tees	$N_{m,Sup,l}$	=	195,9 kN
	$N_{m,Sup,r}$	=	312,0 kN
Horizontal shear force in post	V_{hm}	=	116,1 kN
Post width	w	=	144,2 mm
Resistant shear forces	$V_{hRd,top}$	=	277,88 kN
Checkings	$\Gamma_{Vh,top}$	=	0,418
		$V_{hRd,bot}$	= 277,88 kN
		$\Gamma_{Vh,bot}$	= 0,418
Stability of Web post no 2			
Combination U5			
Diameter	a_0	=	480,8 mm
Cells spacing	e	=	625,0 mm
Height of cross section	H_t	=	650,0 mm
Heights of chords	$h_{m,top}$	=	325,0 mm
Heights of tees	$h_{Te,top}$	=	84,6 mm
Tees geometrical centres	$d_{G,top}$	=	309,4 mm
$d_G = d_{G,top} + d_{G,bot}$	d_G	=	618,8 mm
Area of tees	$A_{0,top}$	=	3621,4 mm ²
Shear area of tees	$A_{V0,top}$	=	1222,6 mm ²
		$A_{0,bot}$	= 3621,4 mm ²
		$A_{V0,bot}$	= 1222,6 mm ²
Yield strengths	$f_{y,top}$	=	355 MPa
		$f_{y,bot}$	= 355 MPa
Shear forces	$V_{Ed,l}$	=	120,70 kN
Moments	$M_{Ed,l}$	=	121,24 kNm
Shear parameters	η	=	0,314
		$V_{Ed,r}$	= 109,21 kN
		$M_{Ed,r}$	= 193,09 kNm
		k_{Av}	= 0,500
Normal forces in chords	$N_{m,ltop}$	=	195,94 kN
	$N_{m,rtop}$	=	312,05 kN
Shear forces in chords	$V_{m,ltop}$	=	60,35 kN
	$V_{m,rtop}$	=	54,60 kN
Forces in the post	V_{hm}	=	116,11 kN
Critical section	d_w	=	101,5 mm
Moments in the critical section	$M_{cEd,top}$	=	11,79 kNm
Principal stresses	$\sigma_{w,top}$	=	256 MPa
		$N_{m,lbot}$	= -195,94 kN
		$N_{m,rbot}$	= -312,05 kN
		$V_{m,lbot}$	= 60,35 kN
		$V_{m,rbot}$	= 54,60 kN
		M_{hm}	= 0,00 kNm
		L_w	= 189,2 mm
		$M_{cEd,bot}$	= 11,79 kNm
		$\sigma_{w,bot}$	= 256 MPa
Critical forces	$V_{hCr,top}$	=	461,52 kN
	$N_{mCr,top}$	=	1760,14 kN
Critical coefficients	$\beta_{Cr,top}$	=	3,602
	$\alpha_{Cr,top}$	=	3,875
Critical stresses	$\sigma_{Cr,top}$	=	991,1 MPa
		$V_{hCr,bot}$	= 461,52 kN
		$N_{mCr,bot}$	= 1760,14 kN
		$\beta_{Cr,bot}$	= 4,192
		$\alpha_{Cr,bot}$	= 4,192
		$\sigma_{Cr,bot}$	= 1072 MPa
Reduced slendernesses	λ_{top}	=	0,734
With	ξ	=	1,502
Reduction factors	χ_{top}	=	0,831
Resistant stresses	$\sigma_{wRd,top}$	=	443 MPa
Plastic moments of tees	$M_{plRd,Te,top}$	=	13,95 kNm
Psi factor	ψ_{top}	=	0,370
Post-buckling factor	κ_{top}	=	1,044
Checkings	$\Gamma_{b,top}$	=	0,553
		λ_{bot}	= 0,705
		χ_{bot}	= 0,845
		$\sigma_{wRd,bot}$	= 451 MPa
		$M_{plRd,Te,bot}$	= 13,95 kNm
		ψ_{bot}	= 0,370
		κ_{bot}	= 1,044
		$\Gamma_{b,bot}$	= 0,544

 v 3.13	UNI (B) - GR - Polona Ivančič Dipl. nal.: Projektiranje nosilcev z odprtini - Primarni strešni nosilec (IPE 450)
<u>WARNING!</u> <i>This software facilitates the preliminary engineering studies with respect to steel constructions. Based on calculation methods complying with the principles of the applied standards, this software enables to make a certain number of verifications in view of evaluating a solution for a pre-design. It does not enable to analyse all situations and to make in an exhaustive way all relevant calculations needed for a study of execution which requires in every case the advice of an external Engineering Office.</i> <i>Given the complexity of the calculation methods, this software is only intended for professional users active in the sector of steel constructions (who are fully aware of the possibilities, limits and its adequacy thereof for specific practical cases). The users shall use the software under his own responsibility and at his own risks.</i> <i>This software may be used free of charge. No right is granted to the user of the software, the property and intellectual rights of which continue to belong exclusively to ArcelorMittal Commercial Sections S.A. (or, depending on the case, to the company of the ArcelorMittal Group who is owner of these rights.) No warranty is granted to the user. ArcelorMittal Commercial Sections S.A. and/or any other subsidiaries of the ArcelorMittal Group cannot be held liable for any loss or damage directly and/or indirectly sustained as a result of the use of the software. The user undertakes to hold ArcelorMittal Commercial Sections S.A. free and harmless from any claim and any direct, indirect and/or consequential damages, in particular those resulting from an incorrect or inappropriate use or a use made for an inadequate or inappropriate purpose of the software.</i> <i>All the preliminary design notes done by ARCELORMITTAL and/or by any other subsidiaries of the ARCELORMITTAL group are based on the information received from the Customer. These preliminary design notes are given for guidance only. As such, they do not commit our company and/or any other subsidiary of the ARCELORMITTAL group to the achievement of a result expected by the Customer and/or any third person. These preliminary design notes cannot replace all the design notes which shall be done by an external engineering office chosen by the Customer. ARCELORMITTAL and/or any other subsidiary of the ARCELORMITTAL group cannot be held liable for any loss or damage, directly or indirectly sustained as a result of the use of the preliminary design notes done by ARCELORMITTAL and/or by any other subsidiaries of the ARCELORMITTAL group, whatever the origin of the damage.</i>	
03/09/2017	Software use conditions apply 26 / 26