

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Ilovar, N., 2014. Možne izvedbe polnonosilnih spojev. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Korelc, J., somentor Može, P.): 37 str.

Datum arhiviranja: 21-07-2014

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Ilovar, N., 2014. Možne izvedbe polnonosilnih spojev. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Korelc, J., co-supervisor Može, P.): 37 pp.

Archiving Date: 21-07-2014

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVO

Kandidatka:

NIKA ILOVAR

MOŽNE IZVEDBE POLNONOSILNIH SPOJEV

Diplomska naloga št.: 107/B-GR

DESIGN OF FULL STRENGTH CONNECTIONS

Graduation thesis No.: 107/B-GR

Mentor:
prof. dr. Jože Korelc

Predsednik komisije:

Somentor:
viš. pred. dr. Primož Može

Ljubljana, 10. 07. 2014

STRAN ZA POPRAVKE

<u>Stran z napako</u>	<u>Vrstica z napako</u>	<u>Namesto</u>	<u>Naj bo</u>
------------------------------	--------------------------------	-----------------------	----------------------

IZJAVE

Podpisana Nika Ilovar izjavljam, da sem avtorica diplomskega dela z naslovom "MOŽNE IZVEDBE POLNO NOSILNIH SPOJEV".

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 10.7. 2014

Nika Ilovar

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM

UDK: 624.014.2(497.4)(043.2)
Avtor: Nika Ilovar
Mentor: prof. dr. Jože Korelc
Sommentor: viš. pred. dr. Primož Može
Naslov: Možne izvedbe polno nosilnih spojev
Tip dokumenta: diplomska naloga - univerzitetni študij
Obseg in oprema: 37 str., 1 pregl., 25 sl.
Ključne besede: polno nosilni spoji, momentni spoji, potresno odporno projektiranje, dimenzioniranje spojev, porušne linije, prednapeti vijaki, plastične deformacije, plastični členek

Izvleček:

V diplomski nalogi analiziram možne izvedbe polno nosilnih spojev. Najprej splošno razložim pojem spoja in njihove delitve. V tretjem poglavju so razložene okoliščine v katerih uporabljamo polno nosilne spoje ter prednosti in slabosti njihove uporabe. Predstavljenih je 6 različnih možnih vrst izvedbe polno nosilnih spojev. Pri posameznih možnostih izvedbe so opisani mehanizmi prenosa obtežbe in predvidena mesta nastanka plastičnih deformacij. Na koncu so podane bistvene predpostavke in zahteve za dimenzioniranje polno nosilnih spojev, v predzadnjem poglavju pa je prikazan postopek izračuna vijačenega spoja s čelno pločevino in ojačitvenim rebrom.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION WITH ABSTRACT

UDC: 624.014.2(497.4)(043.2)
Author: Nika Ilovar
Supervisor: prof. dr. Jože Korelc
Co-advisor: viš. pred. dr. Primož Može
Title: Design of full strength connections
Document type: Graduation Thesis – University studies
Notes: 37 p., 1 tab., 38 fig.
Key words: full strength connections, moment connections, earthquake-resistant design, connection design, yield lines, preloaded bolts, plastic deformations, plastic hinge

Abstract:

Possible implementations of full strength moment connections are analyzed in this thesis. Firstly the concept of connections and their classifications are presented. The third chapter discusses the circumstances in which full strength connections are to be used and also their advantages and disadvantages are shown. Six different implementations of moment connections are presented with the load paths and plastic deformations discussed for each of them. Finally basic assumptions and requirements for full strength connections design are given and in the penultimate chapter a design procedure for bolted stiffened extended end-plate moment connection is shown.

ZAHVALA

Za strokovno pomoč, napotke in nasvete pri izdelavi diplomske naloga bi se rada zahvalila mentorju prof. dr. Jožetu Korelcu in somentorju viš. pred. dr. Primožu Možetu.

Za strokovno izobrazbo in vzbujanje želje po znanju s področja jeklenih konstrukcij iskrena hvala tudi doc. dr. Francu Sinurju in pokojnemu prof. dr. Darku Begu.

Hvala moji družini, ker me je spodbujala in podpirala pri mojem študiju. Hvala staršema, ker sta mi omogočila prosto pot pri mojih izbirah in hvala tebi Katja, ker si moja podpora in moja trdna tla.

Najlepša hvala tebi, Lara, ker lahko nate vedno računam in iskrena hvala tebi Jure G., ker tvoj optimizem ne pozna meja. Hvala obema, ker sta verjela vame takrat ko sama nisem.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE.....	I
IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION WITH ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
1 UVOD	1
2 SPOJI V JEKLENIH KONSTRUKCIJAH.....	2
2.1. Splošno.....	2
2.2. Delitev spojev	2
3 UPORABA POLNO NOSILNIH SPOJEV	5
3.1. Potresno odporno projektiranje jeklenih stavb.....	5
3.2. Načrtovanje nosilnosti – globalni porušni sistem	5
4 MOŽNE IZVEDBE POLNO NOSILNIH SPOJEV	7
4.1. Vijalni spoj z oslabiljenim prerezom prečke.....	7
4.2. Vijalni spoj s čelno pločevino	8
4.3. Vijalni spoj preko pasnic prečke	10
4.4. Varjeni spoj.....	12
4.5. Vijalni spoj s kotniki tipa "Kaiser"	13
4.6. Spoj s škatlastim profilom stebra	14
5 DIMENZIONIRANJE POLNO NOSILNIH SPOJEV	16
5.1. Splošno.....	16
5.2. Dodatna nosilnost spoja.....	16
5.3. Projektne sile v spoju	17
5.4. Kontrole	18
6 RAČUNSKI PRIMER	19
6.1. Opis naloge	19
6.2. Materiali.....	19
6.3. Zvari v spoju	19
6.4. Območje veljavnosti.....	20
6.5. Sile v spoju	20
6.6. Izračun.....	21
7 ZAKLJUČKI IN UGOTOVITVE.....	35
VIRI	37

KAZALO SLIK

Slika 1: Diagram upogibni moment - zasuk; razvrščanje spojev po togosti.....	2
Slika 2: Diagram upogibni moment – zasuk; razvrščanje spojev po nosilnosti	3
Slika 3: Zahtevana nosilnost polno nosilnega spoja: vrh stebra	4
Slika 4: Zahtevana nosilnost polno nosilnega spoja: vmesne etaže	4
Slika 5: Porušni mehanizmi.....	6
Slika 6: Vijačni spoj z oslavljenim prečnim prerezom	7
Slika 7: Vijačni spoj s čelno pločevino	9
Slika 8: Vijačni spoj s priključno pločevino in ojačitvenimi rebri	9
Slika 9: Vijačni spoj preko pasnic prečke	11
Slika 10: Varjeni spoj	12
Slika 11: Vijačni spoj s kotniki	13
Slika 12: Spoji s škatlastim profilom stebra	15
Slika 13: Lokacija razvoja plastičnega členka	16
Slika 14: Plastični členek v prečki	16
Slika 15: Model prečke s plastičnimi členki in sile za analizo.....	17
Slika 16: Izbrani okvir in spoj.....	20
Slika 17: Geometrija obravnavanega spoja.....	21
Slika 18: Razporeditev vijakov - vertikalno	23
Slika 19: Razporeditev vijakov - horizontalno	24
Slika 20: Razporeditev lukenj na stebri	26
Slika 21: Sodelujoča širina stojine v stebri	28
Slika 22: Efektivni prerez v tlačeni coni	30
Slika 23: Strižni prerez stebra	31
Slika 24: Strižna ojačitev stojine stebra.....	32
Slika 25: Prerez strižno ojačanega stebra	33
Slika 26: 3D dispozicija spoja.....	34

Ta stran je namenoma prazna.

1 UVOD

Osnovni statični preračun nosilcev in stebrov v nosilnih jeklenih konstrukcijah danes, zaradi številnih računalniških pripomočkov, ni več tako zahtevno delo, kot je bilo nekoč. Obstaja cela množica programov za statično analizo konstrukcij, ki z vrhunskimi grafičnimi vmesniki poskrbijo za enostavno modeliranje konstrukcije in kasneje prikaz notranjih sil in dejanskih deformacij.

Optimalno projektirane jeklene konstrukcije pa je, po mojem mnenju, odvisno od dobrega projektiranja detajlov. Tu govorim o raznih lokalnih ojačitvah, ki lahko bistveno pripomorejo k zmanjševanju dimenzij uporabljenih profilov in seveda o spojih. Tako kot je končno pomembna pravilna montaža, je pred tem gotovo pomembna tudi natančna izdelava elementov s priključnimi komponentami. Ključna pri celotnem projektu pa je gotovo natančna analiza in projektiranje spojev.

Problem se pokaže predvsem pri zamudnosti pri preračunavanju spojev. Slovenski standard SIST EN 1993-1-8 [1] za projektiranje spojev podaja komponentno metodo po kateri analiziramo in dimenzioniramo vsako komponento spoja posebej. Takšen pristop pa, zaradi kompleksnosti postopka, zahteva ustrezen računalniški program.

V diplomski nalogi so obravnavni polno nosilni momentni spoji. To so spoji v okvirjih, ki morajo zaradi zahteve po prenašanju horizontalnih sil, v spojih prenesti velike momentne obtežbe. Tipizirano vrsto izvedbe momentnega spoja, ki je podrobneje obravnavan, sem izbrala iz ameriških standardov za projektiranje momentnih spojev [2-3]. Tudi postopek izračuna je povzet po teh standardih.

Moja želja ob izbiri naslova diplomske naloge je bila, narediti uporaben zapis projektiranja polno nosilnih spojev. V ta namen so izračuni skladni s slovenskimi standardi in z nacionalnimi dodatki, prav tako sem se trudila, da so zapis, izračuni in skice kar najbolj pregledni in morebitnemu uporabniku prijazni.

2 SPOJI V JEKLENIH KONSTRUKCIJAH

2.1. Splošno

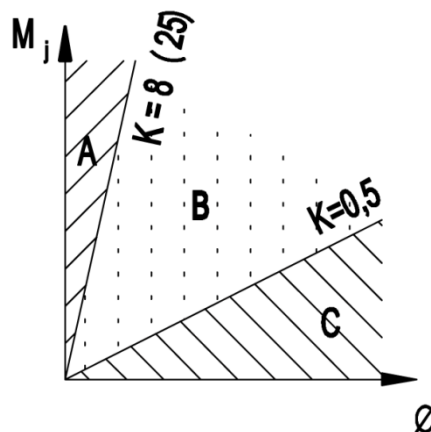
Zelo pomemben konstrukcijski element v jeklenih konstrukcijah so spoji. Spoj je po definiciji mesto, kjer se spajata dva ali več elementov in poenostavljeno predstavlja mesto, kjer se obtežba prenaša iz enega elementa na sosednje elemente. Racionalna zasnova spojev bistveno vpliva na ekonomičnost projekta, saj je od izbire načina izvedbe odvisna cena transporta konstrukcije in hitrost montaže. Prav tako na vrsto uporabljenih spojev vpliva vrsta zaščite konstrukcije pred rjavenjem.

2.2. Delitev spojev

SIST EN 1993-1-8 [1] v točki 5.2. razvršča spoje glede na mehanske lastnosti po togosti in po nosilnosti. Obe delitvi temeljita na diagramu upogibni moment – zasuk.

2.2.1. Delitev po togosti

Spoje glede na rotacijsko togost, ki jo imajo, delimo v tri skupine: togi, delno togi in nominalno členkasti spoji. Kot je razvidno iz slike 1, vrsto spoja glede na togost, določa naklon diagrama upogibni moment – zasuk.



Slika 1: Diagram upogibni moment - zasuk; razvrščanje spojev po togosti

Spoji ki padejo v območje A, so klasificirani kot togi spoji. Ti spoji imajo veliko rotacijsko togost in morajo notranje sile prenesti tako, da lahko upoštevamo kontinuirno vozlišče, ki na globalno analizo ne vpliva. Spodnja meja za to območje je $K = 8$, za okvire s povezji in $K = 25$, za ostale okvire, pri čemer primerjalna togost (K) je definirana kot:

$$K = \frac{EI_p}{l_p}$$

kjer je:

K ... primerjalna togost spoja

E ... elastični modul prečke

I_p ... vztrajnostni moment prečke v momentnem okvirju

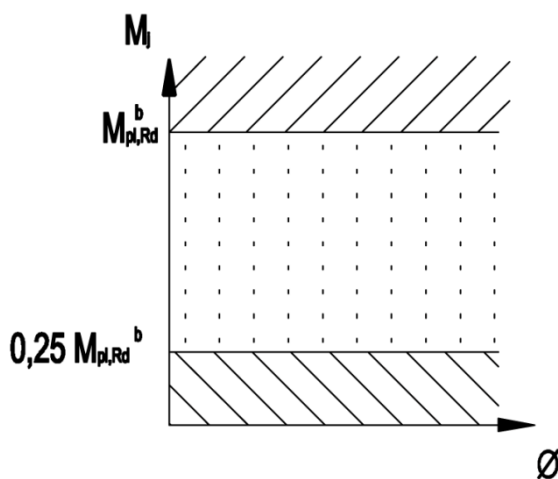
l_p ... dolžina prečke

V analizi lahko kot nominalno členkaste spoje upoštevamo spoje, ki se nahajajo v območju C (Slika 1). Ti spoji morajo zagotoviti prevzem sil, brez da bi se v spoju razvile večje upogibne obremenitve. Kot take upoštevamo spoje, ki so navzgor omejeni s togostjo $K = 0,5$.

Vsi spoji, ki se nahajajo v območju B in jih torej ne moremo razvrstiti kot toge ali nominalno členkaste, so delno togi spoji. Ti spoji prevzemajo notranje sile in omogočajo rotacijo konstrukcije, zato moramo v globalni analizi dosledno upoštevati njihovo nosilnost in rotacijsko kapaciteto, saj se rotacija v spoju izvrši preko plastičnih deformacij. Priporočljivo je, da se deformacije izvršijo v priključni pločevini ali v strižnem panelu stojine stebra, nikakor pa ne v vijakih.

2.2.2. Delitev po nosilnosti

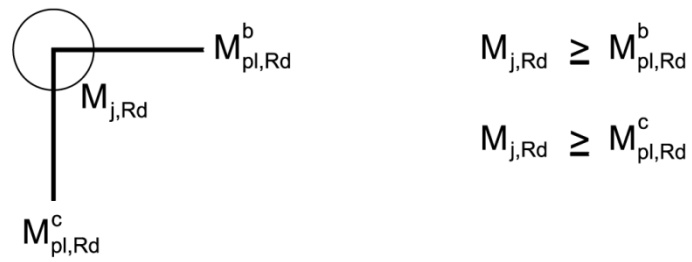
Spoj je, na podlagi primerjave njegove upogibne nosilnosti ($M_{j,Rd}$) in upogibne nosilnosti priključenega elementa ($M_{pl,Rd}^b$), lahko klasificiran kot polno nosilen, delno nosilen ali členkast.



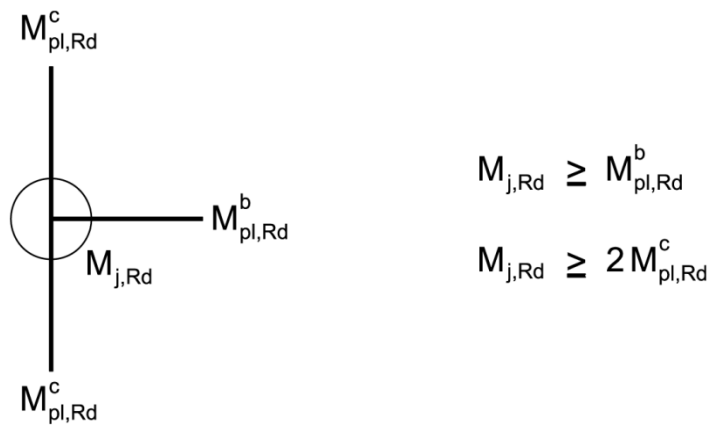
Slika 2: Diagram upogibni moment – zasuk; razvrščanje spojev po nosilnosti

V primerih, ko ima spoj manj kot 25% upogibne nosilnosti priključenega elementa (slika 2), obravnavamo spoj kot členek. Tak spoj mora prenašati notranje sile brez razvoja večjih upogibnih momentov, zato mora posledično prenesti zasuke, ki se pojavijo ob projektni obtežbi.

Za polno nosilne spoje velja, da njihova upogibna nosilnost v nobene primeru ne sme biti manjša od upogibne nosilnosti priključenega elementa. Na vrhu stebra mora biti upogibna nosilnost polno nosilnega spoja ($M_{j,Rd}$) večja od plastične upogibne nosilnosti prečke ($M_{pl,Rd}^b$) in hkrati večja od plastične upogibne nosilnosti stebra ($M_{pl,Rd}^c$). Za vmesne etaže pa zaradi stebra zgoraj in spodaj slednji pogoj preraste v pogoj, da mora biti upogibna nosilnost spoja večja od dvakratnika plastične upogibne nosilnosti stebra (sliki 3 in 4):



Slika 3: Zahtevana nosilnost polno nosilnega spoja: vrh stebra



Slika 4: Zahtevana nosilnost polno nosilnega spoja: vmesne etaže

3 UPORABA POLNO NOSILNIH SPOJEV

Glavna lastnost polno nosilnih spojev je, kot kaže že ime, da imajo zelo veliko nosilnost. Pridevnik "polno" se nanaša na razmerje nosilnosti priključenega elementa in spoja, saj imajo polno nosilni spoji nosilnost najmanj enako nosilnosti priključenega elementa. Zanje velja tudi, da ravno zaradi ogromne nosilnosti ni potrebe po zagotavljanju duktilnosti v spoju.

Polno nosilni momentni spoji so v praksi predvsem zaradi velikega stroška, ki ga predstavljajo, precej nezaželeni. Navadno so ojačani z dodatnimi rebri, zahtevajo polno penetrirane sočelne zveze in prednapete vijake ter potrebujejo izkušene izvajalce na gradbišču. Vse te zahteve postavijo polno nosilne spoje med dražje in zamudnejše dele projekta.

Prednosti takih spojev se kažejo predvsem v njihovem odzivu na potresno obtežbo, zato je tudi njihova aplikacija navadno upravičena le v sklopu potresno odpornega projektiranja. Matematični model, ki nam ga njihova nosilnost omogoča, je namreč povsem v skladu s filozofijo razvoja globalnega porušnega mehanizma (Slika 5), ki sicer dopušča poškodbe na vnaprej predvidenih mestih ob izjemnem potresu, ampak preprečuje, da bi se celotna konstrukcija sesula sama vase ali podrla v eni etaži. Z upoštevanjem omenjenega porušnega sistema, optimalno združimo redke pojave močnih potresov z ohranjanjem človeških življenj v primerih, ko pa do potresa večjih magnitud le pride.

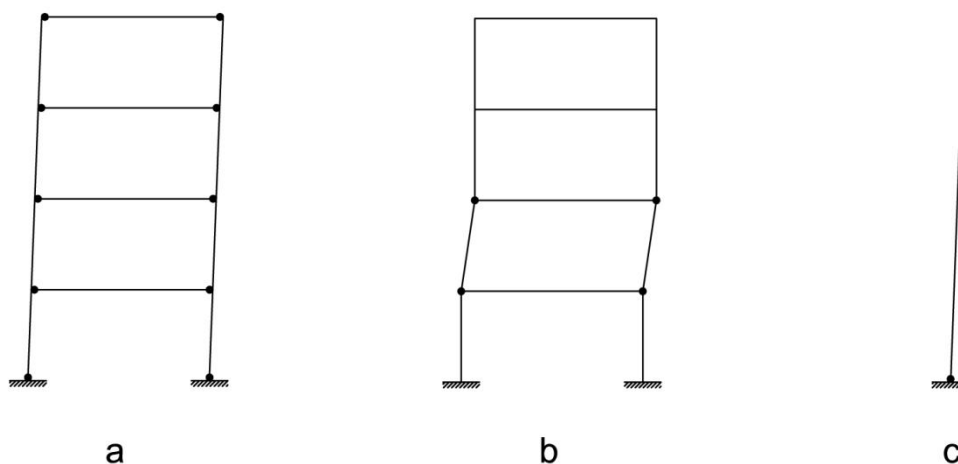
3.1. Potresno odporno projektiranje jeklenih stavb

V 6. poglavju standarda SIST EN 1998-1 [4] najdemo posebna navodila za projektiranje potresno odpornih jeklenih stavb. Vsa navodila pa zgolj dopolnjujejo pravila zbrana v standardu SIST EN 1993-1-8 [1]. V nadaljevanju podajam nekaj osnovnih napotkov potresno odpornega projektiranja, ki konkretno vplivajo na dimenzioniranje in analiziranje spojev:

- Na mestih kjer konstrukcija sipa energijo je potrebno uporabljati mehko konstrukcijsko jeklo. Uporabljen jeklo mora imeti zmerno lomno žilavost, ki zadošča zahtevam za potresne vplive pri navidezno stalnih vrednostih delovne temperature.
- Za vijačne spoje v potresno obremenjenih konstrukcijah se uporabljajo vijaki visoke trdnosti in kakovosti 8.8 ali 10.9.
- Prečni prerezi morajo biti v 1. razredu kompaktnosti (izjemoma lahko tudi v 2. in 3. razredu).

3.2. Načrtovanje nosilnosti – globalni porušni sistem

V primeru potresa želimo, da je konstrukcija sposobna sipanja energije. V ta namen, moramo dopustiti, da določena območja prejmejo več obremenitve kot druga in se zato tudi bolj deformirajo. Predvidevanje in dimenzioniranje teh mest imenujemo načrtovanje nosilnosti (angl. "Capacity design").



Slika 5: Porušni mehanizmi
a) po prečkah, b) po stebrih, c) pri temeljih

Za zagotavljanje ustreznega porušnega mehanizma, prikazanega na sliki 5a), moramo omogočiti razvoj $n + 1$ plastičnih členkov, če je okvir n -krat statično nedoločen. Tako omogočimo nastanek kinematične verige. Zagotoviti moramo tudi, da se plastične deformacije izvršijo najprej v prečkah, kar dosežemo z varovanjem stebrov (zadostna togost stebrov) in s korektno izvedbo polno nosilnih spojev.

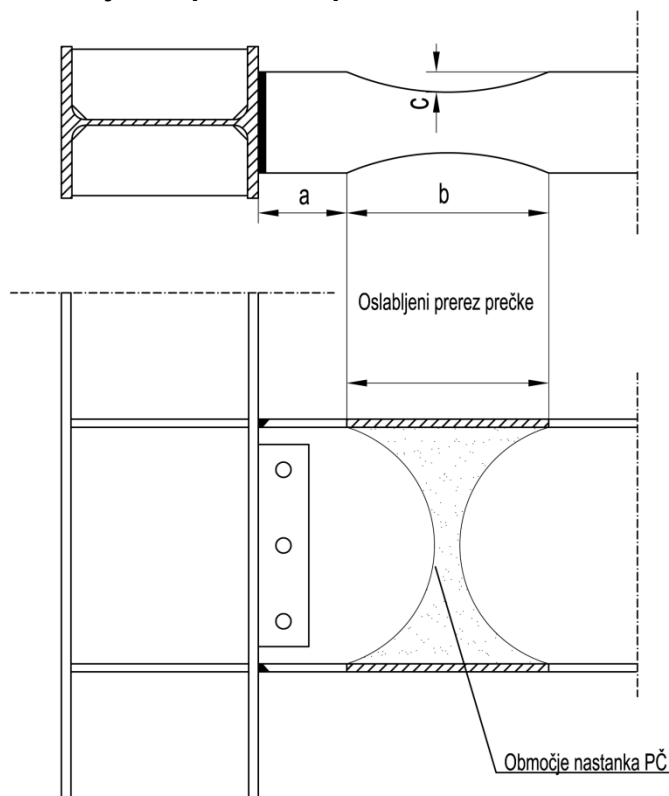
4 MOŽNE IZVEDBE POLNO NOSILNIH SPOJEV

Evrokodi za dimenzioniranje polno nosilnih spojev ne podajajo konkretnih rešitev. Podajajo vse ustrezne kontrole nosilnosti in s tem omogočajo dimenzioniranje ekstremnih spojev, ni pa podane celovite rešitve za spoje, ki so pogosto v uporabi. Po svetu pa je pripravljenih kar nekaj postopkov dimenzioniranja za preizkušene tipične izvedbe spojev. V nadaljevanju podajam šest primerov tipiziranih spojev, katerih izvedbo in dimenzioniranje podaja ameriški nacionalni standard ANSI/AISC 358-10 [2].

Na tem mestu naj poudarim, da so v omenjenem standardu podane tipizirane dimenzije posameznih komponent, ki vse izvirajo iz dejanskih poskusov. Torej je uporaba elementov, ki niso skladne s predpisanimi, na lastno odgovornost, saj ne ustreza nujno vsem zahtevam in zanje ne moremo varno predpostaviti, da bo njihovo obnašanje odgovarjalo pričakovanemu.

Za dimenzioniranje posameznih komponent spoja moramo določiti odpornost, da lahko prenesejo notranje sile, ki se preko spojev prenašajo iz enega elementa v sosednje. Določitev projektnih sil je v konkretnih primerih odvisna od plastične upogibne nosilnosti prečke in tudi od dejanske obtežbe na prečko.

4.1. Vijalni spoj z oslabljenim prerezem prečke



Slika 6: Vijalni spoj z oslabljenim prečnim prerezemom

Pritrditev prečke na steber je lahko izvedena preko čelne pločevine z vijaki ali z zvari, lahko so uporabljena tudi ojačitvena rebra. Prečka je, v oddaljenosti za približno eno višino stebra od stika pasnice stebra s prečko, oslabljena. Gre za izrez pasnic, katerega geometrija je prikazana na sliki 6. Dimenzije a , b in c so določene z geometrijo prereza prečke.

S testi, ki so osnova za ugotovitve v ANSI/AISC 358-10 [2], so bile preizkušene različne oblike izreza pasnic: konstantni (pravokotni), stožčasti (trikotni) in krožni. Za vse oblike izreza se je v okviru nastajanja plastičnih členkov na predvidenem mestu tak način spajanja izkazal za uporabnega. Vendar pa je krožni izrez edini, ki ne povzroča nenadnih skokov napetosti po prerezu in s tem zmanjšuje možnosti za nastanek nenadnih krhkih porušitev in je tako edini za katerega je podan tipiziran postopek dimenzioniranja.

Pomembna faktorja pri dimenzioniranju spojev z oslabljenim prerezom sta seveda tudi višina prečke in razmerje dolžine prečke proti njeni višini $\frac{l_b}{h_b}$. Za primere z visokimi profili prečk se izkaže da na mestu razvoja plastičnega članka nastanejo večje deformacije kot pri nižjih profilih. Manjše razmerje $\frac{l_b}{h_b}$ pomeni hitrejše naraščanje momenta po razponu prečke na manjši dolžini in zato nastanejo večje plastične deformacije.

Preiskava, omenjena v ANSI/AISC 358-10 [2], je potekala na spojih, kjer so za prenašanje momentne obtežbe upoštevane močne osi profilov (pasnice prečke priključene na pasnico stebra) in na spojih, kjer je bil steber upogibno obremenjen okrog šibke osi. Čeprav so rezultati pri slednjih pokazali sprejemljivo obnašanje spoja, so tipizirani le spoji, kjer sta pasnici prečke priključeni na pasnico stebra, saj je bilo takih preizkušancev bistveno več testiranih.

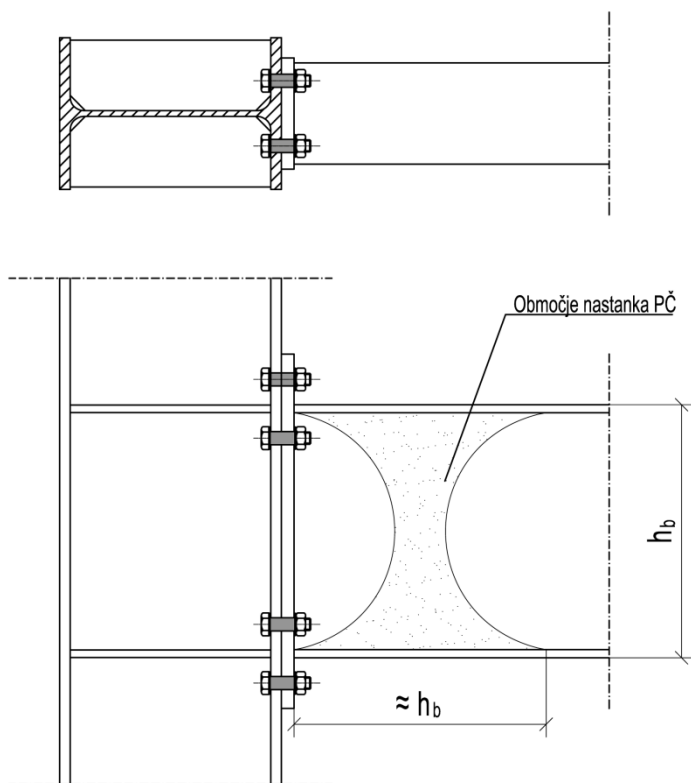
Analiza obnašanja strižnega panela stojine stebra je pokazala, da so v nekaterih primerih vse plastične deformacije nastale v prečki, v nekaterih primerih se je delež teh deformacij zgodil v panelu stojine, v nekaterih pa je celo prečka ostala nepoškodovana in je vse plastične deformacije nase prevzel panel. Čeprav so se tudi slednji izkazali za povsem ustrezne, je v tipskem postopku izračuna zahtevana strižna odpornost panela, ki ne dovoljuje nastanka plastičnih deformacij, ker bi lahko zaradi posledičnega zvijanja pasnice stebra prišlo do krhkih porušitev zvara med pasnicama prečke in stebra.

Uporaba vijakov za priključevanje prečke ni najbolj zaželena saj je možnost nastanka krhke porušitve po vijakih ob maksimalnih obtežbah večja, kot pri spojih izvedenih z direktnim varjenjem pasnic prečke na pasnico stebra. Vari morajo biti polno penetrirani čelni pri čemer mora elektroda dosegati predpisano minimalno Charpy-V vrednost.

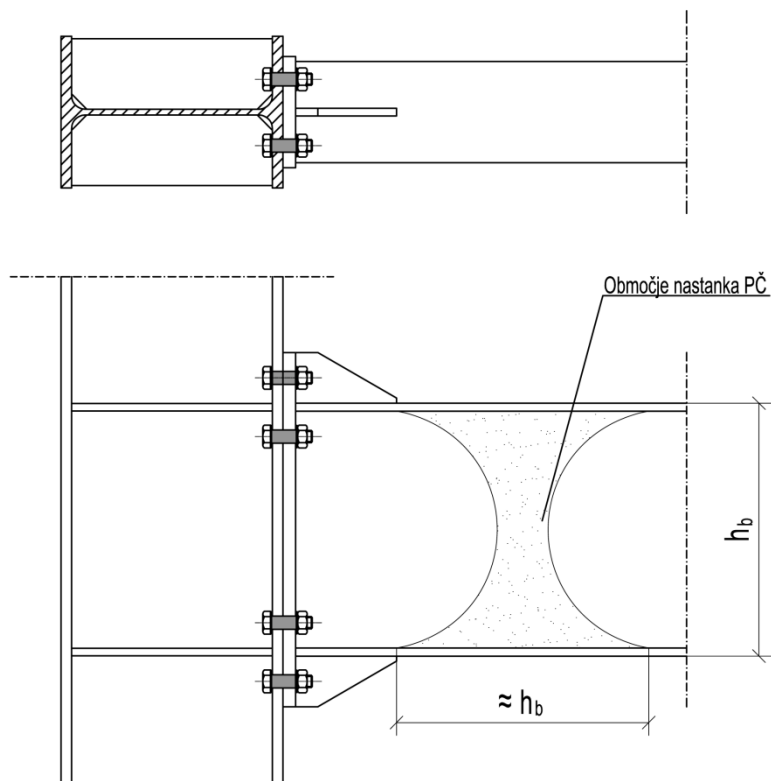
Glavna namena uporabe opisanega spoja sta točna določitev lokacije nastanka plastičnega članka in njen odmik od konkretnega stika ter zmanjševanje momentne obtežbe na spoj. Spoj je uporaben tudi v raznih sanacijah stavb, kjer konstrukcija v času nastanka še ni bila potresno odporno projektirana.

4.2. Vijačni spoj s čelno pločevino

Najbolj uporaben spoj v momentnih okvirjih v praksi, saj je zaradi možnosti vijačne montaže, najbolj optimalna izbira za izdelavo v delavnici in postavitvev na gradbišču.



Slika 7: Vijačni spoj s čelno pločevino



Slika 8: Vijačni spoj s priključno pločevino in ojačitvenimi rebri

Namen je seveda zagotoviti zadostno nosilnost glede na priključeni element, pri čemer sam spoj ne dovoljuje globalnih deformacij oz. rotacij. Vse neelastične deformacije se zgodijo izven spoja – bodisi v plastičnem členku v prečki, bodisi v strižnem panelu stojine stebra. Lokacija nastanka plastičnega členka je definirana na podlagi poskusov.

V izvedbi omenjenega spoja je dovoljena uporaba vroče valjanih ali varjenih profilov za prečko, dokler le ustrezajo predpisan razmerjem za doseganje potrebne kompaktnosti. Največ preizkušancev v preizkusih opisanih v ANSI/AISC 358-10 [2] je bilo iz varjenih profilov in pri katerih je veljalo razmerje med dolžino prečke in višino prečke: $\frac{l_b}{h_b} = 8$, kar tudi predstavlja minimalno vrednost razmerja, ki naj bo v izračunih upoštevan.

Steber naj bo vroče valjani profil ali varjeni profil v obliki H profila. Pasnici prečke se morata pritrjevati na pasnico stebra, tako da je steber upogibno obremenjen okrog močne osi. Drugih posebnih zahtev za stebre tipski spoj s čelno pločevino nima. Največji horizontalni razmik med zunanjsima vrstama vijakov ne sme presegati širine pasnice prečke, saj s tem zmanjšujemo togost in trdnost priključne pločevine. Vertikalna razdalja vijakov od pasnic prečke naj bo čim manjša, saj odmikanje vijakov od pasnice, bolj kot je to potrebno zaradi izvedbenih pogojev (zategovanja vijakov), povečuje potrebno debelino priključne pločevine.

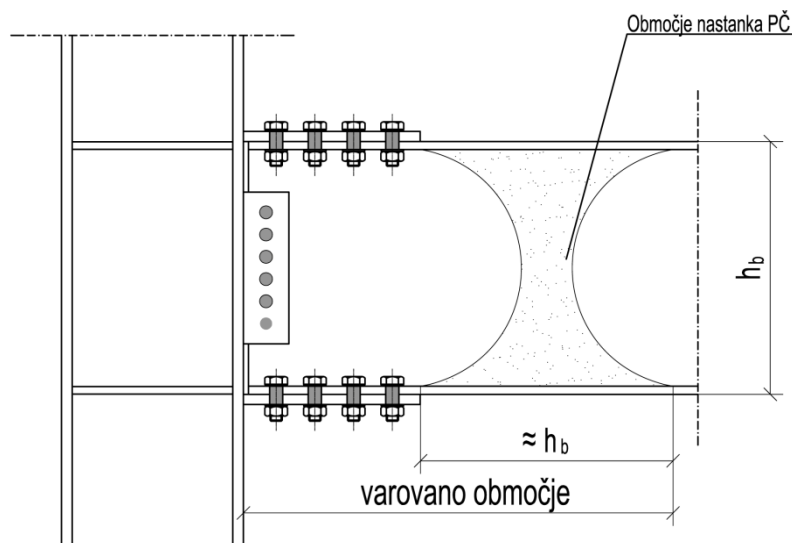
Širina priključne pločevine je v splošnem lahko večja od debeline pasnice prečke, za začetno oceno pa je predvidena enaka debelini pasnice prečke. Geometrijo in velikost rebra med pasnico prečke in priključno pločevino pogojujeta seveda pogoj kompaktnosti in pa upoštevanje raznosa sile pod kotom 30° , ki je skladen z določanjem t.i. Withmore-ovega prereza. Prepovedana je izvedba lukenj za varjenje rebra na pasnico prečke in priključno pločevino, saj, s testi (ANSI/AISC 358-10 [2]) dokazano bistveno zmanjšuje nosilnost pasnice prečke. V ta namen se seveda uporabljajo polno nosilni obojestranski kotni zvari.

Zvari med priključno pločevino in stojino prečke morajo imeti vsaj nosilnost stojine, saj se ob notranjih vijakih lahko razvijejo deformacije.

Dodatno rebro (Slika 8) povečuje togost priključne pločevine in prestavi mesto nastanka plastičnega členka izven območja spoja. Plastični členek se namreč v primeru z ojačitvenim rebrom razvije v območju prečke ob koncu rebra, med tem ko se v primeru brez ojačitve pojavi precej bližje dejanskemu stiku prečke in stebra (Slika 7).

4.3. Vijačni spoj preko pasnic prečke

Vijačni spoj preko pasnic je primeren predvsem za mesta montaže, kjer so omejene možnosti uporabe dvigal, saj tak način izvedbe omogoča postavitve prečk na svoja mesta in kasnejše vijačenje, brez potrebe po držanju nosilcev z različnimi dvigali.



Slika 9: Vijalni spoj preko pasnic prečke

Prve deformacije v prečki, in sicer na mestu, kjer se konča pločevina ob pasnici. Približno istočasno pride tudi do zdrsa v vijakih ob pasnici, kar pa bistveno ne pripomore k razvoju deformacij. Sekundarne deformacije se lahko razvijejo v panelu stojine stebra. Nekaj plastičnih deformacij se lahko ob nastopu mejnih pomikov zgodi tudi v pločevini ob pasnici.

Iz zgornjega opisa in na podlagi testov je dokazano, da omenjena vrsta spoja zagotavlja eno največjih duktilnosti. Je pa ravno zaradi velikega števila porušnih mehanizmov tak spoj eden bolj kompleksnih za dimenzioniranje.

Za prenos strižnih sil v spoju uporabimo vijake s katerimi je povezana priključna pločevina privarjena na pasnico stebra in stojina prečke. Zaradi bistveno večje strižne nosilnosti vijakov z delnim navojem, so v izračunih predpostavljeni le ti. Uporaba vijakov z delnim navojem namreč zadosti pogojem strižne nosilnosti z manj vrstami vijakov, kar posledično zmanjša potrebno višino h_{pp} priključne pločevine. Manjše število vijakov in manjša višina priključne pločevine pa lažje dosegajo zahteve o rotaciji in neelastičnih pomikih zaradi seizmične obtežbe.

Ciklično obremenjevanje preizkušancev pokaže, da je moment potreben za nastanek plastičnega členka 1,15 krat upogibna odpornost prečke, moment na stiku prečke in stebra pa variira od 1,3 do 1,5 krat upogibna odpornost prečke. Ker se večina plastičnih deformacij zgodi torej ob tvorbi plastičnega členka v prečki, je le ta merodajen za dimenzioniranje. Izkaže se tudi, da togost takih spojev dosega približno 90% togosti popolnoma togega spoja.

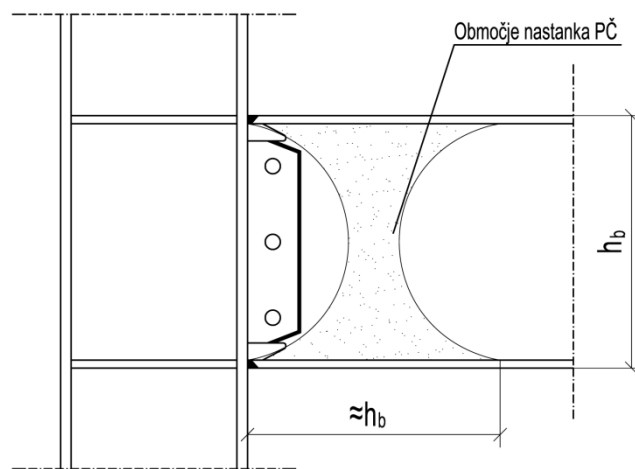
Območje nastanka plastičnega členka je široko približno eno višino prečke in se začne tvoriti v območju, kjer se konča pločevina ob pasnici. Zaradi velikih deformacij, ki nastanejo v plastičnem členu je treba nosilec zavarovati še z bočnimi podporami, ki se naj začnejo izven varovanega območja.

Čeprav se delež plastičnih deformacij zgodi v strižnem panelu stojine stebra, je priporočljivo izvajanje kontrole v smislu šibka prečka – močen steber, da preprečimo kakršne koli plastične deformacije izven panela v območju spoja.

Pločevina ob pasnici mora niti sposobna na bruto prerezu prenesti napetost na meji tečenja uporabljenega materiala, na oslabiljenem prerezu pa natezno trdnost materiala, zato je potrebna pozornost pri izbiri uporabljenega materiala. Posebna pozornost je v postopku izračuna namenjena prav dimenzioniranju pločevine ob pasnici, saj mora zadoščati poleg nosilnostim bruto in neto prereza še kontroli bočnih pritiskov in iztrga vijakov iz pločevine ("Block shear effect").

Zaradi možnosti porušitve neto prereza pasnic prečke in pločevine ob pasnici morajo biti vijaki razporejeni v dveh vrstah. Testi (ANSI/AISC 358-10 [2].) namreč kažejo, da je z več kot dvema vrstama vijakov zelo težko preprečiti porušitev neto prereza.

4.4. Varjeni spoj



Slika 10: Varjeni spoj

Uporaba varjenih spojev je v praksi precej nezaželena. Ti spoji so primerni za konstrukcije z manjšim številom okvirjev ali za samo določene spoje, kjer imamo zahtevo po natančnem in čim bolj "čistem" spoju, torej s čim manj priključnimi pločevinami in vijaki.

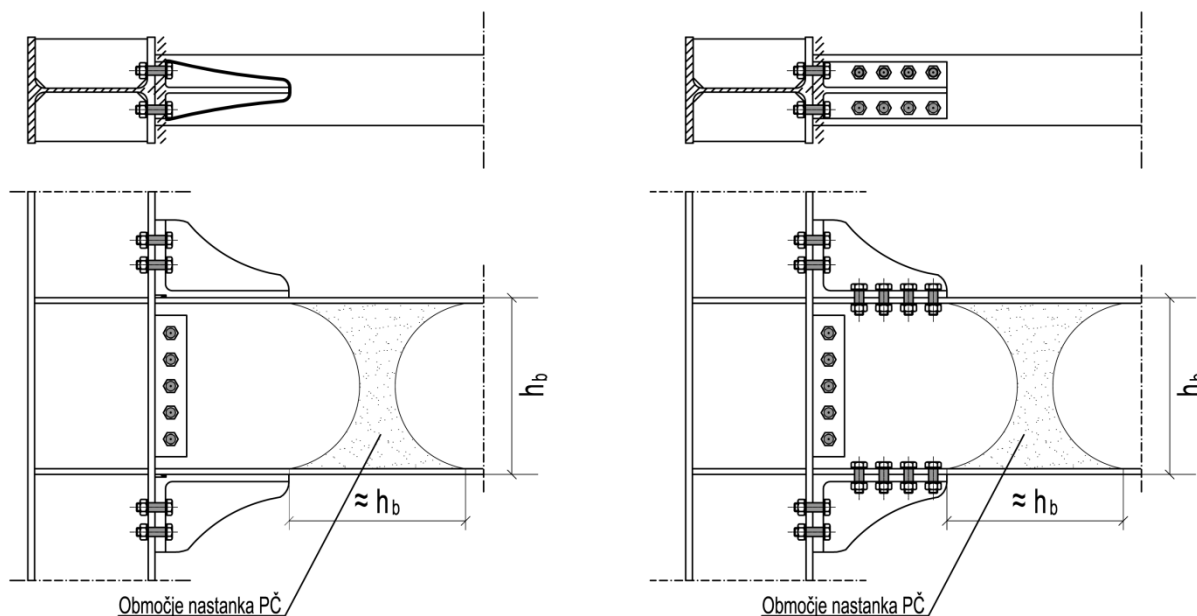
Spoj vso obremenitev prenaša načeloma preko zvarov med pasnicama prečke in pasnico stebra ter preko zvarov med priključno pločevino in stojino prečke. Luknje v stojini prečke in priključni pločevini predvsem omogočajo montažo, lahko pa kasneje služijo tudi za prevzem strižnih sil.

Pasnici prečke sta na pasnico stebra privarjeni s polno penetriranimi čelnimi zvari, ki morajo ustrezati vsem predpisom v zvezi s potresno odpornim projektiranjem. Ti zvari morajo biti nujno pregledani in njihova ustreznost mora biti potrjena. Tudi zvar med pasnico stebra in stojino prečke mora biti polno penetriran čelni zvar, ki poteka po celotni možni dolžini stojine, to je od spodnje odprtine za varjenje do zgornje. Na pasnico stebra je privarjena še dodatna pločevina, ki poveča togost in prevzame del obtežbe iz zvarov ob pasnicah. Odprtina za varjenje je posebne oblike, ki je s poskusi dokazano najbolje prestala ciklično obremenjevanje, saj preprečuje nastanek konic napetosti in s tem skoke notranjih sil.

Pri varjenem spoju, za razliko od izvedb opisanih v točkah 4.1, 4.2 in 4.3, nastanek plastičnega členka ni odmaknjen od konca nosilca. Neelastične deformacije se raztezajo od konca nosilca pa do dolžine približno enake višini nosilca. Kljub temu, so preizkušanci pokazali dobre rezultate: velike rotacijske kapacitete in dobre odzive na strižne obremenitve v panelu stojine stebra. V polovici primerov je prišlo do plastičnih deformacij tudi v stojini stebra, ampak to ni imelo za posledico globalne porušitve, torej je ta vrsta spoja primerna tudi za stebre z šibkejšo stojino.

V izračunu je za oddaljenost plastičnega členka od konca nosilca, sicer vzeta vrednost 0, ampak ob upoštevanju faktorja C_{pr} , ki ga predpisuje postopek, dobimo dejansko vrednost momenta na koncu nosilca. Tak postopek je izbran, ker daje rezultate, ki se ujemajo z dejanskimi poskusi in ker je s tem olajšan postopek izračuna merodajnih notranjih sil za preverjanje nosilnosti strižnega panela stojine stebra in strižne nosilnosti nosilca.

4.5. Vijačni spoj s kotniki tipa "Kaiser"



Slika 11: Vijačni spoj s kotniki

Namesto priključnih pločevin in ojačitvenih reber, lahko za vezno sredstvo uporabimo posebno izdelane kotnike visoke kvalitete, ki prečko s stebrom povezujejo z vijaki, na prečko pa so ali varjeni (slika 11 levo) ali vijačeni (slika 11 desno). Kotniki so oblikovani proporcionalno s priključenim elementom, tako da omogočajo razvoj predvidenega momenta v spoju.

Testi so preizkušali nosilce z razmerjem razpona proti njihovi višini $\frac{l_b}{h_b} = 8 \div 20$, za minimum tega razmerja na varni strani pa je določeno razmerje $\frac{l_b}{h_b} = 9$. Debelina pasnice prečke določena s potrebami za izvedbo polno nosilnega zvara med pasnico in priključkom v primeru varjenega spoja in z zagotavljanjem natezne nosilnosti oslabiljenega prereza v primeru vijačenega spoja.

Tudi v tem spoju je dovoljeno obremenjevanje stebra le okrog močne osi, saj obnašanje pri obremenjevanju okrog šibke osi ni potrjeno. Testirani so bili tudi škatlasti prerezi, in sicer taki, kje sta se prečki pritrjevali na nasprotni strani stebra in taki, kjer sta se priključevali na sosednji. V slednjem so omejitve za dimenzije malo strožje.

Priključni elementi – "Kaiser" kotniki, so serijsko izdelani elementi in so klasificirani glede na velikost obtežbe, ki jo morajo prevzeti. Njihova zasnova je taka, da ob pravi izbiri glede na obtežbo, ti kotniki že ustrezajo mejnim stanjem, ki jih narekujejo: upogibna nosilnost pasnice stebra, dodatna natezna obremenitev vijakov zaradi togosti pločevine (ang. "Prying force"), interakcija upogiba in osne sile na kotnik, strižna nosilnost kotnika, bočni pritisk in strižna porušitev roba pločevine. Poleg kotnika, je priključna še ozka pločevina ob stojini, preko katere se z vijaki prenaša strižna obremenitev.

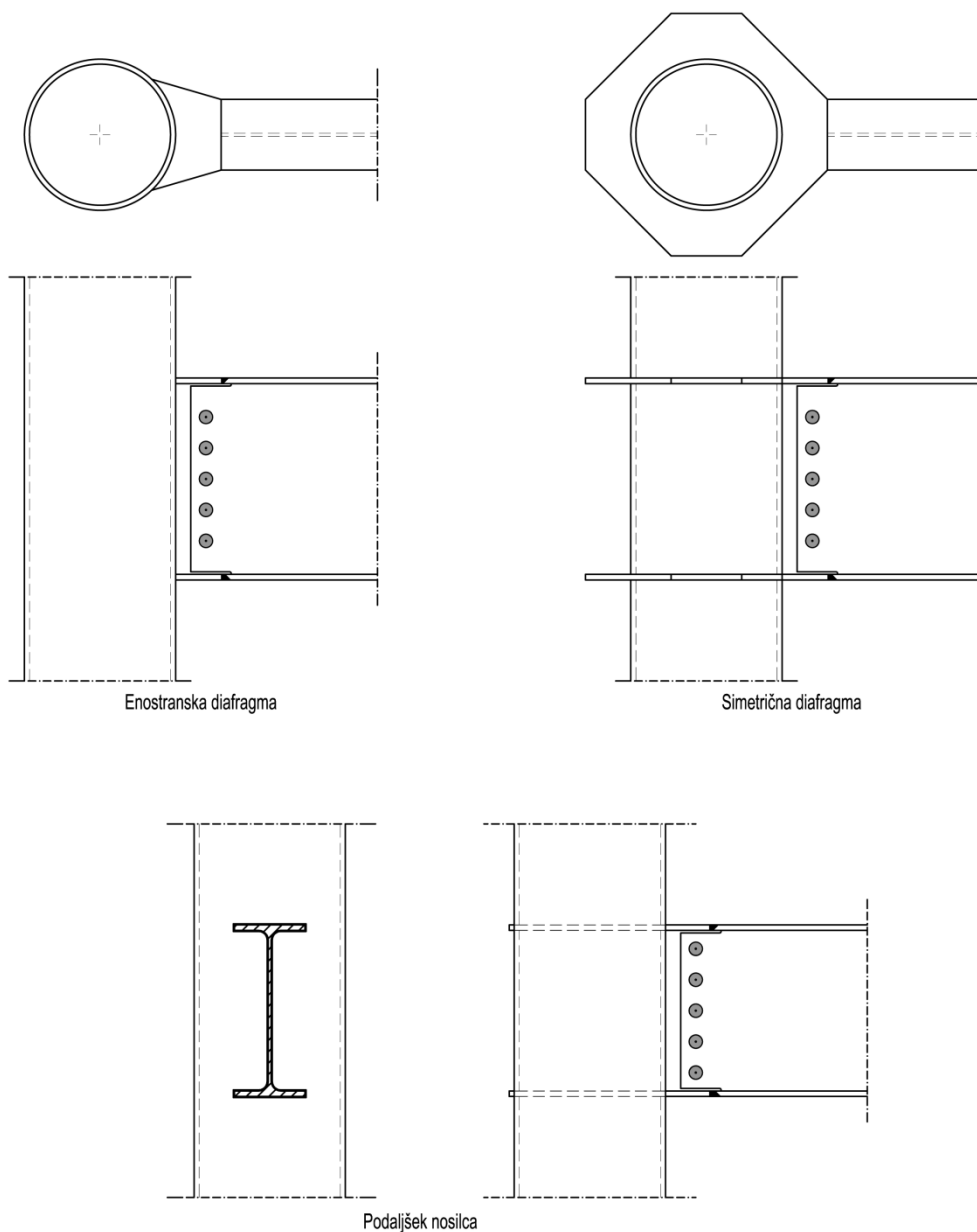
Uporabljeni so prednapeti vijaki primernih kvalitete. Dokazano je, da vertikalno podaljšane luknje, ki omogočajo lažjo montažo, ne oslabijo funkcionalnosti spoja. Prav tako je pokazano, da slabitev pasnice stebra z luknjami vplivajo bistveno na upogibno nosilnost pasnice stebra. Zaželeno je, da se vijaki na pasnici stebra zategnejo prej, kot strižno obremenjeni v stojini.

Pri varjeni izvedbi spoja je pomembno, da so zvari kvalitetni in da je kvaliteta nato potrjena s pregledom in/ali testom. Pri izvedbi z vijaki pa mora strižna ravnina potekati po delu prereza vijaka brez navojev. Pri pripravi lukenj na pasnici prečke mora biti "Kaiser" kotnik uporabljen kot šablona, da je ob izgradnji naleganje točno in se med montažo ne poškoduje navoja vijakov. Med površino pasnice prečke in kotnikom se namesti medeninasta ploščica, ki zmanjšuje abrazijo površin ob vijačenju in s tem izboljšuje obnašanje stika. Medeninasta ploščica deluje kot element v katerem se disipira energija, ki se sprošča ob trenju, ki nastaja med elementoma. Na spodnjo stran pasnice se dodaja podložke, ki preprečujejo lokalno izbočenje pasnice prečke.

Plastični členek se tvori v območju prečke ob koncu "Kaiser" kotnika. Nekaj plastičnih deformacij se lahko zgodi tudi v strižnem panelu stebra, vendar jih s prečnimi ojačitvami lahko zadržimo v mejah dopustnih, torej takih, ki nimajo prispevka h globalni porušitvi.

4.6. Spoj s škatlastim profilom stebra

Uporaba škatlastih profilov stebra je v praksi pogosta, je pa tudi ena zahtevnejših za izvedbo priključkov. Reševanje detajlov takega spoja je bilo v praksi pogosto testirano, predvsem po potresu v Kobe-ju leta 1995, me katerim so se ti spoji izkazali za krtične. Raziskava na univerzi v ZDA, v Illinois-u [7], je obravnavala 5 možnih priključitev na škatlast profil stebra. Slika 12 prikazuje 3 možne izvedbe: z enostransko diafragmo, s simetrično diafragmo ter s podaljšanjem nosilca preko stebra. Obravnavani primeri so bili sicer izvedeni z okroglimi profili, ampak so rezultati in ugotovitve povsem primerni tudi za škatlaste profile. Pogosto so stebri v takih spojih polnjeni z betonom, kar povečuje togost stebra.



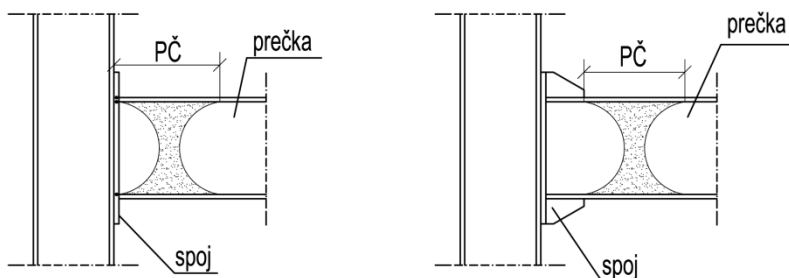
Slika 12: Spoji s škatlastim profilom stebra

Glavni problem predstavlja lokalna porušitev stene na katero je priključena prečka in pa seveda onemogočen dostop za vijachenje. Zato se uporabljajo priključne diafragme, ki so privarjene na škatlast profil ali ga prebadajo, nanje pa se nato z vijaki priključujejo nosilci.

5 DIMENZIONIRANJE POLNO NOSILNIH SPOJEV

5.1. Splošno

Z ozirom na prejšnja poglavja torej želimo varovati stebre pred nastankom plastičnih deformacij zaradi potresne obtežbe. Neelastične deformacije se torej lahko tvorijo samo v prečki (Slika 13, desno), ali pa dovolimo, da se del plastičnih deformacij zgodi tudi v spoju (Slika 13, levo).



Slika 13: Lokacija razvoja plastičnega členka

Potreba po polno nosilnih spojih se pokaže prav v primeru, ko želimo omogočiti nastanek plastičnega členka v samem priključnem elementu in ne v spoju. V tem primeru mora imeti spoj namreč ogromno nosilnost, duktilnosti pa nam v spoju ni potrebno zagotavljati. Moramo jo zagotoviti na mestu razvoja plastičnega členka, torej v prečki, kar je navadno tudi lažje. Stebri morajo imeti veliko togost, da zagotovimo razvoj momentov v spoju.

5.2. Dodatna nosilnost spoja

Da torej zagotovimo nastanek plastičnih členkov v elementu in ne v spoju, mora biti spoj projektiran na dodatno nosilnost:

$$R_j = 1,1\gamma_{ov}R_b$$

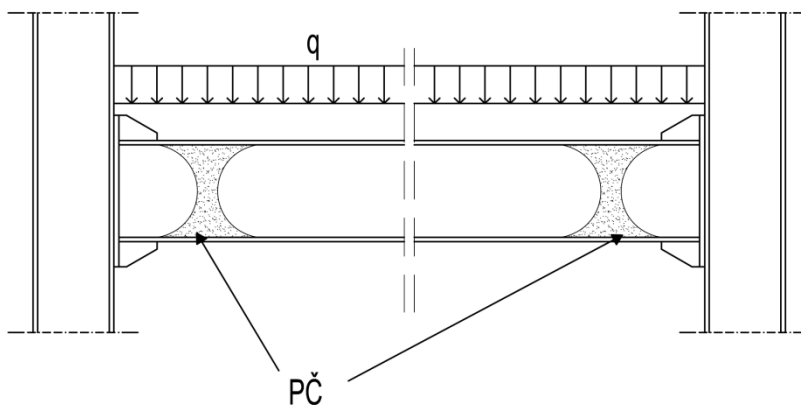
kjer je:

R_j ... nosilnost spoja

γ_{ov} ... faktor dodatne nosilnosti materiala

R_b ... nosilnost prečke

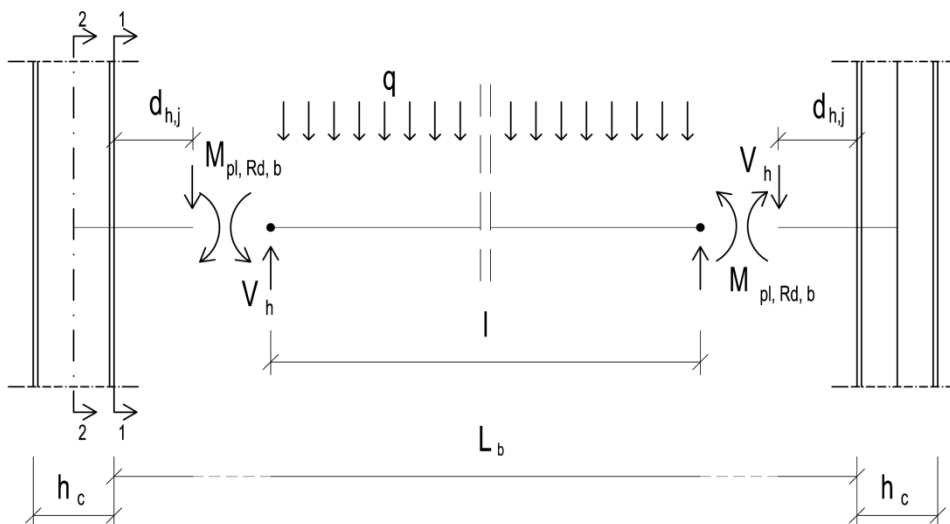
Nosilnost spoja je torej povečana še za faktor 1,1, poleg faktorja dodatne nosilnosti materiala. Razumljivo, saj zahtevamo, da je spoj močnejši od elementa, ki je sposoben sipati energijo.



Slika 14: Plastični členek v prečki

5.3. Projektne sile v spoju

Na sliki 15 je prikazan model za analizo z vrisanimi notranjimi silami, s katerimi določamo nosilnost spoja:



Slika 15: Model prečke s plastičnimi členki in sile za analizo

Prečna sila:

Prečna sila, na katero projektiramo spoj, je sestavljena iz dveh komponent. Prva ($V_{h,G}$) je prispevek koristne etažne obtežbe (q), druga ($V_{h,M}$) pa je določena iz plastičnega momenta, ki nastopi v priključnem elementu, da sploh nastane plastični členek:

$$V_h = V_{h,G} + V_{h,M}$$

kjer je:

V_h ... projektna prečna sila v spoju

$V_{h,G}$... prečna sila zaradi gravitacijskih sil in jo izračunamo kot:

$$V_{h,G} = \frac{q \cdot l}{2}$$

$V_{h,M}$... prečna sila zaradi potresnih sil, ki je določena s plastičnim momentom v prečki:

$$V_{h,M} = \frac{2M_{pl,Rd,b}}{l}$$

pri čemer je l definiran kot:

$$l = L_b - 2 \cdot d_{h,j}$$

Upogibni moment:

Upogibni moment določamo in preverjamo v dveh prerezih. Prerez 1-1 predstavlja dejansko mesto spoja, torej stik med prečko in stebrom, prerez 2-2 pa je v osi stebra. Momenta v posameznih prerezih določimo z naslednjima izrazoma:

$$M_{Rd,b}^{1-1} = M_{pl,Rd,b} + V_h \cdot d_{h,j}$$

$$M_{Rd,b}^{2-2} = M_{pl,Rd,b} + V_h \left(d_{h,j} + \frac{h_c}{2} \right)$$

kjer so:

$M_{Rd,b}^{1-1}$... projektni upogibni moment v prerezu 1-1, v spoju prečke in stebra

$M_{Rd,b}^{2-2}$... projektni upogibni moment v prerezu 2-2, v osi stebra

$M_{pl,Rd,b}$... plastična upogibna nosilnost priključenega elementa

$d_{h,j}$... razdalja med mestom plastičnega členka in stika med stebrom in prečko

h_c ... višina prereza stebra

5.4. Kontrole

Poleg ostali kontrol, ki sledijo tekom računa dimenzioniranja spoja, moramo za celoten spoj opraviti še naslednje kontrole:

5.4.1. Pogoj globalne duktilnosti

Da zagotovimo sposobnost prenašanja obtežbe, ki se iz prečke prenese v steber, mora biti steber dimenzioniran kar na 30% večjo obremenitev kot jo lahko prevzame prečka:

$$\sum M_{Rd,c} \geq 1,3 \sum M_{Rd,b} = 1,3 \sum M_{Rd,b}^{2-2}$$

Ta kontrola se sicer izkaže za nemerodajno, saj nam zahteve pri dimenzioniranju spoja, tako ali tako velevajo še celo večjo potrebno nosilnost stebra v območju spoja.

5.4.2. Kontrola nosilnosti spoja

Sam stik med stebrom in prečko dimenzioniramo na dodatno nosilnost in upoštevamo spodnjo enačbo:

$$M_{Rd,j} \geq 1,1 \cdot \gamma_{ov} M_{Rd,b}^{1-1}$$

5.4.3. Kontrola nosilnosti strižnega panela stojine stebra

Zaradi skoka momenta v stebri na mestih prečk, moramo zagotoviti zadostno strižno nosilnost stojine stebra, da preprečimo porušitev po stebrih:

$$\frac{V_{wp,Ed}}{V_{wp,Rd}} \leq 1,0$$

pri čemer je

$V_{wp,Rd}$...strižna odpornost stojine stebra

$V_{wp,Ed}$...strižna obremenitev stojine stebra

Omenjena kontrola je predpisana s strani slovenskih predpisov, ampak v sklopu projektiranja spojev po korakih, kot si sledijo glede na ANSI/AISC 358-10 [2], nekatere izvedbe celo dopuščajo lokalno strižno plastifikacijo panela stojine.

6 RAČUNSKI PRIMER

6.1. Opis naloge

Namen računskega primera te diplomske naloge je pokazati praktično uporabo dimenzioniranja polno nosilnega spoja prečke in stebra. Izbrala sem tipiziran primer izvedbe spoja, ki je opisan v točki 4.2. Gre torej za spoj, kjer je preko priključne pločevine prečka vijačena na pasnico stebra. Spoj je ojačan z rebri med priključno pločevino in pasnico prečke ter z rebri med pasnicama stebra (Slika 17).

Ker je namen naloge podrobneje raziskati sam spoj, ne gre za konkreten primer statičnega preračuna celotne konstrukcije, zato sem obtežbe in določene dimenzije konstrukcije, ki so bile potrebne za izračun izbrala tekom postopka preračuna.

Postopek izračuna je povzet po ameriškem standardu ANSI/AISC 358-10 [2], uporabljeni izrazi pa so interpretirani skladno z Evrokod standardi.

6.2. Materiali

V namen preprečevanja krhkega loma v konstrukciji, ki je povsem v nasprotju z zahtevami potresno odpornega projektiranja, izberem kvaliteto materiala S235 J0. S tem zagotovim zadostno lomno žilavost in omogočim uporabo večjih debelin pločevine.

Kot bo pokazal nadaljnji izračun pločevine debelejšje od 40 mm niso uporabljene, zato lahko v izračunu uporabim naslednje karakteristike: [6]

$$f_y = 235 \frac{N}{mm^2} \quad \text{napetost tečenja jekla S235}$$

$$f_u = 360 \frac{N}{mm^2} \quad \text{natezna trdnost jekla S235}$$

Vrednosti ostalih mehanskih karakteristik jekla so še:

$$E = 210000 \text{ MPa} \quad \text{elastični modul}$$

$$\nu = 0,3 \quad \text{Poissonov količnik}$$

$$G = 81000 \text{ MPa} \quad \text{strižni modul}$$

$$\gamma = 78 \frac{kN}{m^3} \quad \text{specifična teža}$$

Pri dimenzioniranju vijakov sem upoštevala vijake kvalitete 10.9 in njihove mehanske karakteristike:

$$f_{yb} = 900 \frac{N}{mm^2} \quad \text{napetost tečenja vijaka kvalitete 10.9}$$

$$f_{ub} = 1000 \frac{N}{mm^2} \quad \text{natezna trdnost vijaka kvalitete 10.9}$$

6.3. Zvari v spoju

Varjenje je način spajanja elementov, ki je bolj primeren za delo v delavnici kot na gradbišču zato sem tudi izbrala v osnovi vijačen spoj. Vsi zvari, ki so potrebni se naredijo že v delavnici in spajajo:

- prečko in priključno pločevino
- ojačitev med prečko in priključno pločevino
- ojačitvi v stebri

Da spoji zadosti pogoju polne nosilnosti, morajo biti vsi uporabljeni zvari tudi polno nosilni. Kjer je to mogoče, so uporabljeni polno penetrirani zvari.

6.4. Območje veljavnosti

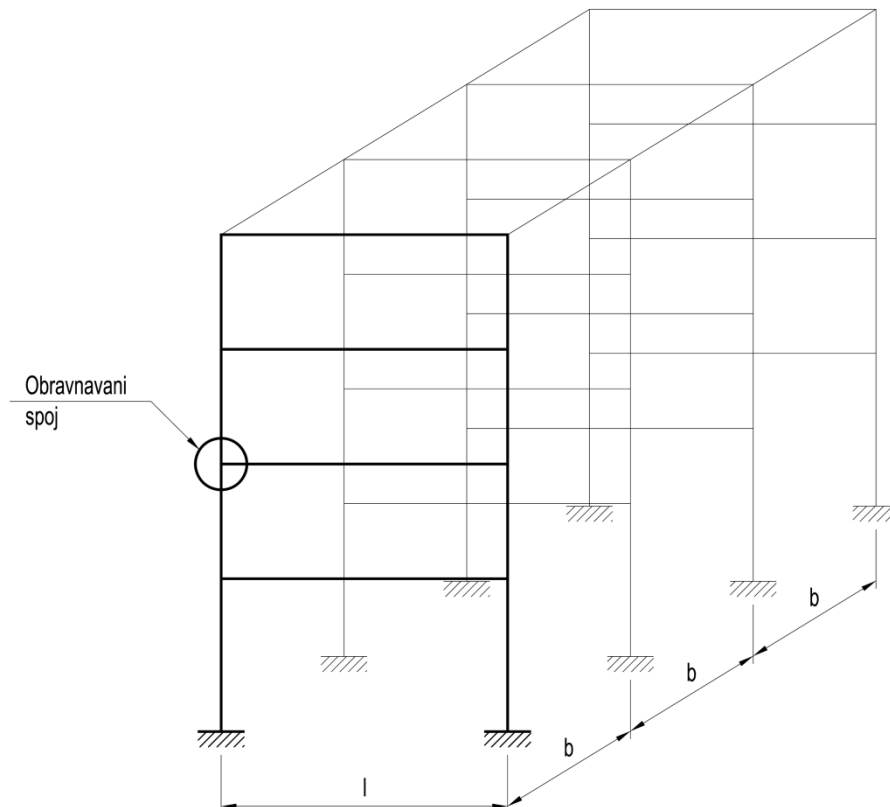
ANSI/AISC 358-10 [2] podaja dimenzije posameznih elementov za katere se sme uporabiti tipiziran pristop projektiranja spojev. Mejne dimenzije za vijачeni spoj preko čelne pločevine s 4 vrstami vijakov in ojačitvenim rebrom so podane v preglednici 1.

Dimenzija	Maksimalna vrednost [mm]	Minimalna vrednost [mm]
$t_{f,b}$... debelina pasnice prečke	19	10
b_b ... širina profila prečke	229	152
h_b ... višina profila prečke	610	349
t_p ... debelina čelne pločevine	38	13
b_p ... širina čelne pločevine	273	178
g ... razmik med vrstama vijakov	152	83
p_{fi}, p_{fo} ... odmik vijakov od pasnice prečke	140	44

Preglednica 1: Območje veljavnosti

6.5. Sile v spoju

Sile, ki jih mora prenesti spoj, skladno s potresno odpornim projektiranjem, so načeloma določene z nosilnostjo prečke. Izjema so strižne sile, katerih velikost pa je odvisna tudi od dejanske obremenitve, ki jo povzročajo dejanske obtežbe v konstrukciji (koristna, lastna obtežba...). V ta namen izberem tipičen okvir in spoj v njem, katerega bom v nadaljevanju preverjala. Okvir prikazuje slika 16:



Slika 16: Izbrani okvir in spoj

Izberem okvir razpona $l = 7,5m$. Predpostavim, da so okvirji postavljeni na medsebojni razdalji $b = 8m$. Za tak razpon izberem višino prečke, ki odgovarja $\frac{1}{15}$ dolžine razpona in zato izberem IPE 500. Predpostavim, da gre za javni objekt in ocenim projektno potresno obtežbo:

$$q_{Ed} = (g + \psi_2 \cdot q) \cdot l \doteq \left(5 \frac{kN}{m^2} + 0,6 \cdot 4 \frac{kN}{m^2} \right) \cdot 7,5m \cong 60 \frac{kN}{m}$$

6.6. Izračun

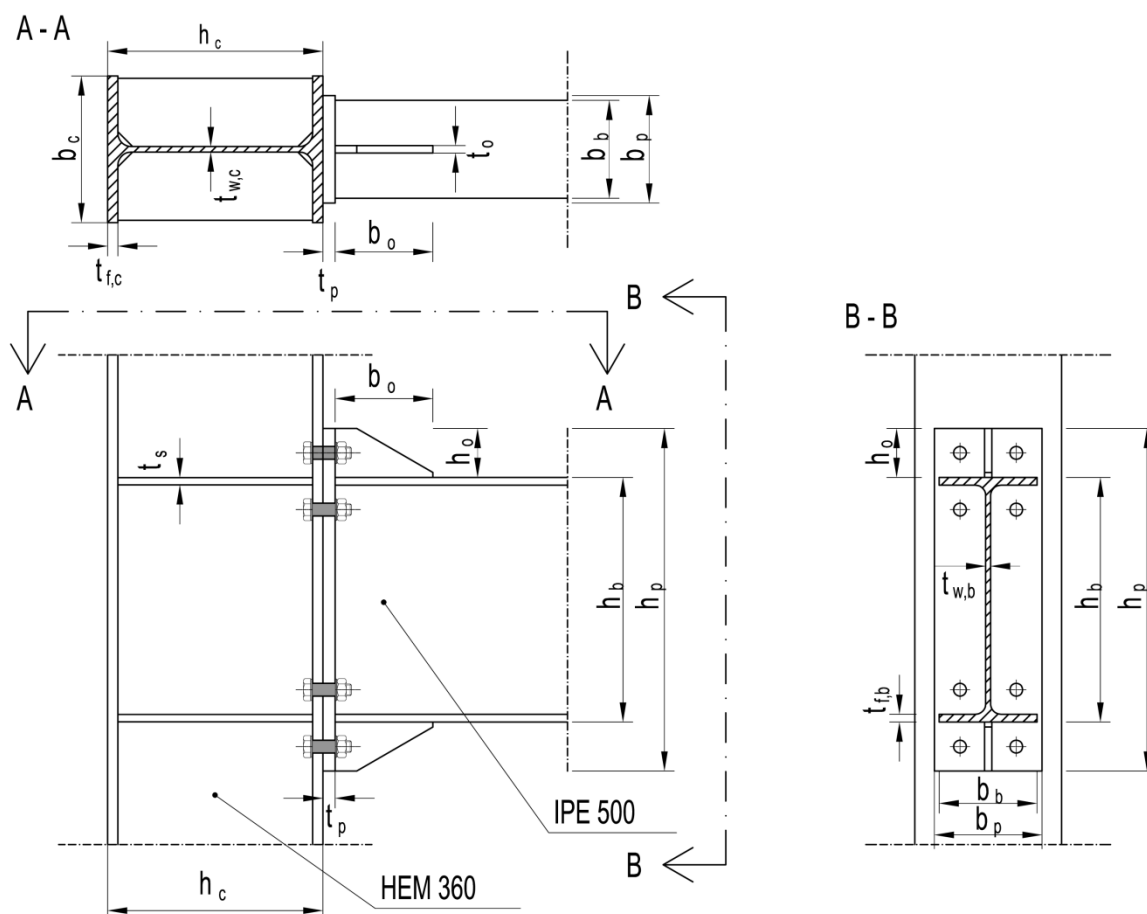
Sam postopek je razdeljen na dva dela: dimenzioniranje na strani prečke in dimenzioniranje na strani stebra. Dimenzioniranje je izvedeno postopno po korakih, od tistih komponent spoja, ki so preverjeno merodajne, do tistih manj ključnih. Postopek dimenzioniranja sem povzela po ameriškem standardu ANSI/AISC 358-10 [2].

6.6.1. Dimenzioniranje na strani prečke

Na strani prečke najprej izberem okvirno želeno geometrijo spoja, ki jo nato preverim. Začnem z dimenzioniranjem vijakov, nato izberem potrebno debelino priključne pločevine in nazadnje še ojačitveno rebro.

KORAK 1: Izbira geometrije in določitev projektnih obremenitev spoja

Izbrana geometrija spoja in uporabljeni profili so označeni na sliki 17.



Slika 17: Geometrija obravnavanega spoja

Steber – HEM 360

Karakteristike stebra označuje črka "c"
(ang. column).

$h_c = 395 \text{ mm}$	<i>višina profila</i>
$b_c = 308 \text{ mm}$	<i>širina profila</i>
$t_{w,c} = 21 \text{ mm}$	<i>debelina stojine</i>
$t_{f,c} = 40 \text{ mm}$	<i>debelina pasnice</i>
$A_c = 319 \text{ cm}^2$	<i>površina prereza</i>
$W_{pl,y,c} = 4989 \text{ cm}^3$	<i>plastični odpornostni moment stebra</i>

Prečka – IPE 500

Karakteristike prečke označuje črka "b"
(ang. beam).

$h_b = 500 \text{ mm}$	<i>višina profila</i>
$b_b = 200 \text{ mm}$	<i>širina profila</i>
$t_{w,b} = 10,2 \text{ mm}$	<i>debelina stojine</i>
$t_{f,b} = 16 \text{ mm}$	<i>debelina pasnice</i>
$A_b = 116 \text{ cm}^2$	<i>površina prereza</i>
$W_{pl,y,b} = 2194 \text{ cm}^3$	<i>plastični odpornostni moment prečke</i>

Priključna pločevina

Karakteristike priključne pločevine označuje črka "p".

$h_p = 700 \text{ mm}$	<i>višina priključne plošče</i>
$b_p = 220 \text{ mm}$	<i>širina priključne plošče</i>
$t_p = 30 \text{ mm}$	<i>debelina priključne plošče</i>

Ojačitveno rebro priključne pločevine

Karakteristike ojačitve ob priključni pločevini označuje črka "o".

$h_o = 100 \text{ mm}$	<i>višina ojačitve</i>
$b_o = 200 \text{ mm}$	<i>širina ojačitve</i>
$t_o = 15 \text{ mm}$	<i>debelina ojačitve</i>

Ojačitvena rebra stebra

Karakteristike rebra v stebru označuje črka "s" (ang. stiffener).

$h_s = 398 \text{ mm}$	<i>višina rebra</i>
$b_s = 140 \text{ mm}$	<i>širina rebra</i>
$t_s = 25 \text{ mm}$	<i>debelina rebra</i>

Projektno obremenitev spoja določa plastična nosilnost prečke $M_{pl,Rd,b}$ (1). V spoju obravnavamo dva prereza, ki sta obremenjena z različnima momentoma in sta prikazana na sliki 17. Moment v prerezu 1-1 določim po enačbi (2). Pri izračunu upoštevam izračunano vrednost za plastično momentno nosilnost prečke $M_{pl,Rd,b}$. Razdalja $d_{h,j}$ predstavlja lokacijo nastanka plastičnega členka. Skladno z ameriškim standardom ANSI/AISC 358-10 [2], za izbrano vrsto spoja privzamem, da se plastični členek pojavi na koncu ojačitve priključne pločevine (3).

Prečna sila na mestu plastičnega členka, ki nastopa v enačbi (2) je sestavljena iz dveh komponent, in sicer $V_{h,G}$, ki je posledica koristne obtežbe stavbe in $V_{h,M}$, ki uravnoveša plastični moment $M_{pl,Rd,b}$.

$$M_{pl,Rd,b} = \frac{W_{pl,y,b} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2194 \text{ cm}^3 \cdot 23,5 \text{ kN}}{1,0 \text{ cm}^2} = 515,59 \text{ kNm} \quad (1)$$

(2)

$$M_{Rd,b}^{1-1} = M_{pl,Rd,b} + V_h \cdot d_{h,j} = 515,59kNm + 357,67kN \cdot 0,23m = 597,85kNm$$

$$d_{h,j} = b_o + t_p = 200mm + 30mm = 230mm \quad (3)$$

$$V_h = V_{h,G} + V_{h,M} = \frac{q \cdot (l - 2 \cdot d_{h,j})}{2} + \frac{2 \cdot M_{pl,Rd,b}}{(l - 2 \cdot d_{h,j})} \quad (4)$$

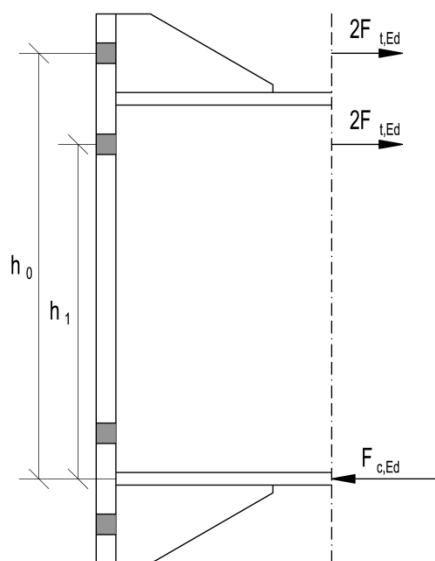
$$= \frac{60,0 \frac{kN}{m} \cdot (7,5m - 2 \cdot 0,23m)}{2} + \frac{2 \cdot 515,59kNm}{(7,5m - 2 \cdot 0,23m)} = 357,67kN$$

Skladno s točko 5.4.2 spoj dimenzioniram na dodatno nosilnost, zato zahtevano projektno odpornost spoja v prerezu 1-1 določim z izrazom (5) pri čemer je $M_{Rd,j}^{1-1}$ projektna odpornost spoja, γ_{ov} pa faktor dodatne nosilnosti materiala, ki je enak 1,25 (SIST EN 1998-1 [4]). Produkt je pomnožen še s faktorjem 1,1, ki skladno s slovenskimi predpisi upošteva utrepanje materiala ob cikličnem obremenjevanju.

$$M_{Rd,j}^{1-1} = 1,1 \cdot \gamma_{ov} M_{Rd,b}^{1-1} = 1,1 \cdot 1,25 \cdot 597,85kNm = 822,05kNm \quad (5)$$

KORAK 2: Določitev vijakov

Predpostavim razporeditev vijakov in obtežbe kot jo prikazuje slika 18. Podane so vrednosti za označene razdalje.



Slika 18: Razporeditev vijakov - vertikalno

$$h_0 = 542mm$$

$$h_1 = 426mm$$

Postopek predpisan v ANSI/AISC 358-10 [2] predpostavlja enako silo v zgornjih dveh vrstah vijakov. Ta predpostavka je poenostavitev določanja plastične razporeditve obtežbe na vijake in je posledica upoštevanja togosti čelne pločevine. V enačbi, ki jo podaja omenjeni standard, je za določanje potrebnega prereza vijaka upoštevana karakteristična nosilnost vijakov. Da je moj izračun skladen z evrokodi, je v izračunu upoštevana projektna nosilnost.

Projektna natezna sila v zgornjih dveh vrstah vijakov mora uravnovesiti projektni moment v spoju in je določena z izrazom (6). Silo, ki jo dopustim v vijakih je natezna odpornost vijaka

skladno s slovenskimi predpisi (7). Iz pogoja, da mora biti odpornost vijaka večja od obremenitve tako izrazim potreben prerez vijaka A_s (8).

$$F_{t,Ed} = \frac{M_{Rd,j}^{1-1}}{2(h_0 + h_1)} = \frac{822,05kNm}{2(0,542m + 0,426m)} = 424,61kN \quad (6)$$

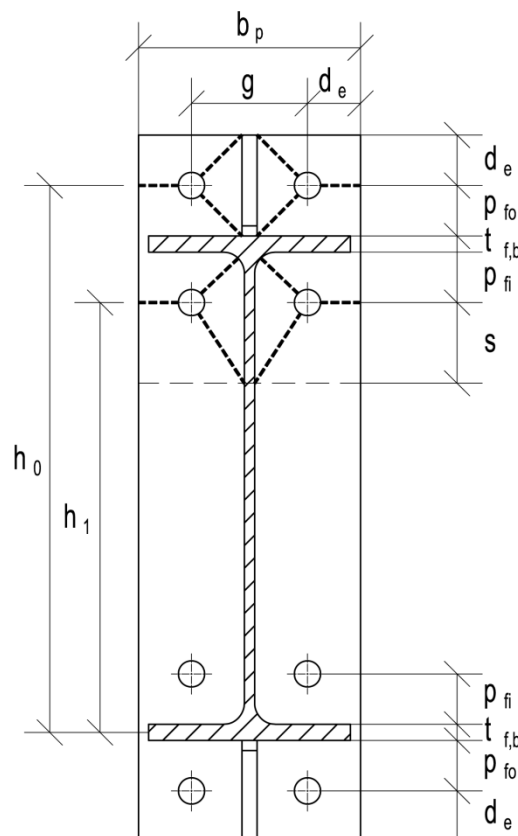
$$F_{t,Rd} = 0,9 \cdot A_s \frac{f_{ub}}{\gamma_{M2}} \quad (7)$$

$$A_s \geq \frac{F_{t,Ed} \cdot \gamma_{M2}}{0,9 \cdot f_{ub}} = \frac{424,61kN \cdot 1,25}{0,9 \cdot 100 \frac{kN}{cm^2}} = 5,89cm^2 \quad (8)$$

Na podlagi izračunanega potrebnega prereza vijaka (8) odčitam iz priročnika (Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih, Pr. 33 [5]) potreben premer vijaka z ustreznim prerezom skozi navoje in tako **izberem vijake M33**.

KORAK 3: Določitev priključne pločevine

Za določitev priključne najprej izberem razporeditev vijakov po priključni pločevini. Razporeditev prikazuje slika 19, pod sliko pa so podane tudi vrednosti uporabljenih razdalj.



Slika 19: Razporeditev vijakov - horizontalno

$$d_e = 50mm$$

$$p_{fo} = 50mm$$

$$p_{fi} = 50mm$$

$$g = 115mm$$

Debelino priključne pločevine določim na podlagi teorije porušnih mehanizmov. Gre za princip po katerem upoštevam nastanek plastičnih linij po pločevini, ki je preko vijakov lokalno upogibno obremenjena. Izbrana priključna pločevina mora torej omogočati nastanek verige plastičnih linij od luknje do roba pločevine in s tem prerazporejanje obtežbe na vijake.

V izrazu (9) za določitev potrebne debeline priključne pločevine nastopa parameter porušne linije, ki je določen v enačbi (10). Parameter Y_p je določen na podlagi virtualnega dela pri katerem izenačimo notranje delo v pločevini ob deformaciji in zunanje delo, ki ga povzroča momentna obtežba. Omenjeni parameter ameriški standard podaja za različne konfiguracije spoja, zato izberem ustrezno geometrijo in končno po izrazu (9) določim potrebno debelino pločevine, ki bo ustrezala zgoraj opisanim zahtevam. V enačbi nastopa faktor 1,11, ki omeji silo, ki se prenese na vijake na 90% njihove natezne odpornosti.

$$t_{p,potr} \geq \sqrt{\frac{1,11 \cdot M_{Ra,j}^{1-1}}{\gamma_{M0} \cdot f_y \cdot Y_p}} = \sqrt{\frac{1,11 \cdot 82205 \text{ kNcm}}{1,0 \cdot 23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 499,6 \text{ cm}}} = 2,78 \text{ cm} \quad (9)$$

$$Y_p = \frac{b_p}{2} \left[h_1 \left(\frac{1}{p_{fi}} + \frac{1}{s} \right) + h_0 \left(\frac{1}{p_{fo}} + \frac{1}{2s} \right) \right] + \frac{2}{g} [h_1(p_{fi} + s) + h_0(d_e + p_{fo})] \quad (10)$$

$= 499,60 \text{ cm}$

Ustrezna priključna pločevina mora biti debeline najmanj $28,1 \text{ mm}$, zato **izberem debelino pločevine $t_p = 30 \text{ mm}$.**

KORAK 4: Določitev rebra

Potrebno debelino rebra ameriški standard ANSI/AISC 358-10 [2] podaja v odvisnosti od debeline stojine prečke in kvalitete uporabljenih materialov. Začetno oceno za potrebno debelino torej določim z izrazom:

$$t_o \geq t_{w,b} \left(\frac{f_{y,b}}{f_{y,o}} \right) = 1,02 \text{ cm} \cdot \left(\frac{23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} \right) = 1,02 \text{ cm} \quad (16)$$

pri čemer sta:

$f_{y,b}$... napetost tečenja materiala prečke

$f_{y,o}$... napetost tečenja materiala rebra

V mojem primeru sta kvaliteti uporabljenih materialov, kar tudi ustreza praktični uporabi, kjer se navadno dobavlja ena kvaliteta jekla za celotno konstrukcijo. Iz tega sledi, da mora biti torej debelina ojačitve vsaj tako velika kot je debelina stojine prečke. Ker sem tako debelino določila že na začetku, **izberem debelino rebra $t_o = 15 \text{ mm}$.**

Rebro mora izpolnjevati pogoj vsaj za 3. razred kompaktnosti, da ostanem v okvirjih potresno odpornega projektiranja. Kontrolo in vrednost za faktor ε povzamem po priročniku (Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih, Pr. 3-9 [5]) za previsne dele pasnic, obremenjene s čistim tlakom:

$$\frac{h_o}{t_o} \leq 14 \cdot \varepsilon$$

$$\frac{100\text{mm}}{15\text{mm}} \leq 14 \cdot 1,0 \quad (17)$$

$$6,67 \leq 14,0$$

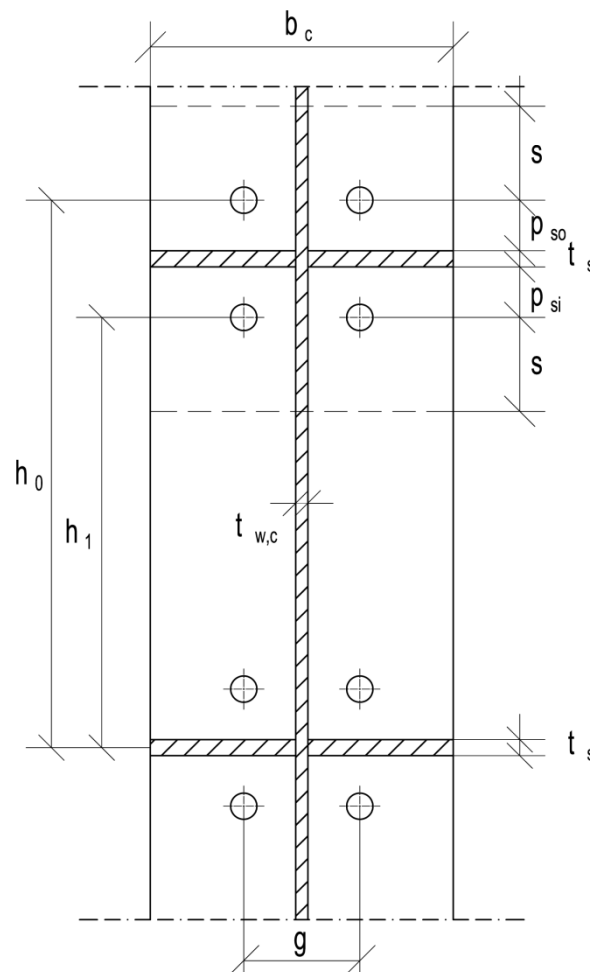
Neenačba (17) pokaže, da v mojem primeru ojačitveno rebro izpolnjuje pravzaprav pogoj za 1. razred kompaktnosti.

6.6.2. Dimenzioniranje na strani stebra

Na strani stebra najprej določim potrebno debelino pasnice, nato pa določim potrebni ojačitvi v stojini stebra zaradi lokalnega vnosa tlačne sile in zaradi velike strižne obremenitve panela stojine stebra.

KORAK 1: Potrebna debelina pasnice

Debelina pasnice mora zagotavljati zadostno upogibno nosilnost, ki jo podobno kot upogibno nosilnost priključne pločevine določim s pomočjo parametra porušnega mehanizma (Y_c) ki ga podaja ameriški standard ANSI/AISC 358-10 [2] za ojačan spoj s 4 vrstami vijakov. Upoštevano geometrijo prikazuje slika 20.



Slika 20: Razporeditev lukenj na stebri

$$\begin{array}{ll} p_{so} = 50mm & h_0 = 542mm \\ p_{si} = 50mm & h_1 = 426mm \\ g = 115mm & t_s = 25mm \end{array}$$

Predpostavim, da bom potrebovala rebra v stebru in zato izberem temu primeren izraz za določitev parametra Y_c (18), ki ima enako vlogo, kot parameter Y_p pri izračunu potrebne debeline priključne pločevine. Nato analogno izračunu potrebne debeline priključne pločevine izračunam potrebno debelino pasnice stebra (19).

$$Y_c = \frac{b_c}{2} \left[h_1 \left(\frac{1}{p_{si}} + \frac{1}{s} \right) + h_0 \left(\frac{1}{p_{so}} + \frac{1}{s} \right) \right] + \frac{2}{g} [h_1(p_{si} + s) + h_0(s + p_{so})] = 721,06cm \quad (18)$$

$$t_{f,c} \geq \sqrt{\frac{1,11 \cdot M_{Rd,j}^{1-1}}{\gamma_{M0} \cdot f_y \cdot Y_c}} = \sqrt{\frac{1,11 \cdot 82205kNcm}{1,0 \cdot 23,5 \frac{kN}{cm^2} \cdot 721,06cm}} = 2,32cm \quad (19)$$

Pasnica izbranega stebra HEM 360 je debela 40mm, kar torej zadosti pogoju v neenačbi (19).

KORAK 2: Določitev lokalne tlačne sile

Merodajno lokalno tlačno silo, na katero bom kasneje dimenzionirala potrebno ojačitveno rebro, izbiram med tremi silami, ki bi lahko nastopile v tlačeni coni. Prva sila (20) je tlačna sila, ki bi nastopila ob polni izkoriščenosti upogibne nosilnosti pasnice stebra. Druga možna sila (21) je tista ob polni izkoriščenosti upogibne nosilnosti priključne pločevine in tretja (22) bi nastopila ob izkoriščenosti vijakov.

Izberem silo, ki jo dobim ob izkoriščenosti vijakov, saj se torej zaradi omejitve nosilnosti vijakov več kot toliko sile ne more lokalno aplicirati na pasnico stebra. Torej nadalje upoštevam lokalno tlačno silo (23), ki je najmanjša od izračunanih treh.

$$F_{c,Ed}^1 = \frac{f_y \cdot Y_c \cdot t_{f,c,dej}^2}{(h_b - t_{f,b})} = \frac{23,5 \frac{kN}{cm^2} \cdot 721,06cm \cdot 4^2 cm^2}{(50,0cm - 1,6cm)} = 5601,62kN \quad (20)$$

$$F_{c,Ed}^2 = \frac{f_y \cdot Y_p \cdot t_p^2}{(h_b - t_{f,b})} = \frac{23,5 \frac{kN}{cm^2} \cdot 499,60cm \cdot 3,0^2 cm^2}{(50,0cm - 1,6cm)} = 2183,17kN \quad (21)$$

$$F_{c,Ed}^3 = F_{t,Rd}^{M33,10.9} = 499,7kN \cdot 4 = 1998,80kN \quad (22)$$

$$F_{c,Ed} = \min(F_{c,Ed}^1, F_{c,Ed}^2, F_{c,Ed}^3) = 1998,80kN \quad (23)$$

KORAK 3: Določitev lokalne tlačne nosilnosti stojine

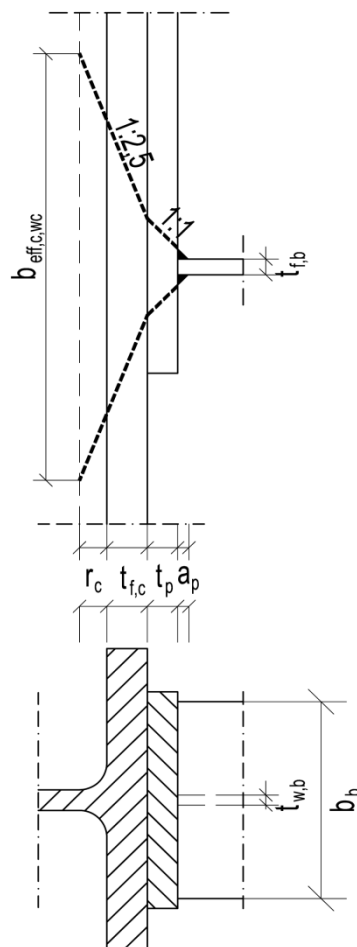
Nosilnost neojačane stojine v tlaku določim skladno z SIST EN 1993-1-8 [1]z izrazom 6.2.6.2 (24). Nosilnost je torej poleg debeline stojine stebra $t_{w,c}$ in seveda napetosti tečenja f_y , odvisna še od štirih parametrov. Prvi parameter ω zajema vpliv interakcije s strigom. Enačbo, ki ga določa, je odvisna od lokacije spoja, torej upoštevana je lokacija obravnavanega spoja

kot ga prikazuje slika 16 (stik zunanjega stebra in prečke). V enačbi nastopata sodelujoča širina raznosa točkovne sile v stojino v tlaku (26) in strižni prerez stebra (29). Drugi parameter k_{wc} je redukcijski faktor, ki zajema vpliv velikih normalnih tlačnih napetosti v stojini, ki je enak 1,0 (SIST EN 1993-1-8 [1] odstavek 6.2.6.2(2)). Redukcijski faktor pri lokalnem izbočenju pločevin ρ (30) je tretji in je enak 1,0, ker ni nevarnosti lokalnega izbočenja, ker je vitkost prereza $\bar{\lambda}_p$ (31) manjša od vrednosti 0,72. Zadnji je tudi direktno sodelujoča širina raznosa točkovne sile v stojino v tlaku $b_{eff,c,wc}$ (26) prikazana na sliki 21, za določitev katere potrebujem zaokrožitev med pasnico in stojino stebra (28) in debelino zvara med pasnico prečke in priključno pločevino (27).

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega \cdot k_{wc} \cdot \rho \cdot b_{eff,c,wc} \cdot t_{w,c} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,70 \cdot 1,0 \cdot 1,00 \cdot 44,27 \text{ cm} \cdot 2,1 \text{ cm} \cdot 23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,0} = 1529,31 \text{ kN} \quad (24)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 \cdot \left(\frac{b_{eff,c,wc} \cdot t_{w,c}}{A_{vc}}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 \cdot \left(\frac{44,27 \text{ cm} \cdot 1,1 \text{ cm}}{102,60 \text{ cm}^2}\right)^2}} = 0,70 \quad (25)$$

$$\begin{aligned} b_{eff,c,wc} &= t_{f,b} + 2\sqrt{2} \cdot a_p + 5(t_{f,c} + r_c) + 2 \cdot t_p \\ &= 16 \text{ mm} + 2\sqrt{2} \cdot 11,2 \text{ mm} + 5 \cdot (40 \text{ mm} + 27 \text{ mm}) + 2 \cdot 30 \text{ mm} \\ &= 44,27 \text{ cm} \end{aligned} \quad (26)$$



Slika 21: Sodelujoča širina stojine v stebru

$$a_p = 0,7 \cdot \min(t_{f,b}, t_p) = 0,7 \cdot 16\text{mm} = 11,2\text{mm} \quad (27)$$

$$r_c = 27\text{mm} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} A_{vc} &= A_c - 2 \cdot b_c \cdot t_{f,c} + (t_{w,c} + 2 \cdot r_c) \cdot t_{f,c} \\ &= 319\text{cm}^2 - 2 \cdot 30,8\text{cm} \cdot 4,0\text{cm} + (2,1\text{cm} + 2 \cdot 2,7\text{cm}) \cdot 4,0\text{cm} \\ &= 102,60\text{cm}^2 \end{aligned} \quad (29)$$

$$\rho = 1,0 \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_p &= 0,932 \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc} (h_c - 2 \cdot (t_{f,c} + r_c)) \cdot f_y}{E \cdot t_{w,c}^2}} \\ &= 0,932 \sqrt{\frac{44,27\text{cm} \cdot (39,5\text{cm} - 2 \cdot (4,0\text{cm} + 2,7\text{cm})) \cdot 23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 2,1^2 \text{cm}^2}} = 0,50 \end{aligned} \quad (31)$$

KORAK 4: Določitev potrebne prečne ojačitve

Debelino rebra mi določa zahteva po 3. razredu kompaktnosti (32). Razdalja c (33) je širina rebra zmanjšana za debelino zvara (34) in je prikazana na sliki 20. Neenačba (35) pokaže, da mora biti debelina ojačitve večja od $13,9\text{mm}$.

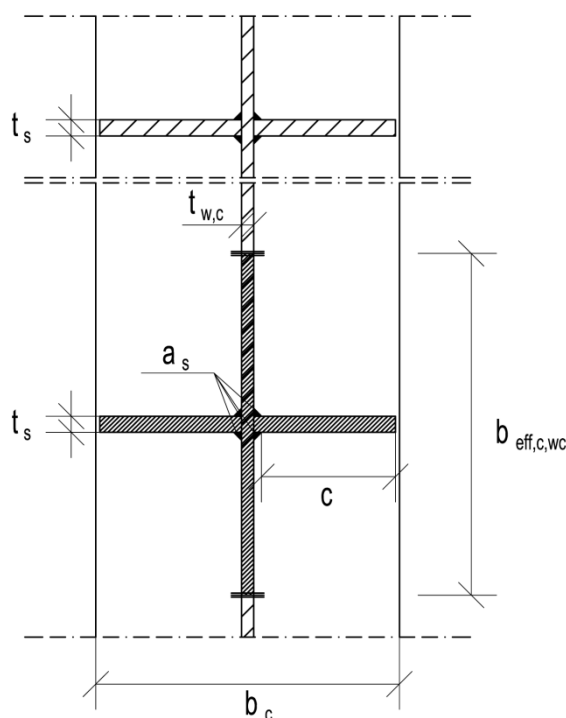
$$\frac{c}{t_s} \leq 9 \cdot \varepsilon \quad (32)$$

$$c = b_s - a_s = 140\text{mm} - 14,7\text{mm} = 125,3\text{mm} \quad (33)$$

$$a_s = 0,7 \cdot t_{w,c} = 0,7 \cdot 11\text{mm} = 14,7\text{mm} \quad (34)$$

$$t_s \geq \frac{c}{9 \cdot \varepsilon} = \frac{125,3\text{mm}}{9 \cdot 1,0} = 13,9\text{mm} \quad (35)$$

Preverim še nosilnost ojačanega dela prereza. Upoštevam, da lokalno tlačno silo prevzame stojina na efektivni dolžini $b_{eff,c,wc}$ in rebra na obeh straneh stojine. Efektivni prerez prikazuje slika 22.



Slika 22: Efektivni prerez v tlačeni coni

Z enačbo (36) določim nosilnost ojačanega dela prereza v tlačeni coni, pri čemer predpostavim debelino rebra $t_s = 25\text{mm}$. Tako debelo pločevino izberem zato, ker mi prispeva tudi k strižni nosilnosti panela, za katerega predvidevam, da bo kritičen. Taka debelina rebra tudi zadosti pogoju v neenačbi (37), ki zahteva, da je lokalna tlačna sila določena v drugem koraku dimenzioniranja na strani stebra manjša od izračunane nosilnosti. Torej, **izberem debelino rebra $t_s = 25\text{mm}$.**

$$F_{c,Rd} = (b_{eff,c,wc}t_{w,c} + 2 \cdot b_s t_s) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (36)$$

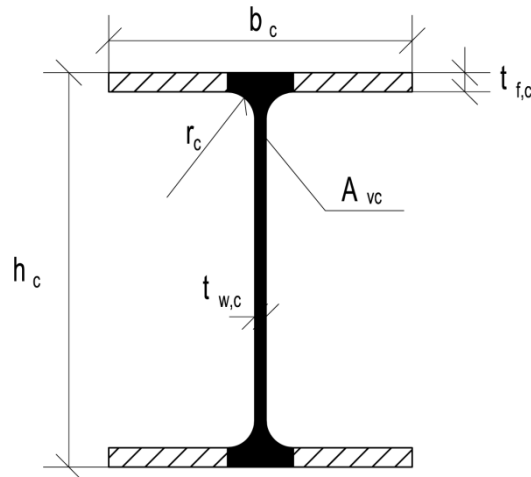
$$= (44,27\text{cm} \cdot 2,1\text{cm} + 2 \cdot 14,0\text{cm} \cdot 2,5\text{cm}) \cdot \frac{23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,0} = 3829,72\text{kN}$$

$$F_{c,Ed} \leq F_{c,Rd} \quad (37)$$

$$1998,80\text{ kN} < 3829,72\text{kN}$$

KORAK 5: Določitev strižne nosilnosti panela stojine stebra

Strižna nosilnost neojačanega panela stojine je določena z izrazom (38). Odvisna je od strižnega prereza stebra A_{cv} , ki je oslabiljen za prispevek prostega dela pasnic (39) in ga prikazuje slika 23.



Slika 23: Strižni prerez stebra

$$V_{w,pl,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_y \cdot A_{vc}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{0,9 \cdot 23,5 \frac{kN}{cm^2} \cdot 102,60 cm^2}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 1252,84 kN \quad (38)$$

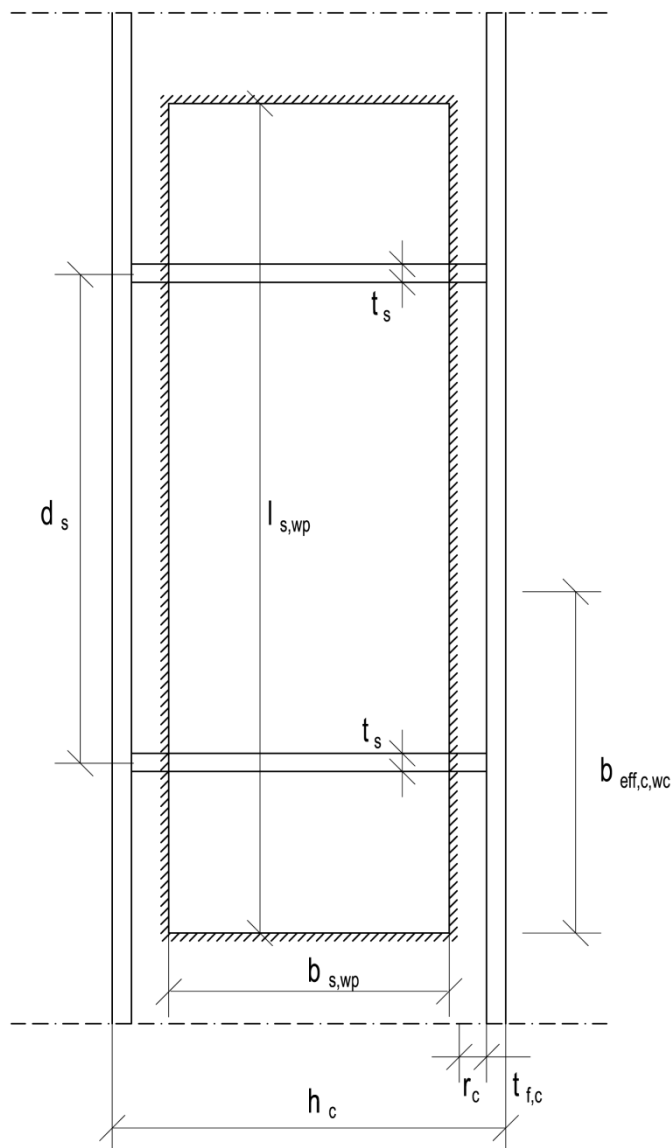
$$\begin{aligned} A_{vc} &= A_c - 2 \cdot b_c \cdot t_{f,c} + (t_{w,c} + 2 \cdot r_c) \cdot t_{f,c} \\ &= 319 cm^2 - 2 \cdot 30,8 cm \cdot 4,0 cm + (2,1 cm + 2 \cdot 2,7 cm) \cdot 4,0 cm \\ &= 102,60 cm^2 \end{aligned} \quad (39)$$

Standard SIST EN 1993-1-8 [1] dovoljuje, da v primeru, da so v stebri ojačitvena rebra, nosilnost povečam za $V_{w,add,Rd}$ (40). Pri tem je $M_{pl,fc,Rd}$ plastična upogibna nosilnost pasnice stebra in je določena z izrazom (41), $M_{pl,sc,Rd}$ je plastična upogibna nosilnost prečne ojačitve, d_c pa je osna razdalja med ojačitvama ter je prikazana na sliki 24.

$$\begin{aligned} V_{w,add,Rd} &= \frac{2 \cdot M_{pl,fc,Rd} + 2 \cdot M_{pl,sc,Rd}}{d_s} = \frac{2 \cdot 2895,20 kNcm + 2 \cdot 1028,13 kNcm}{48,4 cm} \\ &= 162,12 kN \end{aligned} \quad (40)$$

$$M_{pl,fc,Rd} = \frac{b_c \cdot t_{f,c}^2}{4} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{30,8 cm \cdot 4,0^2 cm^2}{4} \cdot \frac{23,5 \frac{kN}{cm^2}}{1,0} = 2895,20 kNcm \quad (41)$$

$$M_{pl,sc,Rd} = \frac{2 \cdot b_s \cdot t_s^2}{4} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2 \cdot 14 cm \cdot 2,5^2 cm^2}{4} \cdot \frac{23,5 \frac{kN}{cm^2}}{1,0} = 1028,13 kNcm \quad (42)$$



Slika 24: Strižna ojačitev stojine stebra

Skupna strižna nosilnost panela stojine stebra $V_{wp,Rd}$ (43) je torej vsota nosilnosti določenih z izrazoma (38) in (40). Ker je nosilnost manjša od lokalne sile, ki je določena z izrazom (23) bom potrebovala strižno ojačitev stojine, katero predvideva že slika 24.

$$V_{wp,Rd} = V_{w,pl,Rd} + V_{wp,add,Rd} = 1252,84kN + 162,12kN = 1414,96kN \quad (43)$$

KORAK 6: Določitev strižne ojačitve

Silo na katero dimenzioniram strižno ojačitev stojine stebra je določena z izrazom (44) in je razlika med lokalno tlačno silo (23) in strižno nosilnostjo panela stojine (42). Nato določim prerez strižne ojačitve $A_{s,wp}$ (45). Prerez je določen skladno s SIST EN 1993-1-8 6.2.6.1.(6), ki dovoljuje da strižni prerez stebra povečam zgolj za eno debelino stojine. Širina ojačitve je določena kot ravno območje stojine (brez zaokrožitev) zmanjšano za 15mm na vsaki strani zato, da omogočim varjenje. Odpornost ojačanega strižnega prereza panela (47) je manjša od sile določene z izrazom (44), zato v stebri dimenzioniram še diagonalno ojačitev. [1]

$$F_{s,wp,Ed} = F_{c,Ed} - V_{wp,Rd} = 1998,80kN - 1414,96kN = 583,84kN \quad (44)$$

$$A_{s,wp} = t_{f,c} \cdot b_{s,wp} = 2,1cm \cdot 23,1cm = 48,51cm^2 \quad (45)$$

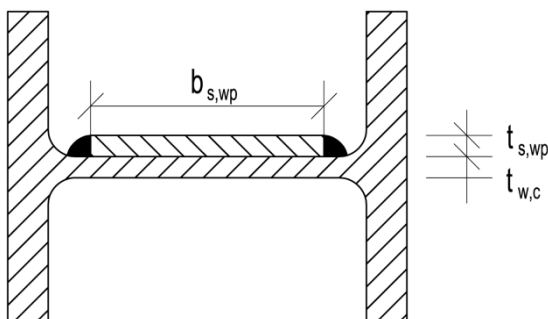
$$b_{s,wp} = h_c - 2 \cdot (t_{f,c} + r_c + 10mm) = 395mm - 2 \cdot (40mm + 27mm + 15mm) = 231mm \quad (46)$$

$$V_{s,wp,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_y \cdot A_{s,wp}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{0,9 \cdot 23,5 \frac{kN}{cm^2} \cdot 48,51cm^2}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 592,35kN \quad (47)$$

$$V_{w,pl,Rd,o} = V_{wp,Rd} + V_{s,wp,Rd} = 1414,96kN + 592,35kN = 2007,31kN \quad (48)$$

$$\begin{aligned} F_{c,Ed} &\leq V_{w,pl,Rd,o} \\ 1998,80kN &< 2007,31kN \end{aligned} \quad (49)$$

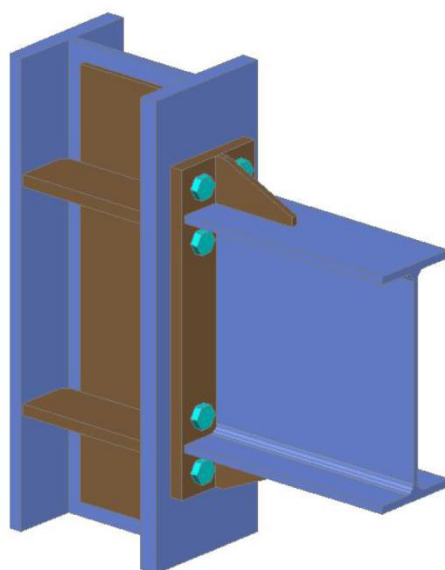
Maksimalna debelina strižne ojačitve, ki jo smem uporabiti v izračunu je enaka debelini stojine stebra (Slika 25). Kot pokaže enačba (47), je sila, ki jo lahko taka strižna ojačitev prevzame večja od viška sile, ki ga s prečnimi ojačitvami ojačan steber ne more prevzeti. Torej, **izberem debelino strižne ojačitve $t_{s,wp} = 21mm$.**



Slika 25: Prerez strižno ojačanega stebra

Strižna nosilnost panela stojine ojačanega s prečnimi ojačitvami in strižno ojačitvijo (48) je večja od lokalne tlačne obremenitve (23). Da ojačan steber lahko prevzame lokalno obtežbo torej dokazuje neenačba (49).

Nazadnje podajam še 3D dispozicijo (Slika 26) spoja kot sem ga dimenzionirala. Model je narisano v pravem razmerju.



Slika 26: 3D dispozicija spoja

7 ZAKLJUČKI IN UGOTOVITVE

V diplomski nalogi sem se seznanila s polno nosilnimi spoji in različnimi možnostmi za njihovo izvedbo. Prvi del naloge je splošen in v njem je podanih nekaj splošnih informacij o spojih. Razložene so okoliščine v katerih uporabljamo polno nosilne spoje ter prednosti in slabosti njihove uporabe. V prvem delu gre torej za pregled slovenske literature s področja polno nosilnih spojev.

V srednjem delu naloge je opisanih 6 različnih vrst izvedb polno nosilnih spojev. Spoj z oslavljenim prerezom prečke je namenjen predvsem spojem, kjer želimo natančno določiti lokacijo nastanka velikih neelastičnih deformacij, hkrati pa tudi zmanjšuje momentno obtežbo na samem stiku stebra in prečke. Vijačni spoj s čelno pločevino je en najbolj uporabljenih spojev v praksi, ki zagotavlja razvoj plastičnega členka v prečki. Dodatno ojačitveno rebro priključne pločevine povečuje njeno togost, hkrati pa prestavi lokacijo plastičnega členka stran od konkretnega stika prečke in stebra. Vijačni spoj preko pasnic prečke je spoj, ki preverjeno omogoča največje rotacije brez krhkih porušitev. To je posledica nastanka mehanizmov porušitve, ki se tvorijo eden za drugim z naraščanjem obtežbe. Spoj je en najbolj kompleksih za dimenzioniranje ravno zaradi tega, ker je potrebno upoštevati več porušnih mehanizmov. Varjeni spoj je sicer po obnašanju podoben spoju z oslavljenim prerezom prečke, le da v tem premeru nastanek plastičnega členka ni odmaknjen od roba prečke. Tipski izračun je precej enostaven, zelo pomembna pa je kvalitetna in natančna izvedba. V vijačenem spoju s kotniki je glavna naloga projektanta določitev obtežbe na spoj, ki potem določa izbiro tipskega "Kaiser" kotnika, ostalim kontrolam nato spoj zadosti. Poseben problem predstavljajo spoji s priključevanjem na škatlast profil stebra, saj je tu glavni problem pri montaži zaradi onemogočenega vijačenja. V ta namen se uveljavljajo spoji z uporabo diafragem, ki predstavljajo priključno pločevino. Dodajajo se tudi dodatne pločevine za ojačitev sten škatlastih profilov.

Za opis možnih izvedb spojev sem pregledala velik delež tuje literature, ki se s konkretnim problemom reševanja polno nosilnih spojev ukvarja z velikim številom raziskav. Raziskave, katere rezultate sem pregledala (ANSI/AISC 358-10 [2]), sicer v večini omenjenih spojev pokažejo tudi pojav plastičnih deformacij v strižnem panelu stojine stebra. Nastanek teh deformacij pa ni v skladu s potresnim načrtovanjem nosilnosti, po katerem varujemo stebre z namenom preprečevanja globalne porušitve in nastanka mehke etaže. Kljub temu vsi poskusi pokažejo, da nastale deformacije niso imele vpliva na globalno nosilnost stebra.

Poskusi (ANSI/AISC 358-10 [2]) so pokazali negativni vpliv interakcije etažne plošče in nosilca. Plošča poveča obremenitve na spoj in lokalno ob spojih povzroči premik nevtralne osi. Zaradi tega lahko pride do povečanja sil v vijakih in posledično do krhke porušitve. So pa seveda plošče v teh primerih služile ugodno kot bočna podpora nosilcem, ki so sploh v bližini razvoja plastičnega členka močno podvrženi izbočitvam. Menim da to področje ponuja še veliko možnosti za raziskovanje in odkrivanje možnih izboljšav.

Zanimivo pa bilo tudi raziskovanje nosilnosti stebrov, ki bi bili upogibno obremenjeni okrog šibke osi. Stebri v omenjenih preizkusih, so namreč vsi zagotavljali dovolj velike nosilnosti, ker so bili upogibno obremenjeni okrog močne osi.

Zadnji del diplomske naloge prikazuje postopek izračuna vijačnega spoja preko priključne pločevine. V izračunu sem ugotovila, da je dimenzioniranje na strani prečke, dokler sledimo korakom, ki jih podaja navedena literatura, dokaj preprosto. Najbolj zanimivo je dimenzioniranje priključne pločevine (in kasneje po istem postopku tudi dimenzioniranje pasnice stebra), saj sem spoznala metodo porušnih linij. Gre za to, da po slovenskih standardih plastifikacijo priključne pločevine zaradi upogibne obremenitve določamo z nadomestnim T-elementom. Gre za "namišljen" T-element, ki ima enake karakteristike kot dejanski del spoja, ki ga kontroliramo. Postopek v ANSI/AISC 358-10 [2] je drugačen v tam pogledu, da so parametri izpeljani za tipske primere spojev in tako bistveno pohitrijo postopek računa.

Tudi na strani stebra si koraki za dimenzioniranje sledijo povsem logično in precej enostavno, težava se je pokazala ravno strižnih obremenitvah. Sicer potrebno debelino pasnice in s tem zelo masiven profil določa že prva kontrola – kontrola upogibne nosilnosti pasnice, ampak potreba po masivnem stebri se pokaže tudi pri dimenzioniranju strižnega panela stojine. Kar se tiče upogibne nosilnosti pasnice stebra bi jo lahko povečali z uporabo podložk ali dodatne pločevine na notranji strani stebra, ampak bi bilo temu primerno potrebno izpeljati izraze, ki bi upoštevali dejanski potek porušnih linij po teh dodatnih pločevinah. Precej velik problem pa nastane, če želimo popolnoma preprečiti neelastične deformacije v strižnem panelu (z upoštevanjem dodatne nosilnosti). V mojem računskem primeru sem problem rešila z izbiro debelih prečnih ojačitev stebra, ki pripomorejo tudi k strižni nosilnosti panela. Zavedam se, da kontrola ne bi bila izpolnjena, če bi obravnavala notranji steber, ki bi bil obremenjen z dveh strani in bi tako njegova strižna obremenitev zanašala kar 2-krat toliko kot znaša pri zunanjem stebri. Možna rešitev za to je namestitev še diagonalne strižne ojačitve, ampak lahko le ta povzroči težave pri vijačenju spodnjih vijakov. Namestimo lahko še zunanje pločevine vzporedne s stojino stebra, ki so varjene na pasnici. Taka ojačitev spoja zahteva vertikalno varjenje na gradbišču, kar ni preveč zeleno s stališča zagotavljanja kvalitetnih zvarov. Najbolj elegantna rešitev bi bila verjetno namestitev močnejšega profila v območju spoja. Torej, v območju spoja, bi v steber že v delavnici privarili profil z debelejšimi pasnicami in stojino.

Možnih rešitev je gotovo še več, vse pa bi bilo zelo koristno in zanimivo podkrepiti z dejanskimi preizkusi. Vse možne rešitve, ki jih navajam, pa bi v končnem pripeljale do vprašanja ekonomske upravičenosti in izvedljivosti, kar pa že presega meje obsega moje diplomske naloge.

VIRI

- [1] SIST EN 1993-1-8, Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-8. del: Projektiranje spojev
- [2] ANSI/AISC 358-10, An American National Standard: Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications
- [3] ANSI/AISC 341-10, An American National Standard: Seismic Provisions for Structural Steel Buildings
- [4] SIST EN 1998-1, Evrokod 8: Projektiranje potresno-odpornih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe
- [5] Beg, D., Pogačnik, A. 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po Evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije
- [6] SIST EN 1993-1-1, Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe
- [7] Alostaz, Y. M., Schneider, S. P. 1996. Connections to concrete-filled steel tubes. U.S.A., Urbana, Illinois, Department of Civil Engineering, university of Illinois at Urbana-Champaign

OSTALI VIRI

Joints in Steel Construction Moment Connections. 1995. Ascot, Berks, Silwood Park, The Steel Construction Institute

Borgsmiller, J. 1995. Simplified method for design of moment end-plate connections. Master of science thesis. Blacksburg, State University, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute. 198 p.