

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:

Zupanc, M., 2016. Projektiranje lesene brvi čez avtocesto A2 na odseku Kranj Vzhod - Brnik. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Lopatič, J.): 94 str.

Datum arhiviranja: 21-09-2016

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Zupanc, M., 2016. Projektiranje lesene brvi čez avtocesto A2 na odseku Kranj Vzhod - Brnik. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Lopatič, J.): 94 pp.

Archiving Date: 21-09-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

**UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
KONSTRUKCIJSKA SMER**

Kandidatka:

MAŠA ZUPANC

**PROJEKTIRANJE LESENE BRVI ČEZ AVTOCESTO A2
NA ODSEKU KRANJ VZHOD - BRNIK**

Diplomska naloga št.: 3502/KS

**DESIGN OF TIMBER FOOTBRIDGE ACROSS
HIGHWAY A2 ON THE SECTION KRANJ EAST -
BRNIK**

Graduation thesis No.: 3502/KS

Mentor:

izr. prof. dr. Jože Lopatič

Ljubljana, 15. 09. 2016

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
----------------	------------------	---------	--------

IZJAVE

Spodaj podpisana **MAŠA ZUPANC**, vpisna številka 26108659, avtorica pisnega zaključnega dela študija z naslovom »**Projektiranje lesene brvi čez avtocesto A2 na odseku Kranj vzhod - Brnik**«.

IZJAVLJAM

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*
 - a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
 - b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;
5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V: _____

Datum: _____

Podpis študentke:

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.21:625.04(497.4)(043.2)
Avtor:	Maša Zupanc
Mentor:	izr. prof. dr. Jože Lopatič
Naslov:	Projektiranje lesene brvi čez avtocesto A2 na odseku Kranj vzhod - Brnik
Tip dokumenta:	Diplomska naloga - Univerzitetni študij
Obseg in oprema:	94 str., 58 pregl., 68 sl., 189 en.
Ključne besede:	leseni lepljeni nosilec, jekleni profil, vezna sredstva, statična analiza, dimenzioniranje elementov

Izveček:

Diplomska naloga obravnava projektiranje lesene brvi za pešce in kolesarje čez avtocesto A2 na odseku Kranj vzhod – Brnik. V izhodišču so predstavljene osnovne značilnosti lesenih mostov ter okvirna navodila za projektiranje kolesarskih površin. V nadaljevanju je predstavljena zasnova predmetnega mostu ter glavne značilnosti izbranih materialov. Diplomska naloga nato obravnava glavne obtežbe na konstrukcijo, njihove kombinacije in razporeditve na štirih med seboj povezanih modelih, pripravljenih s programom SAP2000. Na podlagi dobljenih notranjih sil je bilo nato izvedeno dimenzioniranje posameznih elementov in njihovih priključkov.

Za primarno nosilno konstrukcijo brvi sta bila izbrana dva lesena lepljena nosilca dimenzij 40/180 cm trdnostnega razreda GL28h. V prečni smeri primarna nosilca povezuje 23 jeklenih okvirov kvalitete S355, pozicioniranih na medsebojni razdalji 3 m. V horizontalni smeri z jeklenim vroče valjanim profilom HEB200, v vertikalni smeri pa z dvema profiloma HEB200. Za prevzem obremenitev v prečni smeri so, v kombinaciji z jeklenimi nosilci, predvidene jeklene diagonale premera 20 mm in kvalitete S235. Sekundarno nosilno konstrukcijo predstavlja pet lesenih lepljencev, dimenzij 24/26 cm, pozicioniranih na medsebojni osni razdalji 0,59 m. Povožno oz. pohodno površino sestavljajo podnice iz hrastovega lesa prečnega prereza 20/12 cm.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 624.21:625.04(497.4)(043.2)
Author: Maša Zupanc
Supervisor: assoc. prof. Jože Lopatič, Ph. D.
Title: Design of timber footbridge across highway A2 on the section Kranj east - Brnik
Document type: Graduation Thesis - University studies
Notes: 94 p., 58 tab., 68 fig., 189 eq.
Key words: Glued laminated timber, steel profile, fastners, static analysis, elements design

Abstract:

This thesis contains the design of footbridge for pedestrians and cyclists that spans over highway A2 on the section Kranj east – Brnik. The introduction contains general characteristics of timber bridges and basic instructions to designing cycle-friendly infrastructures. In the following chapters present the basic design of the footbridge and the characteristics of the various materials used. The thesis then elaborates the main loads on the structure, their combinations and their application on the four interconnected models prepared with computer program SAP2000. As a product of static and modal analysis, the internal forces were used in the proces of constructing the main elements of the bridge and their connestions.

For the primary load-bearing structure of the footbridge, two glued laminated timber beams of dimensions 40/180 cm were chosen. In the transverse direction, the two primary beams are connected by 23 steel frames of quality S355, positioned at a mutual distance of 3 m. Primary beams are connected with a steel profile HEB200 in the horizontal direction and with two steel profile HEB200 the vertical direction. In the transverse direction steel profiles are connected with steel diagonals $\varnothing 20$ and quality S235. The secondary load-bearing structure of the bridge is represented by the five glued laminated timber beams, of dimensions 24/26 cm, positioned at a mutual axial distance of 0,59 m. The surface of the footbridge consists of oak wood with dimensions 20/12 cm.

ZAHVALA

Na tem mestu bi se rada zahvalila mentorju izr. prof. dr. Jožu Lopatiču za njegovo strokovno pomoč in usmerjanje tekom pisanja diplomske naloge.

Rada bi se zahvalila tudi sošolcem, prijateljem, predvsem pa svoji družini, za vso pomoč in spodbude ter za vso čustveno in moralno podporo, ki so mi jo izkazali med študijem.

KAZALO VSEBINE

Stran za popravke, Errata	I
Izjava o avtorstvu	II
Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček	III
Bibliographic-documetalistic information and abstract	IV
Zahvala	V
1 UVOD	1
1.1 Leseni mostovi.....	1
1.2 Projektiranje kolesarskih površin.....	2
1.2.1 Širine stez za kolesarje in pešce.....	4
1.2.2 Horizontalni in vertikalni elementi ter prečni nagibi.....	5
2 LESENA BRV ZA PEŠCE IN KOLESARJE	7
2.1 Lokacija brvi.....	7
2.2 Zasnova mostu	7
3 MATERIAL	8
3.1 Les kot gradbeni material.....	8
3.1.1 Masivni les.....	9
3.1.2 Lepljen les	9
3.2 Jeklo	10
4 OBTEŽBE	11
4.1 Lastna in stalna obtežba	11
4.2 Prometna obtežba	12
4.2.1 Enakomerno porazdeljena prometna obtežba (<i>qfk</i>).....	12
4.2.2 Koncentrirana točkovna sila (<i>Qfwk</i>).....	13
4.2.3 Obtežba servisnega vozila (<i>Qserv</i>).....	13
4.2.4 Horizontalna obtežba.....	13
4.2.5 Skupine prometne obtežbe	14
4.3 Obtežba vetra	14
4.3.1 Sila vetra v prečni smeri (smer x).....	16
4.3.2 Sila vetra v vzdolžni smeri (smer y).....	17
4.4 Temperaturna obtežba.....	18
4.5 Obtežba snega	19

4.6	Potresna obtežba	20
4.6.1	Značilnosti tal.....	20
4.6.2	Potresni vpliv	21
4.6.3	Projektni spekter za elastično analizo z reduciranimi silami (EC8-2) in faktor obnašanja.....	23
4.6.4	Mase	24
4.6.5	Nihajni časi in nihajne oblike.....	24
5	KOMBINACIJE OBTEŽB	25
5.1.1	Vrednosti ψ – faktorjev	25
5.1.2	Kontrole	25
6	RAČUNSKI MODEL ZA ANALIZO NOTRANJIH STATIČNIH KOLIČIN.....	30
6.1	Prostorski model konstrukcije	30
6.1.1	Lastna in stalna obtežba.....	31
6.1.2	Prometna obtežba	32
6.1.3	Obtežba vetra.....	34
6.1.4	Temperaturna obtežba	35
6.1.5	Obtežba snega	35
6.1.6	Obtežba zaradi zagotavljanja stabilnosti primarnih nosilcev.....	35
6.2	2D model za dimenzioniranje podnic	36
6.3	2D model za dimenzioniranje sekundarnih vzdolžnih elementov.....	38
6.4	2D model za dimenzioniranje prečnih elementov	41
7	REZULTATI.....	47
7.1	Prostorski model.....	47
7.2	Notranje sile v podnicah.....	48
7.3	Notranje sile v vzdolžnih elementih.....	48
7.4	Notranje sile v jeklenih elementih.....	49
8	DIMENZIONIRANJE ELEMENTOV.....	50
8.1	Kontrola lameliranih lepljenih elementov.....	50
8.1.1	Primarni vzdolžni nosilci	50
8.1.2	Sekundarni vzdolžni nosilci.....	60
8.2	Kontrola masivnih lesenih elementov.....	64
8.2.1	Dimenzioniranje podnic	64
8.3	Kontrola jeklenih elementov.....	68
8.3.1	Dimenzioniranje prečnega jeklenega okvirja.....	68
8.3.2	Dimenzioniranje jeklenih diagonal zavarovalne konstrukcije.....	75
9	DIMENZIONIRANJE STIKOV IN PRIKLJUČKOV.....	77

9.1	Priključek primarnega nosilca na AB krajna opornika in AB oporni steni	77
9.1.1	Dimenzioniranje vijakov	78
9.1.2	Dimenzioniranje čepa	82
9.2	Stik med glavnimi nosilci	84
9.2.1	Dimenzioniranje vijakov	85
10	ZAKLJUČEK	91
11	VIRI	92

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Korelacija hitrosti kolesarjev in minimalnih polmerov krožnih lokov kolesarskih površin.....	5
Preglednica 2: Maksimalne dolžine vzponov v odvisnosti od vzdolžnih sklonov za povprečnega kolesarja.....	5
Preglednica 3: Vertikalne zaokrožitve v odvisnosti od hitrosti kolesarjev.....	6
Preglednica 4: Karakteristične trdnosti in togostne lastnosti masivnega lesa (mehak in trdi les).....	9
Preglednica 5: Karakteristične trdnosti in togostne lastnosti lepljenega lameliranega lesa ...	10
Preglednica 6: Računske vrednosti materialnih konstant jekla	10
Preglednica 7: Nominalne vrednosti napetosti tečenja f_y in natezne vrednosti f_u za vroče valjana konstrukcijska jekla.....	11
Preglednica 8: Gradbeni materiali in pripadajoče prostorninske teže	11
Preglednica 9: Dimenzije in obtežba izbranih elementov	12
Preglednica 10: Definicija skupin prometne obtežbe	14
Preglednica 11: Kategorije terena in terenski parametri	16
Preglednica 12: Najvišja in najnižja temperatura v senci za izbrano lokacijo (Brnik)	18
Preglednica 13: Enačbe za računanje obt. snega na tleh v odvisnosti od nadmorske višine A	19
Preglednica 14: Razvrstitev tal glede na tipe tal.....	20
Preglednica 15: Vrednosti parametrov, ki opisujejo elastični sektor odziva (uporaba v Sloveniji).....	21
Preglednica 16: Izračun skupne teže konstrukcije.....	24
Preglednica 17: Lastni nihajni časi in frekvence.....	24
Preglednica 18: Vrednosti ψ – faktorjev.....	25
Preglednica 19: Kombinacije obtežb v MSN – obtežba deluje v vseh poljih	26
Preglednica 20: Kombinacije obtežb v MSN – obtežba deluje neugodno v 1. polju.....	26
Preglednica 21: Kombinacije obtežb v MSN – obtežba deluje neugodno v 2. polju.....	26
Preglednica 22: Kombinacije obtežb v MSN – obtežba deluje neugodno v 3. polju.....	26
Preglednica 23: Kombinacije obtežb v MSN – obtežba deluje neugodno v 1. in 2. polju	27
Preglednica 24: Kombinacije obtežb v MSN – obtežba deluje neugodno v 2. in 3. polju	27
Preglednica 25: Kombinacije obtežb v MSN – obtežba deluje neugodno v 1. in 3. polju	27
Preglednica 26: Kombinacije obtežb v MSN - potres.....	27
Preglednica 27: Kombinacije obtežb v MSU – obtežba deluje v vseh poljih	28
Preglednica 28: Kombinacije obtežb v MSU – obtežba deluje neugodno v 1. polju.....	28
Preglednica 29: Kombinacije obtežb v MSU – obtežba deluje neugodno v 2. polju.....	28
Preglednica 30: Kombinacije obtežb v MSU – obtežba deluje neugodno v 3. polju.....	28
Preglednica 31: Kombinacije obtežb v MSU – obtežba deluje neugodno v 1. in 2. polju	28
Preglednica 32: Kombinacije obtežb v MSU – obtežba deluje neugodno v 2. in 3. polju	29
Preglednica 33: Kombinacije obtežb v MSU – obtežba deluje neugodno v 1. in 3. polju	29
Preglednica 34: Tabela koeficientov <i>kdef</i> glede na razred uporabe.....	29
Preglednica 35: Obtežne kombinacije za dimenzioniranje podnic	38
Preglednica 36: Obtežne kombinacije za dimenzioniranje sekundarnih vzdolžnih elementov	40

Preglednica 37: Obtežne kombinacije za kontrolo povosov sekundarnih vzdolžnih elementov	40
Preglednica 38: Obtežne kombinacije za kontrolo jeklenih elementov.....	43
Preglednica 39: Prva serija dodatnih kombinacij obtežb.....	44
Preglednica 40: Druga serija dodatnih kombinacij obtežb	45
Preglednica 41: Geometrijske karakteristike primarnega vzdolžnega nosilca.....	50
Preglednica 42: Ekstremne vrednosti notranjih sil in pripadajoče notranje sile	50
Preglednica 43: Kombinacija obtežnih faktorjev za določitev ekstremnega pomika.....	56
Preglednica 44: Lastni nihajni časi in frekvence obravnavane brvi	58
Preglednica 45: Geometrijske karakteristike sekundarnega vzdolžnega nosilca	60
Preglednica 46: Ekstremne vrednosti notranjih sil in pripadajoče notranje sile	60
Preglednica 47: Ekstremne vrednosti notranjih sil in pripadajoče notranje sile	64
Preglednica 48: Najmanjši razmiki in oddaljenosti do roba lesa za osno obremenjene lesne vijake	66
Preglednica 49: Geometrijske karakteristike jeklenega profila HEB200.....	69
Preglednica 50: Merodajne notranje sile v elementu in pripadajoče vrednosti notranjih sil...	69
Preglednica 51: Faktor nepopolnosti uklonskih krivulj	74
Preglednica 52: Izbira uklonske krivulje glede na prečni prerez	75
Preglednica 53: Geometrijske in materialne karakteristike izbranega paličnega jekla	76
Preglednica 54: Merodajne vrednosti osnih sil	76
Preglednica 55: Lokacija in pomičnost jeklenih ležišč	77
Preglednica 56: Prikaz vrednosti v ležišču merodajnem krajnem oporniku in oporni AB steni	78
Preglednica 57: Minimalni dovoljeni razmiki med vijaki in oddaljenosti vijakov od robov in koncev lesa.....	81
Preglednica 58: Minimalni dovoljeni razmiki med vijaki in oddaljenosti vijakov od robov in koncev lesa.....	89

KAZALO SLIK

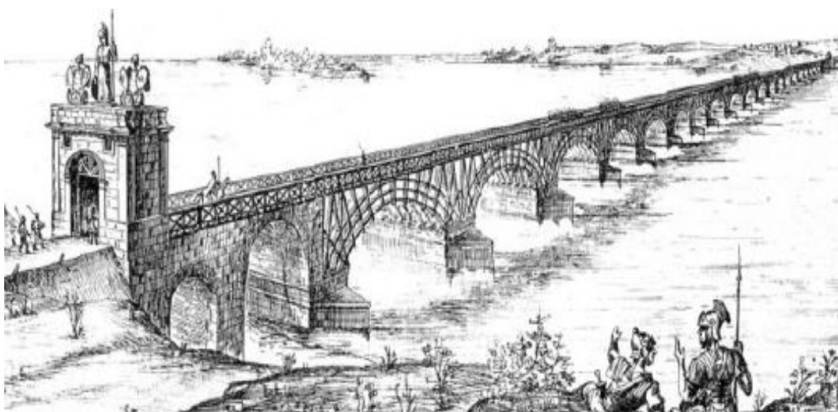
Slika 1: Umetniška interpretacija Trajanovega mostu čez reko Donavo	1
Slika 2: Prikaz kolesarske poti	3
Slika 3: Oblike kolesarskih stez.....	3
Slika 4: Prikaz steze za pešce in kolesarje.....	3
Slika 5: Prikaz kolesarskega pasu.....	4
Slika 6: Širina prostega in prometnega profila, ki je potreben za vožnjo kolesarja in hojo pešca.....	4
Slika 7: Razmerje med potrebno širino in številom pešcev in kolesarjev v konični uri	5
Slika 8: Prikaz lokacije brvi.....	7
Slika 9: Prečni prerez brvi	8
Slika 10: Model obtežbe servisnega vozila.....	13
Slika 11: Temeljna vrednost osnovne hitrosti vetra ($v_b, 0$).....	15
Slika 12: Zveza med najvišjo in najnižjo temperaturo v senci ter najvišjo in najnižjo efektivno temperaturo	18
Slika 13: Obtežba snega na tleh na nadmorski višini $A=0m$	19
Slika 14: Karta projektnega pospeška tal za območje Slovenije.....	22
Slika 15: Projektni spekter pospeškov.....	23
Slika 16: Prečni prerez prostorskega modela lesene brvi za pešce in kolesarje.....	30
Slika 17: Prikaz računskega 3D modela konstrukcije	30
Slika 18: Prikaz razporeditve stalne obtežbe (g_1); So_0	32
Slika 19: Prikaz različne razporeditve stalne obtežbe (g_1 in g_1, u_g); So_1 - zgoraj, So_2 - sredina, So_3 - spodaj.....	32
Slika 20: Prikaz različne razporeditve stalne obtežbe (g_1 in g_1, u_g); So_4 – zgoraj, So_5 - sredina, So_6 - spodaj.....	32
Slika 21: Prikaz razporeditve prometne obtežbe ($q_{fk}, 1$) $gr_{1.0}$	33
Slika 22: Prikaz različne razporeditve prometne obtežbe ($q_{fk}, 1$) $gr_{1.1}$ – zgoraj; $gr_{1.2}$ – sredina; $gr_{1.3}$ – spodaj	33
Slika 23: Prikaz različne razporeditve prometne obtežbe ($q_{fk}, 1$) $gr_{1.4}$ – zgoraj; $gr_{1.5}$ – sredina; $gr_{1.6}$ – spodaj	34
Slika 24: Prikaz razporeditve skupine prometne obtežbe ($Q_{serv}, 1$ in $Q_{flk}, 1$) gr_2	34
Slika 25: Prikaz razporeditve obtežbe vetra (f_{Wk}, x in f_{Wk}, y) - F_{wk}	35
Slika 26: Prikaz razporeditve nadomestne bočne obtežbe (q_d);.....	36
Slika 27: Prikaz različne razporeditve prometne obtežbe (q_{fk}, pod); Po_0 - zgoraj, Po_1 - sredina, Po_2 - spodaj.....	37
Slika 28: Vplivna dolžina delovanja obtežbe (levo), eden izmed šestih načinov porazdelitve obtežbe servisnega vozila (desno).....	37
Slika 29: Prikaz modela za dimenzioniranje vzdolžnih elementov	38
Slika 30: Prikaz vpliva stalne obtežbe podnic ($g_k, pod, neug$) – enakomerna porazd. obtežbe (So_0).....	39
Slika 31: Stalna obtežba podnic; obtežni primer So_1 – zgoraj; obtežni primer So_2 - spodaj.....	39
Slika 32: Obtežba servisnega vozila (Q_{serv})	39
Slika 33: Enakomerna prometna obtežba; $GR_{1.0}$ – zgoraj, $GR_{1.1}$ – sredina, $GR_{1.2}$ - spodaj	40

Slika 34: Kombinacija prometne obtežbe gr2	40
Slika 35: Prikaz prečnega prereza projektirane brvi (levo); prikaz računskega modela (desno)	41
Slika 36: Stalna obtežba podnic in vzdolžnih elementov ($Gk, 1, Gk, 2$); nanos v enem polju (So0).....	42
Slika 37: Obt. pešcev in kolesarjev ($Qfk, 1, Qfk, 2$ - Po0) - levo; obt. servisnega vozila - desno ($QSV1$).....	43
Slika 38: Nadomestna obtežba zaradi preprečevanja bočne zvrnitve primarnih nosilcev,	44
Slika 39: Nadomestna obtežba zaradi preprečevanja bočne zvrnitve, Bo4 - levo; Bo5 – sredina; Bo6 – desno	45
Slika 40: Obremenitev okvirja (levo), prikaz pomikov (desno)	46
Slika 41: Ovojnice upogibnih momentov M_y [kNm] - levo, osnih sil N [kN] - sredina,	47
Slika 42: Ovojnice upogibnih momentov M_y [kNm].....	48
Slika 43: Ovojnice prečnih sil V_z [kN]	48
Slika 44: Ovojnice upogibnih momentov M_y [kNm].....	48
Slika 45: Ovojnice osnih sil N [kN].....	48
Slika 46: Ovojnice prečnih sil V_z [kN]	48
Slika 47: Ovojnice upogibnih momentov M_y [kNm].....	49
Slika 48: Ovojnice osnih sil N [kN].....	49
Slika 49: Ovojnice prečnih sil V_z [kN]	49
Slika 50: Vrednost faktorja k_{vert} , v odvisnosti od vrednosti lastne frekvence	59
Slika 51: Geometrija izbranega vijaka rothoblaas HBS vijaka	66
Slika 52: Prikaz najbolj neugodne porazdelitve obtežbe in pripadajoče vrednosti izvlečne sile	67
Slika 53: Prikaz izbranih vijakov in njihovih pozicij.....	68
Slika 54: Prikaz zasnove 2D modela za dimenzioniranje jeklenih pečnih elementov	68
Slika 55: Prikaz dimenzij c in t pri kontroli kompaktnosti stojine.....	70
Slika 56: Prikaz dimenzij c in t pri kontroli kompaktnosti pasnice.....	70
Slika 57: Prikaz dimenzij h_w in t_w pri kontroli kompaktnosti prečnega prereza v strigu.....	71
Slika 58: Diagram uklonskih krivulj	75
Slika 59: Skica predvidenega ležišča	78
Slika 60: Prikaz porušitvenih kriterijev za dvostržno zvezo les - pločevina - les.....	79
Slika 61: Minimalni dovoljeni razmaki med vijaki in oddaljenosti vijakov od robov in koncev lesa	81
Slika 62: Dovoljeni medsebojni in robni odmiki veznih sredstev (standard - levo, izbrano - desno).....	81
Slika 63: Obravnavani spoj - levo (vir: lasten); račun upogibnih momentov v čepu – desno .	83
Slika 64: Prikaz izbranega vozlišča za določitev notranjih sil v elementu	84
Slika 65: Prikaz geometrije izbrane zaplate	85
Slika 66: Prikaz porušitvenih kriterijev za dvostržno zvezo	86
Slika 67: Geometrijski prikaz vrednosti kota β	88
Slika 68: Dovoljeni medsebojni in robni odmiki veznih sredstev	90

1 UVOD

1.1 Leseni mostovi

Leseni mostovi sodijo med najstarejše konstrukcije na področju lesenih konstrukcij v človeški zgodovini (Kitek Kuzman, M (ur.), 2009). Preproste lesene konstrukcije je mogoče najti že v kameni dobi, v Sloveniji na Ljubljanskem barju, pa v času neolitika (4000 do 2000 pr. n. št.). Gradnja lesenih inženirskih objektov se je razcvetela v času gospodarskega vzpona rimskega imperija. Bolj znana dosežka Rimljanov sta bila na primer najstarejši poznani leseni most, Pon Sublicus (621 pr. n. št.) pri Rimu, ki je slonel na kamnitih stebrih in most pri Neuwiedu čez Ren. Dolg je bil približno 400 m, širok 12 m in je bil zgrajen v desetih dneh. Med večje gradbene dosežke Rimljanov se šteje tudi, na Sliki 1 prikazan, Trajanov most (103 pr. n. št.) čez Donavo, ki je imel 20 polj skupne dolžine 1127 m (Lazar, T., 2011). Žal je zatonu Rimskega cesarstva sledil tudi propad inženirskega znanja gradnje lesenih mostov.



Slika 1: Umetniška interpretacija Trajanovega mostu čez reko Donavo

(Vir: Lazar, T., 2011: str.18)

Ponovno so se potrebe po mostnih povezavah pojavile v času srednjega veka zaradi razvoja srednjeveške obrti. Iz tega časa izhaja leseni most z razpiralno konstrukcijo čez Globel Stallenbach pri samostanu St. Georgenberg pri Schwazu na Tirolskem (Kitek Kuzman, M (ur.), 2009). V tem času se je razvila vešalna konstrukcija, od enostavnega trikotnega ali trapeznega vešala do večkratnih kombinacij različnih vešalnih izvedb. Ta je nato razvoj lesenih konstrukcij privedel do palične konstrukcije v različnih izvedbah. Gradnja mostov z vešali se je prenesla tudi na slovenska tla. V takšni izvedbi je bil zgrajen verjetno najstarejši slovenski pokriti most v Železnikih čez Selško Soro (Kitek Kuzman, M (ur.), 2009). Eden izmed svetovno bolj poznanih lesenih mostov je bil tudi ločni most čez Kokro v Kranju. Ta je bil izveden leta 1938 in je premoščal 85 m širok kanjon Kokre.

V zadnjih desetletjih 20. stoletja pa je postal osnovni material za gradnjo lesenih konstrukcij lepljen lameliran les. Ta način gradnje omogoča različne oblike izvedbe, vedno bolj razširjeno uporabo v gradbeništvu pa pogojuje tudi spoznanje, da so stroški gradnje in vzdrževanja lahko celo nižji kot pri podobnih konstrukcijah v betonski ali jekleni izvedbi. Ena izmed bolj ugodnih lastnosti lesenih konstrukcij je tudi ta, da imajo ugodno razmerje med trdnostjo in lastno težo. Lesena konstrukcija enakih trdnostnih lastnosti je lahko na primer 4

krat lažja kot betonska. Izmed novejših izvedb iz lesenih lepljenih nosilcev se lahko omenijo na primer leseni most za pešce na Igu, v Bohinjski Bistrici, v Ljubljani na Viču in tako naprej.

Ob upoštevanju številnih ugodnih lastnosti lesenih konstrukcij tako niti ni presenetljivo, da se te v današnjem času pojavljajo v vse večjem številu. Kot zaključuje doktor Jože Kušar, novodobni mostovi sicer ohranjajo obliko in zasnovo pradavnih mostov, le da sta se tehnologija in postopek montaže bistveno izboljšala. Vsekakor pa bi si želeli, da se tradicionalno znanje v obdelavi lesa še naprej prenaša na naslednje generacije in, da se še nadgrajuje.

1.2 Projektiranje kolesarskih površin

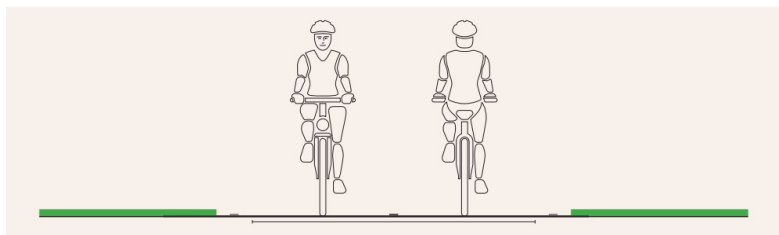
Pri projektiranju brvi za pešce in kolesarje je pomembno tudi poznavanje in upoštevanje splošnih navodil za projektiranje kolesarskih površin, ki so v tej diplomski nalogi povzete po Navodilih za projektiranje kolesarskih površin (2012).

Kolo ima v primerjavi z ostalimi prevoznimi sredstvi številne prednosti in koristi, tako za uporabnika, kot tudi za okolico. Dostopno je širokemu krogu uporabnikov, je ekonomično, ekološko in okolju prijazno. Pri projektiranju je potrebno upoštevati fizične in psihične sposobnosti kolesarjev. Glede na Navodila za projektiranje kolesarskih površin (2012: str.9) obsegajo osnovne zahteve za kolesarju prijazno infrastrukturo naslednje točke:

- varne prometne površine,
- zaključenost kolesarskega omrežja – brez prekinitev, veliko možnosti za priključevanje na ostalo prometno omrežje, možnost vračanja na začetno točno potovanje,
- čim bolj direktne povezave – izogibanje obvozom (pri izbiri trase naj velja pravilo, da najdaljša varianta določene smeri ni več kot 20% daljša od najkrajše možne)
- atraktivne in kolesarju privlačne rešitve,
- oblikovanje obcestja, počivališč, vegetacije,
- udobne prometne površine (vzponi in padci v mejah do 5%, izjemoma na krajših razdaljah do 8%)

Kolesarske površine se glede na Zakon o cestah delijo glede na kategorijo ter glede na vrsto površin. Glede na kategorijo so kolesarske površine daljinske, glavne, regionalne ali lokalne. Kolesarske povezave se glede na vrsto delijo na kolesarsko pot, kolesarsko stezo, kolesarski pas in kolesarje na vozišču.

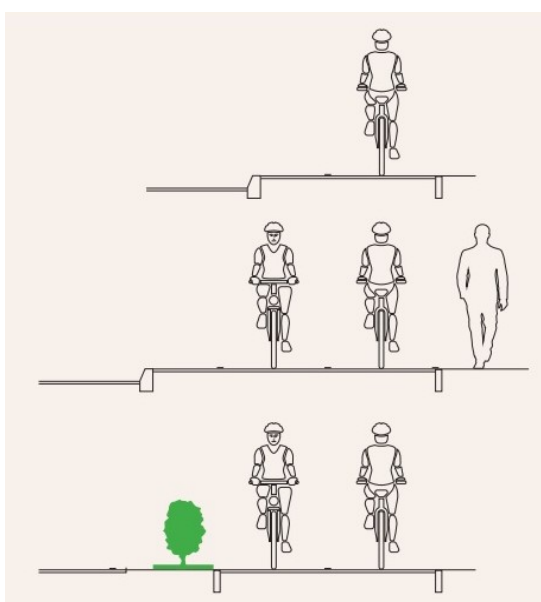
Kolesarska pot je površina, ki je primarno namenjena prometu koles (Slika 2). Pod določenimi pogoji, pa je lahko na določenih odsekih namenjena tudi drugim uporabnikom, kot skupna mešana površina. Drugi uporabniki kolesarskih poti so lahko poleg kolesarjev še pešci, traktorji in osebna vozila, vendar mora biti to dovoljeno s prometno signalizacijo. Kolesarske poti so primerne predvsem za daljinsko kolesarjenje in praviloma potekajo v večjem odmiku od motornega prometa.



Slika 2: Prikaz kolesarske poti

(Vir: Lipar, P. (av.t.), Kostanjšek, J. (soav.t.), 2012: str. 11)

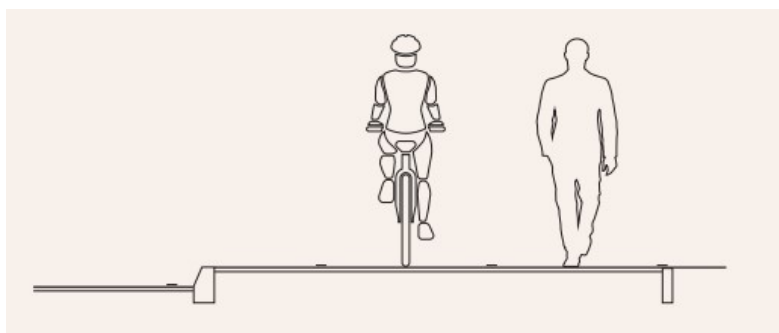
Kolesarska steza je v različnih oblikah prikazana na Sliki 3. Je del cestišča, ki ni v isti ravnini kot vozišče ali je od njega ločena drugače. Steza je namenjena prometu koles in koles s pomožnim motorjem. Kolesarska steza je lahko enostranska dvosmerna ali dvostranska enosmerna.



Slika 3: Oblike kolesarskih stez

(Vir: Lipar, P. (av.t.), Kostanjšek, J. (soav.t.), 2012: str. 12)

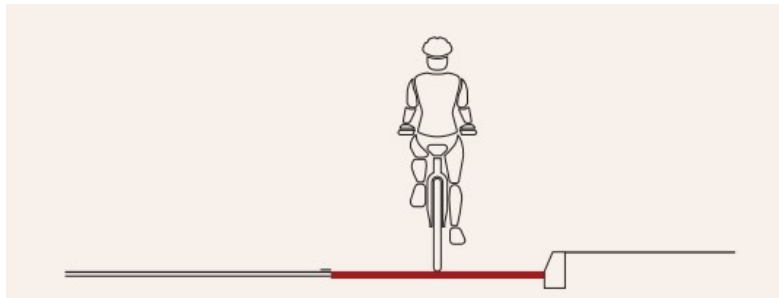
Steza za kolesarje in pešce je prikazana na Sliki 4. Zanja velja, da se lahko izvede kot steza, na katerih je površina namenjena peščem ali pa je ena površina namenjena tako peščem kot kolesarjem.



Slika 4: Prikaz steze za pešce in kolesarje

(Vir: Lipar, P. (av.t.), Kostanjšek, J. (soav.t.), 2012: str. 12)

Zadnja definicija kolesarskih površin je kolesarski pas, ki je prikazan v Sliki 5. Kolesarski pas je vzdolžni del vozišča, ki je namenjen prometu koles in koles s pomožnim motorjem. Kolesarski pas je površina, ki je izvedena na istem višinskem nivoju kot vozišče. Kolesarski pas je dobra rešitev v primeru večjega števila priključkov ali uvozov na cesto.



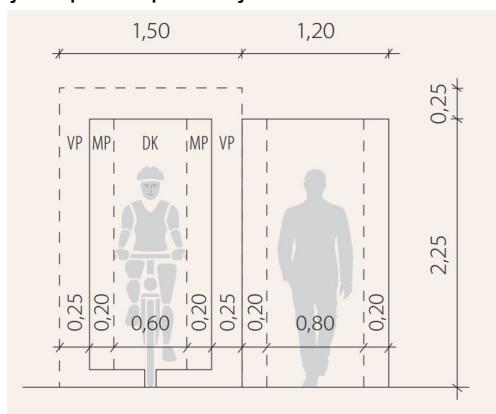
Slika 5: Prikaz kolesarskega pasu

(Vir: Lipar, P. (av.t.), Kostanjšek, J. (soav.t.), 2012: str. 13)

Glede na zgoraj podane definicije sem v diplomski nalogi zasnovala leseno brv, ki bo povezovala dva kraka obstoječe steze za kolesarje in pešce, ki poteka ob lokalni cesti LC 390072 Šenčur – Voklo. Manjkajoči del steze se nahaja na območju, kjer poteka lokalna cesta po podvozu pod avtocesto A2. Na tem območju se steza za pešce in kolesarje konča, uporabniki pa se morajo preusmeriti na lokalno cesto. Predvidena lesena brv bo tako omogočala varno prečkanje avtoceste, brez preusmeritve na lokalno cesto.

1.2.1 Širine stez za kolesarje in pešce

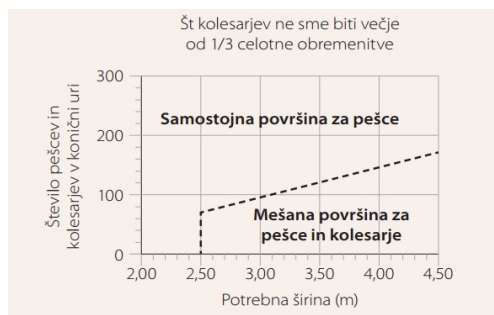
Diplomska naloga obravnava ureditev odseka steze za pešce in kolesarje, zato so bila podrobneje obravnavana navodila za projektiranje le teh. V kolikor je možno, se površine za pešce nivojsko ločijo od površin za kolesarje ali vsaj z ločilno črto. Dimenzije prostega in prometnega profila kolesarja in pešca prikazuje Slika 6.



Slika 6: Širina prostega in prometnega profila, ki je potreben za vožnjo kolesarja in hojo pešca

(Vir: Lipar, P. (av.t.), Kostanjšek, J. (soav.t.), 2012: str. 18)

V primeru, ko površina za pešce ni z ločilno črto ločena od površine na kolesarje, je širina steze odvisna od števila pešcev in kolesarjev na uro in se določi po diagramu prikazanem v Sliki 7.



Slika 7: Razmerje med potrebno širino in številom pešcev in kolesarjev v konični uri
(Vir: Lipar, P. (av.t.), Kostanjšek, J. (soav.t.), 2012: str. 25)

Obstoječa steza za pešce in kolesarje je široka 2,50 m. Predvidena lesena brv je skladno z Navodili predvidena v širini 2,70 m. Predvidi se enakomerna razširitev obstoječe steze, tako da se z obstoječih 2,50 m, na območju navezave na predvideno brv, razširi na 2,70 m.

1.2.2 Horizontalni in vertikalni elementi ter prečni nagibi

Pri projektiranju steze za pešce in kolesarje se upošteva minimalni polmer krožnega loka $R=5,0$ m. Kadar se izvede manjši polmer se hitrost kolesarja zmanjšanja in pade pod 12km/h, kar povzroči njegovo nestabilnost. V primeru manjšega radija se pred krivino na kolesarski stezi postavi ustrezen prometni znak. Na glavnih kolesarskih prometnicah znaša optimalna hitrost kolesarjev 20km/h. Minimalni polmeri krožnega loka kolesarskih površin so v odvisnosti od hitrosti kolesarjev prikazani v Preglednici 1.

Preglednica 1: Korelacija hitrosti kolesarjev in minimalnih polmerov krožnih lokov kolesarskih površin

Hitrost kolesarja km/h	12	16	20
R_{min} [m]	5	8	10

(Vir: Lipar, P. (av.t.), Kostanjšek, J. (soav.t.), 2012: str. 25)

Projektiranje vzdolžnih nagibov je pogojeno s fizičnimi zmogljivostmi kolesarjev, hitrostjo vetra, kvaliteto vozne površine in tako dalje. Vzdolžni nagibi površin morajo biti sprejemljivi za povprečnega kolesarja (Preglednica 2). Kjer zaradi terena ni možno zagotoviti ustreznih vzdolžnih sklonov je potrebno predviditi širšo površino, oziroma se na takem odseku predvidijo počivališča.

Preglednica 2: Maksimalne dolžine vzponov v odvisnosti od vzdolžnih sklonov za povprečnega kolesarja

Vzpon [%]	Maksimalna dolžina vzpona [m]
10	20
6	65
5	120
4	250
3	>250

(Vir: Lipar, P. (av.t.), Kostanjšek, J. (soav.t.), 2012: str. 27)

Obstoječa steza za pešce in kolesarje na predvideno brv navezuje v vzdolžnem nagibu 8%. S smeri Šenčurja proti Voklem znaša dolžina navezave 71 m, v nasprotni smeri pa 54 m. Glede na predlagane vzpone in padce je vzdolžni nagib primeren. Poleg tega je, kot že predhodno omenjeno, na območju navezave na brv predvidena tudi širitev steze iz 2,50 m na 2,70 m.

Vertikalne zaokrožitve so na kolesarskih površinah odvisne od hitrosti kolesarjev in vzdolžnih sklonov (Preglednica 3). V primeru vzdolžnih sklonov manjših od 5% vertikalne zaokrožitve niso potrebne. Pri vzdolžnih sklonih, ki so večji od 5% morajo biti minimalne vertikalne zaokrožitve vsaj $r=30$ m za konveksno zaokrožitev ter $r=10$ m za konkavno zaokrožitev. Vertikalni potek kolesarskih stez ali pasov je pogojen tudi z vertikalnim potekom prometnih površin ob katerih potekajo.

Preglednica 3: Vertikalne zaokrožitve v odvisnosti od hitrosti kolesarjev

Hitrost [km/h]	r vertikalno konveksno [m]	r vertikalno konkavno [m]
20	40	25
30	80	50
40	150	100
50	300	200

(Vir: Lipar, P. (av.t.), Kostanjšek, J. (soav.t.), 2012: st. 27)

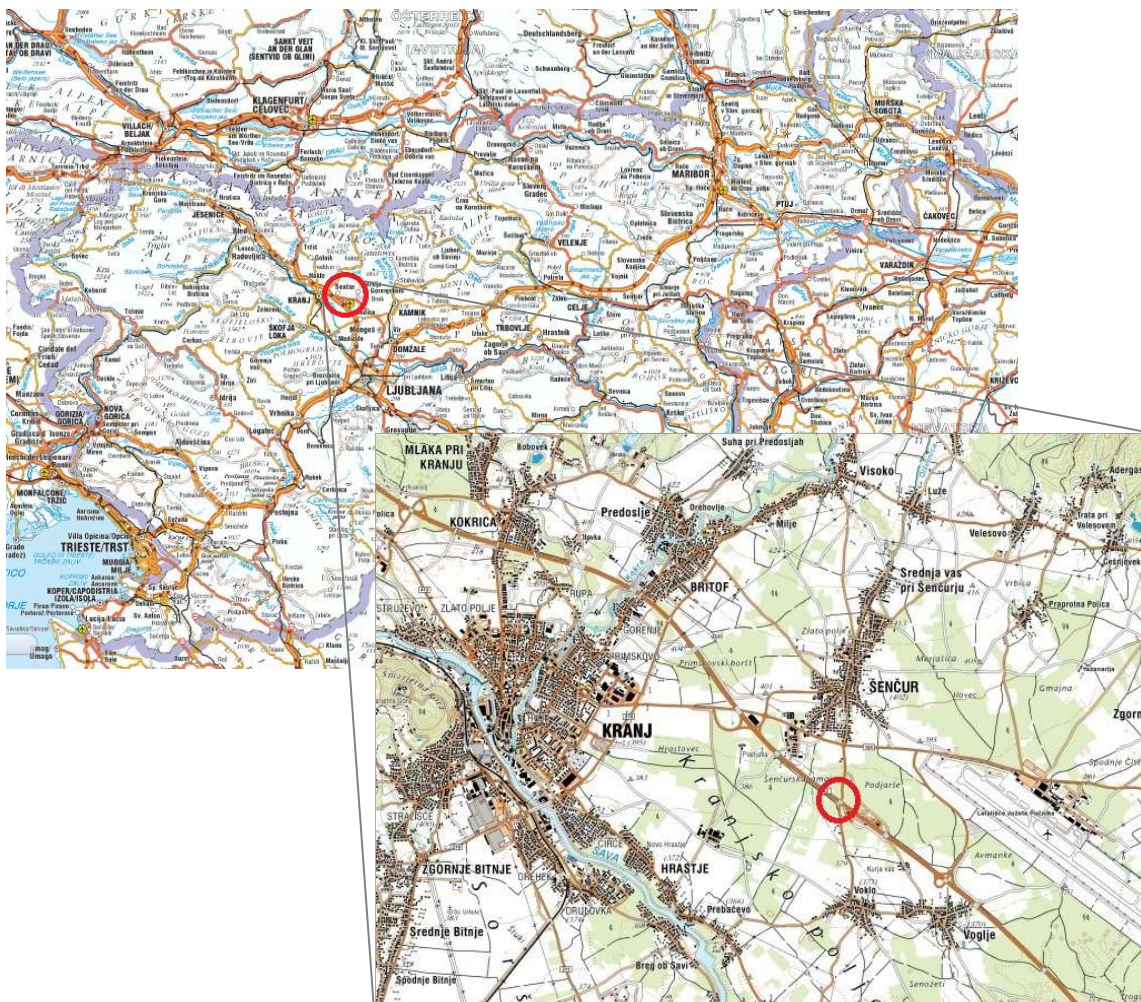
Minimalni prečni nagib na kolesarskih površinah znaša 2,5% in se izvede proti notranjemu robu krivine. Minimalni prečni nagib je potreben zaradi odvodnavanja. V primeru, kjer je površina namenjena tudi pešcem lahko znaša minimalni prečni nagib 2%.

Predvidena brv bo v vertikalni ravnini izvedena v radiju 200 m, kar ustreza priporočilom Navodil za projektiranje kolesarskih površin. Prečni nagib se na sami brvi ni predviden. Prečni nagib se lahko izvede v območju navezav na obstoječi stezi, v nagibu in smeri kot navedeno zgoraj.

2 LESENA BRV ZA PEŠCE IN KOLESARJE

2.1 Lokacija brvi

Diplomska naloga obravnava projektiranje lesene brvi, ki je potrebna zaradi ureditve obstoječe poti za pešce in kolesarje, ki povezuje naselji Šenčur in Voklo. Pot je večinoma že zgrajena in poteka ob lokalni cesti LC 390072 Šenčur – Voklo. Manjkajoči del povezave se nahaja na območju, kjer poteka lokalna cesta po podvozu pod avtocesto A2 Karavanke – Obrežje, na odseku Kranj vzhod – Brnik v km 0,118. Na tem območju se pot za pešce in kolesarje konča, uporabniki pa se morajo preusmeriti na lokalno cesto. Lokacija predvidene brvi je prikazana na Sliki 8.



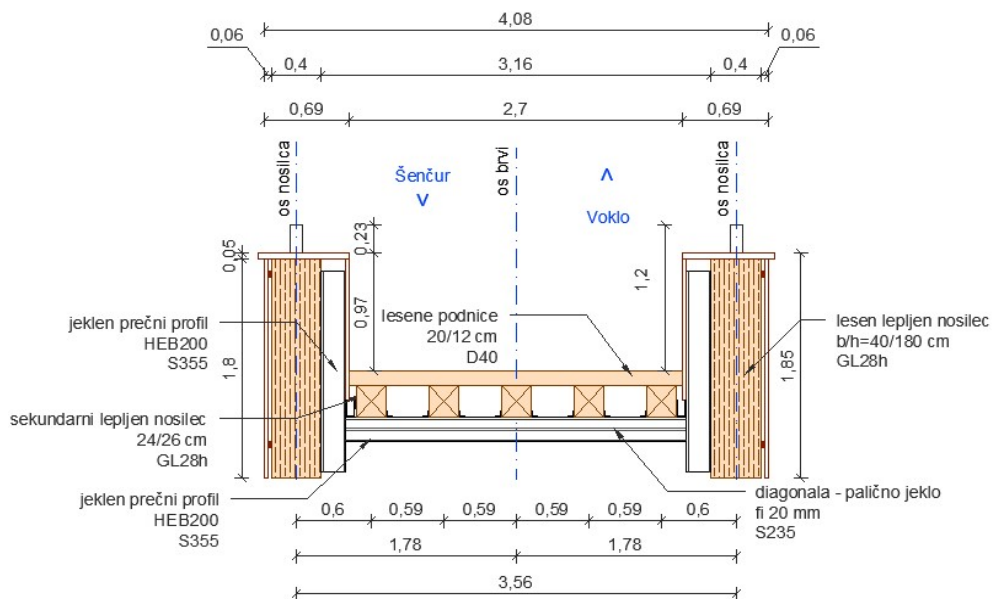
Slika 8: Prikaz lokacije brvi

2.2 Zasnova mostu

Primarno nosilno konstrukcijo brvi predstavljata dva lesena lepljena nosilca dimenzij 40/180 cm iz lesa trdnostnega razreda GL28h. V prečni smeri sta oba primarna nosilca povezana z jeklenimi okvirji iz vroče valjanih profilov. Jekleni okvirji so vzdolž mostu pozicionirani na osni

razdalji 3 m. Zaradi bočnega zavarovanja lesenih lepljencev so predvideni jekleni okviri iz nosilcev stikovanih v obliki črke H. V horizontalni smeri je predviden jeklen vroče valjan H profil HEB200, v vertikalni smeri pa obtežbo na vsaki strani prevzemata dva jeklena profila HEB200 kvalitete S355. Jekleni profili so diagonalno povezani z jekleno diagonalo premera 20 mm, dolžine 4,24 m in kvalitete S235.

Brv premošča avtocesto v km 0,188 s skupnim osnim razponom 65,74 m in višino od najvišje točke avtoceste do srednje osi glavnega nosilca 6,65 m. Poleg krajnjih armiranobetonskih opornikov je brv podprta še z dvema vmesnima armirano betonskima podpornima stenama, ki sta od krajnjih opornikov oddaljeni 11,91 m. Svetla širina brvi znaša 2,7 m, skupna širina pa 4,08 m. Prečni prerez brvi je prikazan na Sliki 9.



Slika 9: Prečni prerez brvi

3 MATERIAL

3.1 Les kot gradbeni material

Les je naraven material, ki je izredno občutljiv na spremenljiv vpliv vlage in zraka ter izpostavljenosti vplivu bioloških škodljivcev. Pri vgradnji mora biti ustrezno izsušen na predvideno vlažnost. Ena izmed lastnosti zaradi katerih se les zelo razlikuje od ostalih gradbenih materialov je tudi izrazita anizotropija. Ker je les organska snov je večina njegovih fizikalnih in mehanskih lastnosti v različnih smereh različna (Beg, D. (ur), Pogačnik, A. (ur.). 2009).

Glede na Evrokod 5 (EC5) se les razvrsti v tri razrede uporabe, glede na njegovo vlažnost. V prvi razred uporabnosti spada zelo suh les, katerega vlažnost se doseže samo s tehničnim sušenjem. V drugi razred uporabe spada »normalno vlažen« les. Takšna vlažnost se lahko doseže tudi z naravnim sušenjem. V tretji razred uporabnosti spada zelo vlažen les. Ta vrste lesa se ne uporablja za lepljene lamelirane konstrukcije. Prav tako se ne uporablja za pomembnejše konstrukcijske elemente.

3.1.1 Masivni les

Masivni les se razvršča na les listavcev in les iglavcev (Preglednica 4). Iglavci se glede na svojo tlačno trdnost razvrstijo v 12, listavci pa v 6 različnih trdnostnih razredov. Za razvrstitev v posamezni trdnostni razred so merodajne tudi karakteristični vrednosti gostote (ρ_k) in upogibne trdnosti ($f_{m,k}$) ter povprečna vrednost modula elastičnosti ($E_{0,mean}$). Ostale karakteristične trdnosti in togostne lastnosti lesa se določijo na osnovi izrazov podanih v standardu SIST EN 338.

Preglednica 4: Karakteristične trdnosti in togostne lastnosti masivnega lesa (mehak in trdi les)

		Iglavci (mehak les)			Listavci (trdi les)					
Trdnostni razredi		C16	C24	C30	D30	D40	D50	D70	en.	
upogib	$f_{m,k}$	24	30	30	30	40	50	70	MPa = N/mm ²	
nateg	$f_{t,0,k}$	14	18	14	18	24	30	42		
	$f_{t,90,k}$	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6		
tlak	$f_{c,0,k}$	21	23	21	23	26	29	34		
	$f_{c,90,k}$	2,5	2,7	2,5	8	8,8	9,7	13,5		
strig	$f_{v,k}$	2,5	3	2,5	3	3,8	4,6	6		
modul elastičnosti	$E_{0,mean}$	11000	12000	11000	10000	11000	14000	20000		
	$E_{0,05}$	7400	8000	7400	8000	9400	11800	16800		
	$E_{90,mean}$	370	400	370	640	750	930	1330		
strižni modul	G_{mean}	690	750	690	600	700	880	1250		
	C_m	15,56	14,47	15,56	14,47	13,59	13,61	13,73		
gostota	ρ_k	350	380	350	530	590	650	900		kg/m ³

(Vir: Beg, D.(ur), Pogačnik, A. (ur.). 2009: 5-112 str.)

V diplomski nalogi so izbrane podnice iz hrastovega lesa kvalitete D40, dolžine 2,70 m in prečnega prereza 20/12 cm. Podnice so vijane na pet sekundarnih vzdolžnih nosilcev iz lepljenega lameliranega lesa, na medosni razdalji 0,59 m.

3.1.2 Lepljen les

Nosilce iz lepljenega lameliranega lesa se deli glede na trdnostni razred in glede na to ali je element homogen ali nehomogen (Beg, D. (ur), Pogačnik, A. (ur.). 2009). Za vsak tip elementa (homogen/nehomogen) so definirani 4, skupaj p 8 trdnostnih razredov. Homogen element je sestavljen iz lamel lesa enake kvalitete, pri kombiniranem prečnem prerezu so na spodnjem in zgornjem robu lamele iz kvalitetnejšega lesa. Les v sredini prereza je lahko sicer slabši, vendar obvezno iste vrste. Karakteristične trdnosti in togostne lastnosti lepljenega lameliranega lesa se določijo glede na predpisane postopke v SIST EN 408. Predhodno se določi karakteristična gostota lamele (ρ_k), natezna trdnost lamele v smeri vlaken ($f_{t,0,1,k}$) ter povprečna vrednost modula elastičnosti lamele ($E_{0,1,mean}$). Ostale karakteristične trdnosti in togostne lastnosti se določijo na podlagi osnovnih izrazov podanih v SIST EN 1194. Označba trdnostnega razreda je sestavljena iz črk GL («glued-laminated») in številke, ki pomeni karakteristično upogibno trdnost. Dodani sta še označbi h – homogen («homogeneous») oz c – kombiniran («combined»). Za materialne karakteristike lepljenih nosilcev veljajo enake značilnosti, kot za masiven les, le da so v splošnem materialne

karakteristike za masivni les nekoliko slabše. Karakteristične trdnosti in togostne lastnosti lepljenega lameliranega lesa prikazuje Preglednica 5.

Preglednica 5: Karakteristične trdnosti in togostne lastnosti lepljenega lameliranega lesa

Trdnostni razredi		GL24h	GL28h	GL32h	GL36h	GL24c	GL28c	GL32c	GL36c	en.
Upogib	$f_{m,g,k}$	24	28	32	36	24	28	32	36	MPa = N/mm ²
Nateg	$f_{t,0,g,k}$	16,5	19,5	22,5	26	14	16,5	19,5	22,5	
	$f_{t,90,g,k}$	0,4	0,45	0,5	0,6	0,35	0,4	0,45	0,5	
Tlak	$f_{c,0,g,k}$	24	29,5	29	31	21	24	26,5	29	
	$f_{c,90,g,k}$	2,7	3	3,3	3,6	2,4	2,7	3	3,3	
Strig	$f_{v,g,k}$	2,7	3,2	3,8	4,3	2,2	2,7	3,2	3,8	
Modul elastičnosti	$E_{0,g,mean}$	11600	12600	13700	14700	11600	12600	13700	14700	
	$E_{0,g,05}$	9400	10200	11100	11900	9400	10200	11100	11900	
	$E_{90,g,mean}$	390	420	460	490	320	390	420	460	
Strižni modul	$G_{g,mean}$	720	780	850	910	590	720	780	850	
Gostota	ρ_k	380	410	430	450	350	380	410	430	kg/m ³

(Vir: Beg, D.(ur), Pogačnik, A. (ur.). 2009: 5-112 str.)

Primarno nosilno konstrukcijo brvi predstavljata dva lesena lepljena nosilca dimenzij 40/180 cm trdnostnega razreda GL28h. Prav tako je iz istega lesa pet sekundarnih vzdolžnih nosilcev dimenzij 24/26 cm, ki so na medosni razdalji 0,59 m.

3.2 Jeklo

Projektiranju nosilnih konstrukcij stavb in inženirskih objektov iz jekla je namenjen Evrokod 3. Evrokod 3 dopušča uporabo konstrukcijskih jekel v skladu z evropskimi standardi SIST EN 10025 (zajema pločevine, vroče valjanje profile), SIST EN 10210 (zajema izdelane brezšivne ali varjene votle profile) in SIST EN 10219 (zajema hladno oblikovane varjene votle profile). Osnovne mehanske lastnosti jeklenih elementov so definirane s karakteristično vrednostjo napetosti tečenja (f_y) in natezno trdnostjo (f_u). Računske vrednosti materialnih karakteristik jekla so zbrane v Preglednici 6.

Preglednica 6: Računske vrednosti materialnih konstant jekla

Modul elastičnosti	$E = 210.000$ MPa
Strižni modul	$G = 81.000$ MPa
Poissonov količnik (za elastično območje)	$\nu = 0,3$
Specifična teža	$\gamma = 78$ kN/m ³
Koeficient toplotnega raztezka	$\alpha_T = 1,2 \cdot 10^{-5}$ /°C (za $T \leq 100$ °C)

Duktilnost je pomembna lastnost konstrukcijskih jekel, predvsem pri plastični analizi in projektiranju potresno odpornih konstrukcij. Minimalne zahteve glede duktilnosti jekel so naslednje:

- $f_u/f_y \leq 1,1$,
- relativni raztezek po pretrgu $\geq 15\%$ (proporcionalni preizkušanelec z $L_0 = 5,65\sqrt{A_0}$, kjer je A_0 začetni prerez preizkušanca) in $\epsilon_u(f_u) \geq 15\epsilon_y$, $\epsilon_y = \frac{f_y}{E}$.

Za vroče valjana konstrukcijska jekla (S235 in S355), ki so izbrana v diplomski nalogi se lahko privzame, da postavljene pogoje za duktilnost izpolnjujejo in kontrola parametrov ni potrebna. Nominalne vrednosti napetosti tečenja f_y in natezne vrednosti f_u za vroče valjana konstrukcijska jekla prikazuje Preglednica 7.

Preglednica 7: Nominalne vrednosti napetosti tečenja f_y in natezne vrednosti f_u za vroče valjana konstrukcijska jekla

Standard in kvaliteta jekla	Nominalna debelina elementa t [mm]			
	$t \leq 40\text{mm}$		$40\text{mm} < t \leq 80\text{mm}$	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
EN 10025-2				
S235	235	360	215	360
S275	275	430	255	410
S355	355	490	335	470
S450	440	550	410	550

(Vir: Beg, D.(ur), Pogačnik, A. (ur.). 2009: 3-9 str.)

Pri izbiri jeklenega elementa je pomembna tudi lomna žilavost oziroma odpornost uporabljenega jekla proti krhkemu lomu. Lomno žilavost zagotovimo z ustrezno izbiro materiala v skladu s SIST EN 1993-1-10.

V prečni smeri sta oba primarna nosilca povezana z jeklenimi okvirji iz vroče valjanih profilov. V horizontalni smeri je predviden jeklen vroče valjan H profil HEB200, zaradi bočnega zavarovanja lesenih lepljencev pa sta predvidena dva vertikalna jeklena nosilca HEB200. Jekleni nosilci so kvalitete S355 in so vzdolž mostu pozicionirani na osni razdalji 3 m. Za prevzem obremenitev v prečni smeri (diagonale) je bilo izbrano palično jeklo premera 20 mm, dolžine 4,24 m, kvalitete S235.

4 OBTEŽBE

4.1 Lastna in stalna obtežba

Lastna in stalna obtežba konstrukcije se določita na podlagi standarda SIST EN 1991-1-1:2004, tč. 5 Lastna teža gradbenih objektov. Lastna teža gradbenih objektov vključuje lastno težo konstrukcije in nekonstrukcijskih elementov s pritrjeno opremo ter težo zemljine in balasta (tč. 5.1. (2)). Za karakteristične vrednosti nekonstrukcijskih delov, kot so parapeti, ograje, robniki, spojna sredstva itd. se privzamejo nazivne vrednosti, če ni določeno drugače. Nazivne vrednosti prostorninske teže gradbenih materialov, so podane v Dodatku A (informativnem) omenjenega standarda. Prikazuje jih Preglednica 8.

Preglednica 8: Gradbeni materiali in pripadajoče prostorninske teže

Materiali	Prostorninska teža γ [kN/m ³]	Materiali	Prostorninska teža γ [kN/m ³]
Masivni les D40	5,8	Jeklo S235	77,0
Lepljen lam. les GL28h	4,0	Jeklo S335	77,0

Tekom diplomske naloge so s povratno analizo dokazane podane dimenzije izbranih elementov (skozi izvajanje kontrole mejnega stanja nosilnosti in uporabnosti za izbrane prereze). Most je bil dimenzioniran skozi iteracijo določanja prečnih prerezov, preračunavanja obtežb, interpretacijo rezultatov in izvajanja kontrol. V kolikor kontrolam ni bilo zagotovljeno, so bili prerezi spremenjeni in postopek se je ponavljal, dokler ni bilo zagotovljeno vsem zahtevam. V Preglednici 9 so prikazani rezultati končne iteracije.

Preglednica 9: Dimenzije in obtežba izbranih elementov

Material	Dimenzije		Prostorninska teža [kN/m ³]	Obtežba na en nosilec v [kN/m]
	b [m]	h [m]		
Lesene podnice (D40)	2,70	0,12	5,79	0,938
Les. lepljenec vzd. - sekundari (GL28h)	0,24	0,26	4,02	0,627
HEB200 horizont. (upo. progr. sam)	0,20	0,20	76,97	0,281
HEB200 vertikalno (upo. progr. sam)	0,20	0,20	76,97	0,331
Les. lepljenec vzd. (upo. progr. sam)	0,40	1,80	4,02	2,896
	d [cm]	A [cm ²]		
diagonale (upo. progr. sam)	2	3,14	76,97	0,017
ograja na nosilcih				0,25
SKUPAJ (linijsko na en nosilec):				5,339

4.2 Prometna obtežba

Opredelevitev prometne obtežbe na mostovih za pešce in kolesarje zajema razdelek 5 standarda EN 1991-2:2003. Statični modeli vertikalnih in horizontalnih karakterističnih obtežb so podrobno definirani v točki 5.3. in 5.4.

Vertikalno prometno obtežbo predstavljajo tri med seboj izključujoče obtežbe:

- enakomerna porazdeljena prometna obtežba (q_{fk})
- koncentrirana točkovna sila (Q_{fwk})
- obtežba servisnega vozila (Q_{serv})

Horizontalno prometno obtežbo na mostovih zaradi obtežbe pešce in kolesarje predstavlja točkovna horizontalna obtežba (Q_{flk}).

4.2.1 Enakomerno porazdeljena prometna obtežba (q_{fk})

Karakteristična obtežba pešcev in kolesarjev se definira kot enakomerno porazdeljena obtežba v vzdolžnem in prečnem smislu. V splošnem velja za območja, kjer je pričakovana koncentracija večjega števila ljudi, spodnja enačba:

$$2,5 \text{ kN/m}^2 \leq q_{fk} = 2,0 + \frac{120}{L+30} \leq 5,00 \text{ kN/m}^2. \quad (1)$$

Kjer je:

L - dolžina objekta [m]

V modelu je bila upoštevana s standardom priporočena vrednost porazdeljene obtežbe:

$$q_{fk} = 5,00 \text{ kN/m}^2.$$

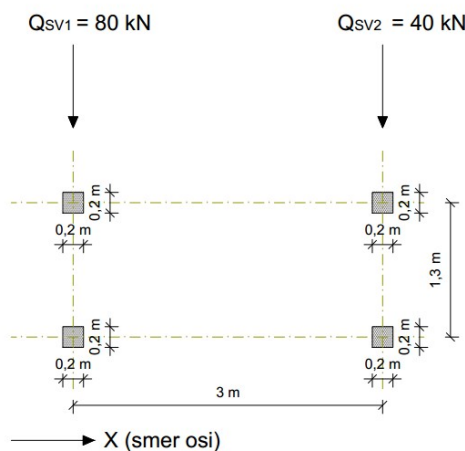
4.2.2 Koncentrirana točkovna sila (Q_{fwk})

Karakteristična vrednost koncentrirane sile (Q_{fwk}) znaša 10kN in deluje na površini 0,10m x 0,10m. Vpliv koncentrirane sile se upošteva le pri določanju lokalnih učinkov. V primeru, ko se predvideva tudi možnost obtežbe servisnega vozila na objektu se vpliv koncentrirane točkovne sile zanemari. Njen vpliv je namreč manjši v primerjavi z vplivom točkovne obtežbe servisnega vozila.

4.2.3 Obtežba servisnega vozila (Q_{serv})

V primeru ko pred in za objektom ni posebej preprečen dostop ostalim vozilom oziroma udeležencem, je potrebno upoštevati obtežbo vozil za vzdrževanje oz ostale storitve (ambulantno vozilo,...). Ker v dotičnem primeru, dimenzije in obtežba servisnega vozila ni specifično določena, se upošteva karakteristike vozila v točki 5.6.3 obravnavanega Evrokoda. Upoštevano je bilo standardno dvoosno servisno vozilo. Z medosno razdaljo 3m in kolotekom 1,3 m. Ena os je obremenjena z 40kN, druga z 80 kN (skupaj 120 kN), kot prikazuje Slika 10.

$$Q_{serv} = 40 \text{ kN} + 80 \text{ kN} = 120 \text{ kN} \quad (2)$$



Slika 10: Model obtežbe servisnega vozila

4.2.4 Horizontalna obtežba

Horizontalna obtežba (Q_{flk}) je obtežba, ki deluje v smeri vzdolžne osi mostu, zaradi vpliva hoje pešcev. Določena je kot večja izmed vrednosti 10% skupne vertikalne karakteristične porazdeljene obtežbe pešcev in kolesarjev ali 60% karakteristične vrednosti obtežbe servisnega vozila.

Horizontalna obtežba (Q_{flk}):

$$Q_{flk} = \max\{Q_{hor1}, Q_{hor2}\} = 117,02 \text{ kN}. \quad (3)$$

Kjer sta:

Q_{hor1} - horizontalna obtežba zaradi vpliva porazdeljene obtežbe pešcev in kolesarjev in

Q_{hor2} - horizontalna obtežba zaradi obtežbe servisnega vozila.

Horizontalna obtežba zaradi vpliva porazdeljene obtežbe pešcev in kolesarjev (Q_{hor1}):

$$Q_{hor1} = 0,1 \cdot q_{fk} \cdot A = 0,1 \cdot 5 \cdot 234,03 = 117,02 \text{ kN}. \quad (4)$$

Kjer sta:

q_{fk} - karakteristična obtežba pešcev in kolesarjev in

A - površina na kateri deluje obtežba pešcev

Površina na kateri deluje obtežba pešcev (A):

$$A = l \cdot b_{os} = 65,74 \text{ m} \cdot 3,56 \text{ m} = 234,03 \text{ m}^2. \quad (5)$$

Kjer sta:

l - celotna dolžina konstrukcije in

b_{os} - medosna razdalja med primarnima lesenima lepljenima nosilcema.

Horizontalna obtežba zaradi karakteristične vrednosti obtežbe servisnega vozila (Q_{hor2}):

$$Q_{hor2} = 0,6 \cdot Q_{serv} = 0,6 \cdot 120 \text{ kN} = 72 \text{ kN}. \quad (6)$$

Kjer je:

Q_{serv} - karakteristična vrednost vertikalne obtežbe servisnega vozila.

4.2.5 Skupine prometne obtežbe

Pri definiranju vpliva prometne obtežbe na objekt je potrebno določiti več kombinacij horizontalne in vertikalne prometne obtežbe. Za primer obravnavanega mostu se izvedeta dve različni kombinaciji, ki se med seboj izključujeta. Obravnavani kombinaciji prikazuje Preglednica 10.

Preglednica 10: Definicija skupin prometne obtežbe

Smer obtežbe		Vertikalna obtežba		Horizontalna obtežba
Vrsta obtežbe		Enakomerno porazdeljena obtežba	Obtežba servisnega vozila	Točkovna horizontalna obtežba
Skupina prometne obtežbe	gr1	q_{fk}	0	Q_{flk}
	gr2	0	Q_{serv}	Q_{flk}

(Vir: EN 1991-2:2003: 63 str.)

4.3 Obtežba vetra

Obtežba vetra se določi glede na slovenski standard SIST EN 1991-1-4:2005. V izhodišču se določi osnovna hitrost vetra in sicer na podlagi temeljne vrednosti osnovne hitrosti vetra ($v_{b,0}$) ter dveh korekcijskih faktorjev, ki upoštevata vpliv smeri vetra (c_{dir}) in vpliv letnega časa (c_{seas}).

Osnovna hitrost vetra (v_b):

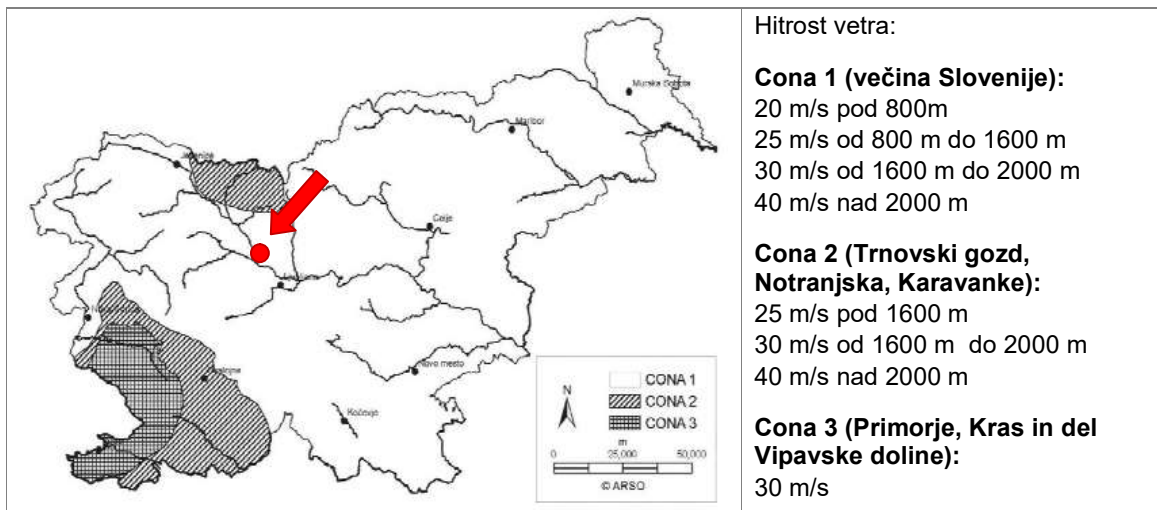
$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} = 1 \cdot 1 \cdot 20 \text{ m/s} = 20 \text{ m/s}. \quad (7)$$

Kjer so:

c_{dir} - koeficient, ki upošteva vpliv smeri vetra; priporočena vrednost koeficienta $c_{dir} = 1$,

c_{season} - koeficient, ki upošteva vpliv letnega časa; priporoč. vrednost koeficienta $c_{season} = 1$,

$v_{b,0}$ - temeljna vrednost osnovne hitrosti vetra; upošteva vpliv nadmorske višine na hitrost vetra (CONA 1); $v_{b,0} = 20 \text{ m/s}$.



Slika 11: Temeljna vrednost osnovne hitrosti vetra ($v_{b,0}$)

V nadaljevanju se določi srednja hitrost vetra ($v_m(z)$) na višini 6,50 m nad tlemi. Odvisna je od osnovne hitrosti vetra (v_b), faktorja hrapavosti ($c_r(z)$), ter faktorja hribovitosti.

Srednja hitrost vetra na določeni ravni nad terenom:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (8)$$

$$v_m(z) = 0,667 \cdot 1 \cdot 20 \text{ m/s} = 13,35 \text{ m/s}.$$

Kjer sta:

$c_r(z)$ - faktor hrapavosti terena in

$c_o(z)$ - faktor oblike terena, ki upošteva spremembo lokalne topografije. Upošteva se pri tistih lokacijah objektov, ki so na razmiku od vznožja manj kot polovico dolžine grebena, sicer ima vrednost 1.

Faktor hrapavosti terena ($c_r(z)$) se izračuna po spodnji enačbi:

$$c_r(z) = \begin{cases} k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right), & \text{za } z_{\min} < z < z_{\max} \\ c_r(z_{\min}), & \text{za } z \leq z_{\min} \end{cases} \quad (9)$$

$$c_r(z) = 0,215 \cdot \ln\left(\frac{6,65}{0,3}\right) = 0,667, \quad \text{za } 5 \text{ m} < z < 200 \text{ m}.$$

Kjer so:

k_r - faktor terena,

z - višina srednje osi objekta od terena in

z_0 - hrapavostna dolžina.

Faktor terena (k_r) se izračuna po spodnji enačbi:

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} = 0,19 \cdot \left(\frac{0,3}{0,05}\right)^{0,07} = 0,215. \quad (10)$$

Kjer sta:

$z_{0,II}$ - koeficient ($z_{0,II} = 0,05 \text{ m}$ - II. kategorija, glej Preglednica 11) in

z_0, z_{\min} - koeficienta, (- III. kategorija, glej Preglednica 11).

Preglednica 11: Kategorije terena in terenski parametri

Kategorija terena	z_0 [m]	z_{min} [m]
0 Morsko ali obalno področje, izpostavljeno proti odprtemu morju	0,003	1
I Jezersko ali ravninsko področje z zanemarljivim rastlinjem in brez ovir	0,01	1
II Področje z nizkim rastlinjem (trava) in posameznimi ovirami (drevesi, stavbami) na razdalji najmanj 20 višin ovir	0,05	2
III Področja z običajnim rastlinjem ali stavbami ali s posameznimi ovirami na razdalji največ 20 višin ovir (vasi, podeželsko okolje, stalni gozd)	0,3	5
IV Področje, kjer je najmanj 15% površine pokrite s stavbami s povprečno višino več kot 15 m	1,0	10

(Vir: SIST EN 1991-4:2005, 18.str)

$c_o(z)$ - faktor oblike terena, ki upošteva spremembo lokalne topografije. Upošteva se pri tistih lokacijah objektov, ki so na razmiku od vznožja manj kot polovico dolžine grebena, sicer ima vrednost 1.

Intenziteta turbulence $I_v(z)$ na višini z je določena kot standardna deviacija turbulence, deljena s srednjo hitrostjo vetra.

Intenziteta turbulence $I_v(z)$ se izračuna po spodnji enačbi:

$$I_v(z) = \begin{cases} \sigma_v/v_m(z) = k_l / (c_o(z) \cdot \ln(\frac{z}{z_0})), & \text{za } z_{min} < z < z_{max} \\ I_v(z_{min}), & \text{za } z \leq z_{min} \end{cases} \quad (11)$$

$$I_v(z) = \frac{1}{1 \cdot \ln(\frac{6,65}{0,3})} = 0,323, \quad \text{za } z_{min} = 5m < z < z_{max} = 200m.$$

Tlak pri največji hitrosti pri sunkih vetra:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b \quad (12)$$

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot 0,323] \cdot 0,5 \cdot 1,25 \cdot (13,35 \text{ m/s})^2 = 362,92 \text{ N/m} = 0,363 \text{ kN/m}.$$

Kjer je:

ρ - gostota zraka, ki je odvisna od nadmorske višine, temperature in zračnega tlaka, pričakovanega med neurjem na obravnavanem območju. Priporočena vrednost je $1,25 \text{ kg/m}^3$.

4.3.1 Sila vetra v prečni smeri (smer x)

Sila vetra prečno na brv se določi glede na točko 8 Vplivi vetra na mostove, standarda SIST EN 1991-1-4:2005.

Obtežba zaradi vetra v smeri x se določi glede na enačbo:

$$F_{Wk,x} = c_s c_d \cdot c_{f,x} \cdot q_p(z) \cdot A_{ref,x} \quad (13)$$

Kjer so:

$c_s c_d$ - konstrukcijski faktor; c_s predstavlja faktor velikosti konstrukcije; c_d predstavlja dinamični faktor, upošteva vpliv turbulence vetra in resonance konstrukcije,

$c_{f,x}$ - koeficient sile v x-smeri,

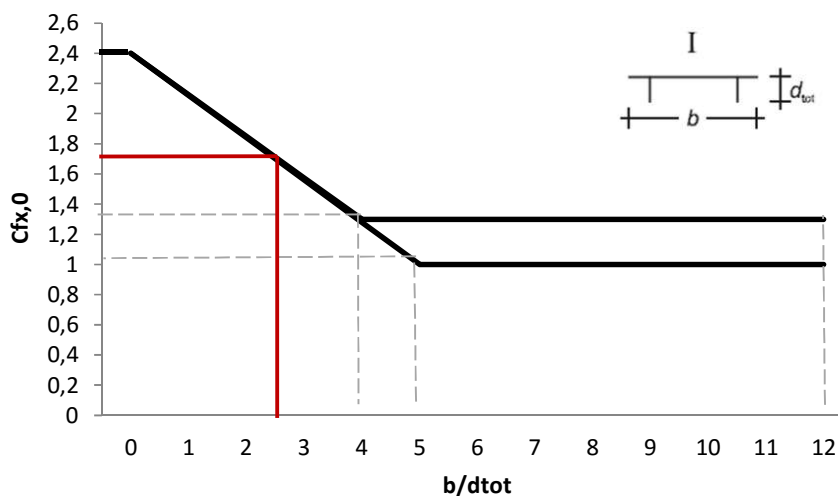
q_b - osnovni tlak vetra in

$A_{ref,x}$ - referenčna ploskev na katero deluje obtežba vetra.

Koeficient sile v x-smeri ($c_{f,x}$) se določi na podlagi Grafa 1. Odvisen je od razmerja maksimalne širine mostu proti njegovi maksimalni višini, ki znaša v obravnavanem primeru:

$$b/d_{tot} = 4,08 \text{ m} / 1,8 \text{ m} = 2,267. \quad (14)$$

Pripadajoči koeficient $c_{f,x}$ tako znaša 1,765.



Graf 1: koeficient $c_{fx,0}$ v odvisnosti od razmerja b/d_{tot}

Referenčna površina v x smeri ($A_{ref,x}$):

$$A_{ref,x} = d_{tot} \cdot l = 1,8 \text{ m} \cdot 65,4 \text{ m} = 118,33 \text{ m}^2. \quad (15)$$

Obtežba zaradi vetra v smeri x tako znaša:

$$F_{Wk,x} = 1 \cdot 1,765 \cdot 0,363 \cdot 118,33 = 75,81 \text{ kN}.$$

Na model se obtežba vetra nanese v obliki enakomerne linijske obtežbe v vrednosti ($f_{Wk,x}$):

$$f_{Wk,x} = F_{Wk,x} / l = 75,81 \text{ kN} / 65,74 \text{ m} = 1,153 \text{ kN/m}. \quad (16)$$

4.3.2 Sila vetra v vzdolžni smeri (smer y)

Določitev vpliva vetra v vzdolžni smeri po točki 8.3.4 standarda SIST EN 1991-1-4:2005:

$$f_{Wk,y} = \begin{cases} 0,25 \cdot f_{Wk,x}, & \text{za polnostenske mostove} \\ 0,50 \cdot f_{Wk,x}, & \text{za palične mostove} \end{cases} \quad (17)$$

$$f_{Wk,y} = 0,50 \cdot f_{Wk,x} = 0,50 \cdot 1,153 \text{ kN/m} = 0,577 \text{ kN/m}.$$

4.4 Temperaturna obtežba

Temperaturna obtežba se določi glede na standard SIST EN 1991-1-5:2004. V izhodišču se za brv določita najvišja in najnižja temperatura v senci. Najbližja merilna postaja se nahaja na Brniku. Lokacija merilnega mesta, nadmorska višina, dolžina niza meritve, najvišja in najnižja temperatura s povratno dobo 50 let ter metoda meritve so prikazane v Preglednici 12.

Preglednica 12: Najvišja in najnižja temperatura v senci za izbrano lokacijo (Brnik)

Ime postaje	y [m]	x [m]	z [m]	Dolžina niza T_{max}	$T_{max/min}$ 50	Metoda
Brnik (T_{max})	119298	119298	372	55	36,3	M
Brnik (T_{min})	119298	119298	372	54	-27,1	M

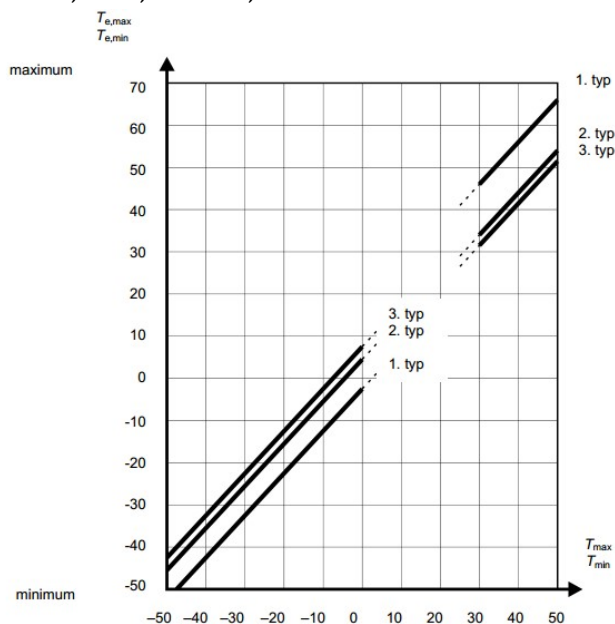
$$T_{max}(\text{Brnik}) = 36,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{min}(\text{Brnik}) = -27,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Za izračun efektivnih temperatur za obravnavano leseno brv se privzamejo naslednje vrednosti:

$$T_{e,max} = T_{max} + 4,5 = 36,3 + 4,5 = 40,8 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (18)$$

$$T_{e,min} = T_{min} + 4,5 = -27,1 + 4,5 = -22,6 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (19)$$



Slika 12: Zveza med najvišjo in najnižjo temperaturo v senci ter najvišjo in najnižjo efektivno temperaturo

Vpliv enakomerne temperaturne spremembe na brv se določi preko spodnjih enačb:

$$\Delta T_{N,pos}(\text{raztezanje}) = T_{e,max} - T_0 = 40,8 \text{ } ^\circ\text{C} - 10 \text{ } ^\circ\text{C} = 30,8 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (20)$$

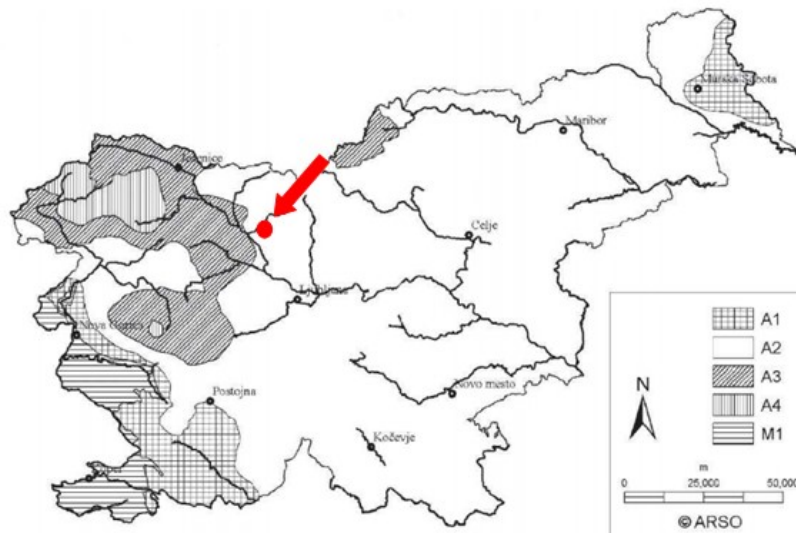
$$\Delta T_{N,pos}(\text{krčenje}) = T_{e,min} - T_0 = -22,6 \text{ } ^\circ\text{C} - 10 \text{ } ^\circ\text{C} = -32,6 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (21)$$

Kjer je:

T_0 - temperatura v času ko je bila konstrukcija zgrajena; v primeru, da ta podatek ni dostopen se privzame vrednost $10 \text{ } ^\circ\text{C}$.

4.5 Obtežba snega

Obtežba snega se določi na podlagi slovenskega standarda SIST EN 1991-1-3:2004/A101. Karakteristične vrednosti snega na tleh se določijo po podatkih na spodnji karti, ter glede na nadmorsko višino na kateri se nahaja objekt. Območje Slovenije je razdeljeno na 5 con, kot prikazuje Preglednica 13. Objekt se nahaja v območju cone A2 (Slika 13), na nadmorski višini 384 m.



Slika 13: Obtežba snega na tleh na nadmorski višini A=0m

(Vir: Beg, D.(ur), Pogačnik, A. (ur.). 2009: str. 1-60)

Preglednica 13: Enačbe za računanje obt. snega na tleh v odvisnosti od nadmorske višine A

Cona	s_k [kN/m ²]	
A1	$0,651 [1 + (A/728)^2]$	(22)
A2	$1,293 [1 + (A/728)^2]$	(23)
A3	$1,935 [1 + (A/728)^2]$	(24)
A4	$2,577 [1 + (A/728)^2]$	(25)
M1	$0,289 [1 + (A/452)^2]$	(26)

(Vir: Beg, D.(ur), Pogačnik, A. (ur.). 2009: str. 1-60)

Karakteristična vrednost obtežbe snega na objektu znaša:

$$s_k = 1,293 \left[1 + \left(\frac{A}{728} \right)^2 \right] = 1,293 \left[1 + \left(\frac{384}{728} \right)^2 \right] = 1,65 \text{ kN/m}^2.$$

Predvidena bruto širina mostu (z upoštevanjem zunanjih zaščitnih elementov) znaša 4,08 m, kar bo posledično vsakega od lameliranih nosilcev obremenilo z linijsko obtežbo:

$$s_k \cdot b/2 = 1,65 \text{ kN/m}^2 \cdot 4,08 \text{ m}/2 = 3,37 \text{ kN/m}. \quad (27)$$

4.6 Potresna obtežba

Projektiranje potresno odpornih konstrukcij se izvede glede na evropski standard EN 1998 oz Slovenski standard SIST EN 1998 (EC8). Glede na veljavno karto potresne nevarnosti celotno ozemlje Slovenije spada pod potresno območje, kar pomeni, da je uporaba EC8 nujna.

Da bi standard EC8 dosegal svoj namen se zahteva, da sta z ustrezno stopnjo zanesljivosti izpolnjena dva kriterija in sicer zahteva o neporušitvi in zahteva po omejitvi poškodb. Zaradi zahteve o neporušitvi mora biti konstrukcija projektirana in grajena tako, da pri projektni obtežbi ne pride do lokalne ali globalne porušitve. Objekt mora biti po prenehanju delovanja obtežbe sposoben prenesti vertikalne obtežbe. Drugi kriterij zahteva, da potres, za katerega obstaja precejšnja verjetnost, da se bo pojavil v amortizacijski dobi objekta, konstrukcija prenese brez večjih poškodb in z njimi povezanih omejitev uporabe. Konstrukcija torej ne sme utrpeti škode, ki bi bila neprimerno velika v primerjavi s ceno same konstrukcije.

4.6.1 Značilnosti tal

Značilnost temeljnih tal določa poglavje 3.1 standarda EC8. Tla so razdeljena v pet standardnih tipov z oznakami A, B, C, D in E ter dva nestandardna tipa S_1 in S_2 . Pri standardnih tipih tal je od tipa tal odvisna velikost potresne obtežbe, saj tip tal določa velikost koeficienta tal (S) in obliko spektra. Za uvrstitev tal v določen tip je potrebno imeti na razpolago rezultate ustreznih geotehničnih raziskav. Razvrstitev tal glede na tipe tal prikazuje Preglednica 14.

Preglednica 14: Razvrstitev tal glede na tipe tal

Tip tal	Opis stratigrafskega profila	Parametri		
		$v_{s,30}$ (m/s)	N_{SPT} (udarcev/ 30 cm)	C_U (kPa)
A	Skala ali druga skali podobna geološka formacija, na kateri je največ 5 m slabšega površinskega materiala	> 800	-	-
B	Zelo gost pesek, prod ali zelo toga glina, debeline vsaj nekaj deset metrov, pri katerih mehanske značilnosti z globino postopoma naraščajo	360-800	> 50	>250
C	Globoki sedimenti gostega ali srednje gostega peska, proda ali toge gline globine nekaj deset do več sto metrov	180-360	15-50	70-250
D	Sedimenti rahlih do srednje gostih nevezljivih zemljin (z nekaj mehкими vezljivimi plastmi ali brez njih) ali pretežno mehkih do trdih vezljivih zemljin	<180	<15	<70
E	Profil tal, kjer površinska aluvialna plast z debelino med okrog 5 do 20 m in vrednostmi v_s , ki ustrezajo tipoma C ali D, leži na bolj togem materialu z $v_s > 800$ m/s			
S_1	Sedimenti, ki vsebujejo najmanj 10 m debele plasti mehke gline/melja z visokim indeksom plastičnosti ($PI > 40$) in visoko vsebnostjo vode	< 100 (indikativno)	-	10-20
S_2	Tla podvržena likvefakciji, občutljive gline ali drugi profil tal, ki niso vključeni v tipe A-E ali S_1			

(Vir: SIST EN 1998-1:2006, 30 str.)

Kjer so:

$V_{s,30}$ - povprečna vrednost hitrosti strižnega valovanja,

N_{SPT} - število udarcev pri standardnem penetracijskem preskusu in

c_U - nedrenirana strižna nosilnost zemlje.

Standard SIST EN 1998-1:2005/oA101:2005 predvideva dva različna tipa spektrov. Tip 1 je bolj primeren za močnejše potrese ($M_s > 5,5$), Tip 2 pa za šibkejše potrese ($M_s < 5,5$). V Sloveniji so pomembni predvsem potresi z magnitudami $M_s > 5,5$, zato se uporablja tip 1. Vrednosti parametrov, ki opisujejo elastični spekter odziva za uporabo v Sloveniji določa nacionalni dodatek SIST EN 1998-1:2005/oA101:2005. Vrednosti parametrov, ki opisujejo elastični sektor odziva za uporabo v Sloveniji prikazuje Preglednica 15.

Preglednica 15: Vrednosti parametrov, ki opisujejo elastični sektor odziva (uporaba v Sloveniji)

Tip tal	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,1	0,4	2,0
B	1,2	0,15	0,5	2,0
C	1,15	0,2	0,6	2,0
D	1,35	0,2	0,8	2,0
E	1,7	0,1	0,4	2,0

(Vir: Nacionalni dodatek SIST EN 1998-1:2005/oA101:2005: str. 4)

Kjer so:

S - faktor tal,

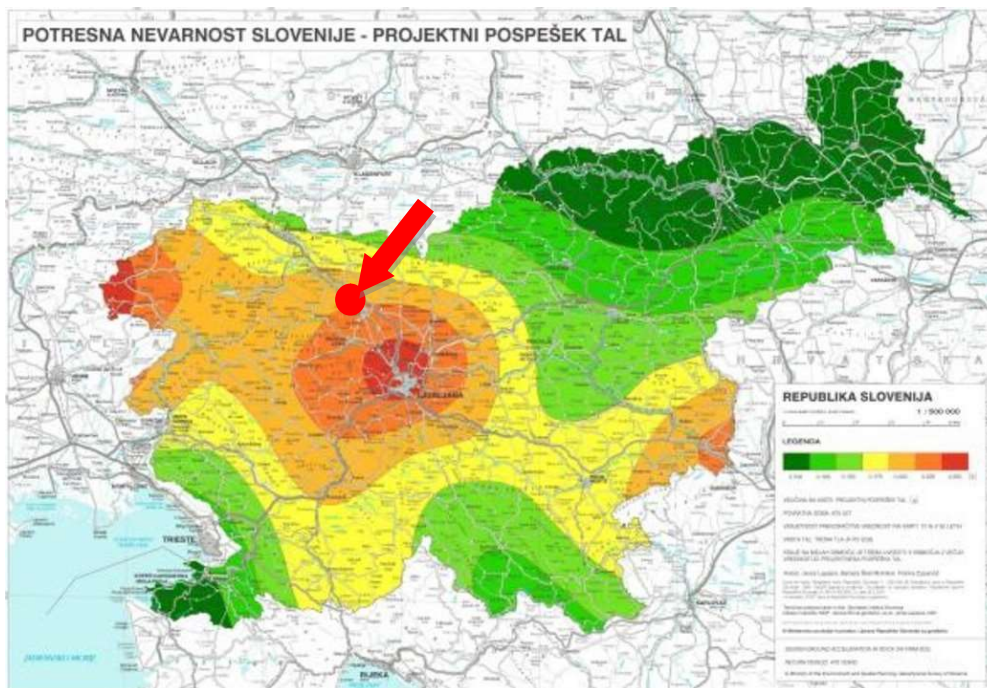
T_B - spodnja meja nihajnega časa na območju spektra, kjer ima spektralni pospešek konstantno vrednost,

T_C - zgornja meja nihajnega časa na območju spektra, kjer ima spektralni pospešek konstantno vrednost in

T_D - vrednost nihajnega časa, pri kateri se začne območje konstantne vrednosti spektralnega pomika.

4.6.2 Potresni vpliv

Pri določanju vpliva potresne obtežbe se uporabi karta potresne nevarnosti Slovenije. Ta podaja referenčne vrednosti maksimalnega pospeška v tleh tipa A (trdna tla), a_{gR} . Referenčni maksimalni pospešek ustreza referenčni povratni dobi 475 let oz 10% verjetnosti prekoračitve v 50 letih. Projektni pospešek tal v odvisnosti od lokacije objekta prikazuje Slika 14.



Slika 14: Karta projektnega pospeška tal za območje Slovenije

Vir: http://www.arso.gov.si/potresi/potresna%20nevarnost/projektни_pospešek_tal.html
(Pridobljeno 16.4.2016)

Projektni pospešek tal za območje občine Šenčur se določi glede na enačbo:

$$a_g = 0,225 \cdot g. \quad (28)$$

Kjer sta:

a_g - projektni pospešek tal in

g - težnostni pospešek ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$).

Glede na standard SIST EN 1998-2:2006 se mostovi delijo v tri kategorije, glede na njihovo pomembnost. Obravnavana brv se uvršča v kategorijo II, saj bo predvidena brv premoščala avtocesto. V splošnem se v kategorijo II uvrščajo tudi mostovi na nacionalnih cestah ter železniški mostovi.

Poleg kategorije II obstajata še kategorija I in kategorija III. V kategorijo I se uvrščajo podpovprečno pomembni objekti npr. mostovi, ki niso kritični za komunikacije. V kategorijo III spadajo mostovi velike pomembnosti. To so na primer mostovi pomembni za vzdrževanje transportnih poti in komunikacij v času potresa. Porušitev le teh bi zahtevala veliko žrtev. V kategorijo III spadajo tudi mostovi z daljšo zahtevano življenjsko dobo.

Faktor pomembnosti za obravnavano brv znaša $\gamma_I = 1,0$.

V splošnem se upošteva:

- za kategorijo I: $\gamma_I = 0,85$,
- za kategorijo II: $\gamma_I = 1,0$ in
- za kategorijo III: $\gamma_I = 1,3$.

4.6.3 Projektni spekter za elastično analizo z reduciranimi silami (EC8-2) in faktor obnašanja

Projektni spekter pospeškov je redukcija elastičnega spektra pospeškov s faktorjem obnašanja (q) zaradi sposobnosti konstrukcije za sipanje energije in zaradi dodatne nosilnosti.

Projektni spekter se po EC8 dobi z deljenjem elastičnega spektra za 5% dušenja s konstantnim faktorjem obnašanja (q) za vse periode, ki so večje od T_B . Vrednost projektnega spektra pri periodi $T=0$ je v vseh primerih enaka vrednosti v elastičnem spektru (to je vrednost maksimalnega pospeška tal - a_g), deljeni s faktorjem 1,5. Potek spektra med $T=0$ in $T=T_B$ je linearen.

Za vodoravno komponento potresnega vpliva je projektni spekter $S_d(T)$ določen z izrazi:

$$0 \leq T \leq T_B : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left(\frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right], \quad (29)$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q}, \quad (30)$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_d(T) = \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right], \\ \geq \beta \cdot a_g, \end{cases} \quad (31)$$

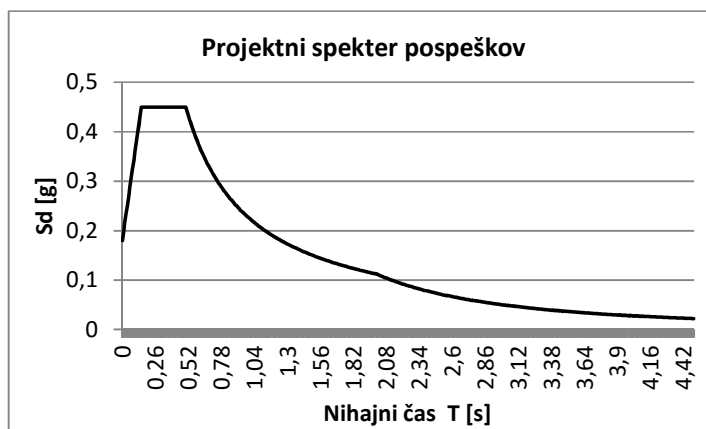
$$T_D \leq T : S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right], \\ \geq \beta \cdot a_g. \end{cases} \quad (32)$$

Kjer sta:

$S_d(T)$ - projektni spekter in

β - faktor, ki določa spodnjo mejo pri vodoravnem projektnem spektru (priporočena vrednost znaša $\beta = 0,2$).

Obravnavana brv spada med konstrukcije z omejeno sposobnostjo duktilnosti (DCL). Faktor obnašanja (q) za obravnavano brv tako znaša $q=1,5$. Projektni spekter pospeškov prikazuje Slika 15.



Slika 15: Projektni spekter pospeškov

4.6.4 Mase

Pri analizi potresnega vpliva upoštevamo vpliv stalne in navidezno stalne obtežbe. Upoštevanje mas določimo skladno s točko 4.1.2 standarda SIST EN 1998-2:2006. Izračun skupne teže konstrukcije prikazuje Preglednica 16.

Preglednica 16: Izračun skupne teže konstrukcije

Material	Dimenzije elementa			Skupna dolžina [m]	Prostorska teža [kN/m ³]	Obtežba [kN]
	b [m]	h [m]	l [m]			
Lesene podnice (D40)	0,20	0,12	2,7	176,58	5,79	122,64
Les lepljenci vzd. - sec. (GL28h)	0,24	0,26	6,00	330,00	4,02	82,82
Les lepljenci vzd. - prim. (GL28h)	0,40	1,80	66,00	132,00	4,02	382,26
Ograja na nosilcih			66,00	132,00		33,00
	A [cm²]	h [cm]	l [m]	[m]		
HEB200 horizontalno (S355)	78,1	20	2,8	64,40	76,97	38,71
HEB200 vertikalno (S355)	78,1	20	1,65	75,90	76,97	45,63
	A [cm²]	d [cm]	l [m]	[m]		
Diagonale (S235)	3,14	2	4,24	254,18	76,97	6,76
SKUPAJ - celotna konstr [kN]:					G =	711,83

Izračun skupne mase konstrukcije (m):

$$m = \frac{G}{g} = \frac{711,83 \text{ kN}}{9,81 \text{ m/s}^2} = 72,56 \text{ t.} \quad (33)$$

Kjer sta:

G - teža celotne konstrukcije in

g - gravitacijski pospešek.

4.6.5 Nihajni časi in nihajne oblike

Podatke o lastnih nihajnih oblikah, časih in frekvencah dobimo z modalno analizo v programu SAP 2000. Prvih šest lastnih nihajnih oblik in pripadajočih lastnih nihajnih časov in frekvenc prikazuje Preglednica 17.

Preglednica 17: Lastni nihajni časi in frekvence

Nihajna oblika	T [s]	F [Hz]	Smer gibanja
1.	0,256	3,908	vertikalna
2.	0,192	5,201	horizontalna / torzijska
3.	0,140	7,136	torzijska
4.	0,090	11,143	vertikalna
5.	0,081	12,332	Horizontalna / torzijska
6.	0,071	14,182	torzijska

5 KOMBINACIJE OBTEŽB

5.1.1 Vrednosti ψ – faktorjev

Priporočene vrednosti ψ - faktorjev, skladno s točko A2.2.6 dodatka EN 1990:2002/A, so v primeru različnih obtežb prikazane v Preglednici 18.

Preglednica 18: Vrednosti ψ – faktorjev

Obtežba	Oznaka	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Prometna obtežba	$gr1$	0,4	0,4	0
	Q_{Fwk}	0	0	0
	$gr2$	0	0	0
Obtežba vetra	$F_{W,k}$	0,3	0,2	0
Obtežba temperature	T_k	0,6 ⁽¹⁾	0,6	0,5
Obtežba snega	$Q_{Sn,k}$ - (med izvedbo)	0,8	-	0

Opomba: ⁽¹⁾priporočene vrednosti ψ_0 za temperaturno obtežbo je mogoče v večini primerov zmanjšati do vrednosti 0 za končne obtežne primere EQU, STR in GEO

Kjer so:

$gr1$ - skupina obtežb, ki vključuje porazdeljeno obtežbo pešcev in kolesarjev,

Q_{Fwk} - vertikalna točkovna prometna obtežba,

$gr2$ - skupina obtežb, ki vključuje obtežbo servisnega vozila,

$F_{W,k}$ - karakteristična obtežba vetra,

T_k - karakteristična temperaturna obtežba in

$Q_{Sn,k}$ - karakteristična obtežba snega.

5.1.2 Kontrole

Pravila kombinacij vplivov za mostove za pešce in kolesarje so določena v EN 1990:2002 /A1 Dodatek 2 in sicer:

- koncentrirane obtežbe (Q_{Fwk}) ni potrebno kombinirati z nobeno drugo obtežbo, ki ni posledica prometne obtežbe,
- obtežbe vetra in temperaturne obtežbe ni potrebno kombinirati, razen če je drugače zahtevano zaradi lokalnih podnebnih značilnosti,
- obtežbo zaradi snega ni potrebno kombinirati z obtežnimi primeri $gr1$ in $gr2$, razen če je drugače zahtevano glede na geografske posebnosti določenega območja in
- za mostove na katerih so pešci in kolesarji povsem zaščiteni pred vsemi tipi slabega vremena, morajo biti določene specifične kombinacije obtežb.

Kontrole v mejnem stanju nosilnosti (MSN)

Kontrole odpornosti konstrukcije brez geotehničnih vplivov (STR) izvedemo glede na kombinacijo:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (34)$$

V preglednici 19 so prikazane kombinacije obtežb, ki jih pripravimo za grobo oceno notranjih sil. Stalno obtežbo (S_o) in skupino obtežb, ki vključuje obtežbo pešcev in kolesarjev je možno na model nanesti na različne načine, tako da povzročijo najbolj neugoden vpliv. Za razliko od ostalih kombinacij v nadaljevanju so obtežbe v »začetnih kombinacijah« nanešene v vseh poljih, kar v oznaki označuje številka »0«.

Preglednica 19: Kombinacije obtežb v MSN – obtežba deluje v vseh poljih

Oznaka	Lo	So0	gr1.0	gr2	Fw,k	Tk.ogr	Tk.shl.
CO01	1,35	1,35	1,35	0	1,5*0,3	0	0
CO02	1,35	1,35	0	1,35	1,5*0,3	0	0
CO03	1,35	1,35	0,4 * 1,35	0	1,5	0	0
CO04	1,35	1,35	0	0	1,5	0	0
CO05	1,35	1,35	0,4 * 1,35	0	0	1,5	0
CO06	1,35	1,35	0,4 * 1,35	0	0	0	1,5

Kjer so:

Lo - lastna teža elementov,

So0 - stalna obtežba,

gr1.0 - skupina obtežb, ki vključuje obtežbo pešcev in kolesarjev,

gr2 - skupina obtežb, ki vključuje obtežbo servisnega vozila,

Fw,k - karakteristična obtežba vetra,

Tk.ogr - enakomerna temperaturna sprememba pri segrevanju in

Tk.shl - enakomerna temperaturna sprememba pri ohlajevanju.

Kombinacije obtežb v MSN, pri neugodnem delovanju obtežbe v različnih poljih prikazujejo preglednice 20 do 25.

Preglednica 20: Kombinacije obtežb v MSN – obtežba deluje neugodno v 1. polju

Oznaka	Lo	So1	gr1.1	gr2	Fw,k	Tk.ogr	Tk.shl.
CO07	1,35	1,35	1,35	0	1,5*0,3	0	0
CO08	1,35	1,35	0,4 * 1,35	0	1,5	0	0
CO09	1,35	1,35	0,4 * 1,35	0	0	1,5	0
CO10	1,35	1,35	0,4 * 1,35	0	0	0	1,5

Preglednica 21: Kombinacije obtežb v MSN – obtežba deluje neugodno v 2. polju

Oznaka	Lo	So2	gr1.2	gr2	Fw,k	Tk.ogr	Tk.shl.
CO11	1,35	1,35	1,35	0	1,5*0,3	0	0
CO12	1,35	1,35	0,4 * 1,35	0	1,5	0	0
CO13	1,35	1,35	0,4 * 1,35	0	0	1,5	0
CO14	1,35	1,35	0,4 * 1,35	0	0	0	1,5

Preglednica 22: Kombinacije obtežb v MSN – obtežba deluje neugodno v 3. polju

Oznaka	Lo	So3	gr1.3	gr2	Fw,k	Tk.ogr	Tk.shl.
CO15	1,35	1,35	1,35	0	1,5*0,3	0	0
CO16	1,35	1,35	0,4 * 1,35	0	1,5	0	0
CO17	1,35	1,35	0,4 * 1,35	0	0	1,5	0
CO18	1,35	1,35	0,4 * 1,35	0	0	0	1,5

Preglednica 23: Kombinacije obtežb v MSN – obtežba deluje neugodno v 1. in 2. polju

Oznaka	Lo	So4	gr1.4	gr2	Fw,k	Tk.ogr	Tk.shl.
CO19	1,35	1,35	1,35	0	1,5*0,3	0	0
CO20	1,35	1,35	0,4 * 1,35	0	1,5	0	0
CO21	1,35	1,35	0,4 * 1,35	0	0	1,5	0
CO22	1,35	1,35	0,4 * 1,35	0	0	0	1,5

Preglednica 24: Kombinacije obtežb v MSN – obtežba deluje neugodno v 2. in 3. polju

Oznaka	Lo	So5	gr1.5	gr2	Fw,k	Tk.ogr	Tk.shl.
CO23	1,35	1,35	1,35	0	1,5*0,3	0	0
CO24	1,35	1,35	0,4 * 1,35	0	1,5	0	0
CO25	1,35	1,35	0,4 * 1,35	0	0	1,5	0
CO26	1,35	1,35	0,4 * 1,35	0	0	0	1,5

Preglednica 25: Kombinacije obtežb v MSN – obtežba deluje neugodno v 1. in 3. polju

Oznaka	Lo	So6	gr1.6	gr2	Fw,k	Tk.ogr	Tk.shl.
CO27	1,35	1,35	1,35	0	1,5*0,3	0	0
CO28	1,35	1,35	0,4 * 1,35	0	1,5	0	0
CO29	1,35	1,35	0,4 * 1,35	0	0	1,5	0
CO30	1,35	1,35	0,4 * 1,35	0	0	0	1,5

Izvede se tudi kontrola v mejnem stanju nosilnosti (MSN) za nezgodna projektna stanja (potres):

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (35)$$

Kjer so:

$G_{k,j}$ - vpliv stalne obtežbe,

A_{Ed} - vpliv nezgodne obtežbe ($A_{Ed} = \gamma_I * A_{Ek}$),

$\psi_{2,i}$ - kombinacijski faktor pri navidezno stalni obtežbi (EN 1990:2002, dodatek A2: $\psi_{2,i} = 0$) in

$Q_{k,i}$ - vpliv spremenljive obtežbe.

Kombinaciji obtežb v MSN za nezgodna projektna stanja (potres) sta prikazani v Preglednici 26.

Preglednica 26: Kombinacije obtežb v MSN - potres

Oznaka	Lo	So0	$P_{Ed,x}$	$P_{Ed,y}$
CO31	1,0	1,0	1,0	0,3
CO32	1,0	1,0	0,3	1,0

Kontrole mejnega stanja uporabnosti (MSU)

Kontrole trenutnega pomika (u_{inst}) preverjamo pri karakteristični kombinaciji vplivov.

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (36)$$

V preglednici 27 so prikazane kombinacije obtežb, ki jih pripravimo za grobo pomikov, kombinacije obtežb, ki upoštevajo neugodno delovanje obtežbe v različnih poljih pa prikazujejo Preglednice 28 do 33.

Preglednica 27: Kombinacije obtežb v MSU – obtežba deluje v vseh poljih

Oznaka	Lo	So0	gr1.0	gr2	Fw,k	Tk.ogr	Tk.shl.
MSU1	1,00	1,00	1,00	0	0,3	0	0
MSU2	1,00	1,00	0	1,00	0,3	0	0
MSU3	1,00	1,00	0,4	0	1,00	0	0
MSU4	1,00	1,00	0	0	1,00	0	0
MSU5	1,00	1,00	0,4	0	0	1,00	0
MSU6	1,00	1,00	0	0	0	1,00	0
MSU7	1,00	1,00	0,4	0	0	0	1,00
MSU8	1,00	1,00	0	0	0	0	1,00

Preglednica 28: Kombinacije obtežb v MSU – obtežba deluje neugodno v 1. polju

Oznaka	Lo	So1	gr1.1	gr2	Fw,k	Tk.ogr	Tk.shl.
MSU9	1,00	1,00	1,00	0	0,3	0	0
MSU10	1,00	1,00	0,4	0	1,00	0	0
MSU11	1,00	1,00	0,4	0	0	1,00	0
MSU12	1,00	1,00	0,4	0	0	0	1,00

Preglednica 29: Kombinacije obtežb v MSU – obtežba deluje neugodno v 2. polju

Oznaka	Lo	So2	gr1.2	gr2	Fw,k	Tk.ogr	Tk.shl.
MSU13	1,00	1,00	1,00	0	0,3	0	0
MSU14	1,00	1,00	0,4	0	1,00	0	0
MSU15	1,00	1,00	0,4	0	0	1,00	0
MSU16	1,00	1,00	0,4	0	0	0	1,00

Preglednica 30: Kombinacije obtežb v MSU – obtežba deluje neugodno v 3. polju

Oznaka	Lo	So3	gr1.3	gr2	Fw,k	Tk.ogr	Tk.shl.
MSU17	1,00	1,00	1,00	0	0,3	0	0
MSU18	1,00	1,00	0,4	0	1,00	0	0
MSU19	1,00	1,00	0,4	0	0	1,00	0
MSU20	1,00	1,00	0,4	0	0	0	1,00

Preglednica 31: Kombinacije obtežb v MSU – obtežba deluje neugodno v 1. in 2. polju

Oznaka	Lo	So4	gr1.4	gr2	Fw,k	Tk.ogr	Tk.shl.
MSU21	1,00	1,00	1,00	0	0,3	0	0
MSU22	1,00	1,00	0,4	0	1,00	0	0
MSU23	1,00	1,00	0,4	0	0	1,00	0
MSU24	1,00	1,00	0,4	0	0	0	1,00

Preglednica 32: Kombinacije obtežb v MSU – obtežba deluje neugodno v 2. in 3. polju

Oznaka	Lo	So5	gr1.5	gr2	Fw,k	Tk.ogr	Tk.shl.
MSU25	1,00	1,00	1,00	0	0,3	0	0
MSU26	1,00	1,00	0,4	0	1,00	0	0
MSU27	1,00	1,00	0,4	0	0	1,00	0
MSU28	1,00	1,00	0,4	0	0	0	1,00

Preglednica 33: Kombinacije obtežb v MSU – obtežba deluje neugodno v 1. in 3. polju

Oznaka	Lo	So6	gr1.6	gr2	Fw,k	Tk.ogr	Tk.shl.
MSU29	1,00	1,00	1,00	0	0,3	0	0
MSU30	1,00	1,00	0,4	0	1,00	0	0
MSU31	1,00	1,00	0,4	0	0	1,00	0
MSU32	1,00	1,00	0,4	0	0	0	1,00

Izvedemo tudi kontrolo končnega pomika (u_{fin}). Pomike zaradi reoloških pojavov določamo glede za primer navidezno stalne kombinacije vplivov:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,1}. \quad (37)$$

Kjer se kontrolirajo:

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q1} + \sum_{i \geq 1} w_{fin,Qi} \quad (38)$$

$$w_{fin,G} = w_{inst,G} (1 + k_{def}) \quad (39)$$

$$w_{fin,Q1} = w_{inst,Q1} (1 + \psi_{2,1} k_{def}) \quad (40)$$

$$\sum_{i \geq 1} w_{fin,Qi} = \sum_{i \geq 1} w_{inst,Qi} (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} k_{def}) \quad (41)$$

Pri čemer je končni koeficient lezenja (k_{def}) v odvisnosti od razreda uporabe prikazan v Preglednici 34.

Preglednica 34: Tabela koeficientov k_{def} glede na razred uporabe

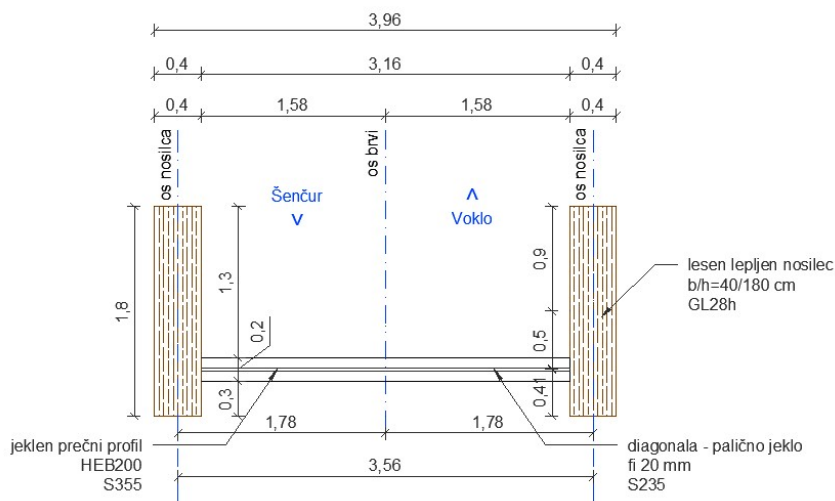
Material	Razred uporabe		
	1	2	3
Masivni les	0,6	0,8	2,0
Lameliran lepljen les	0,6	0,8	2,0

6 RAČUNSKI MODEL ZA ANALIZO NOTRANJIH STATIČNIH KOLIČIN

Za namene dimenzioniranja elementov konstrukcije sem pripravila štiri med seboj povezane modele. Eden od teh je prostorski (3D) ostali trije pa so ravninski (2D).

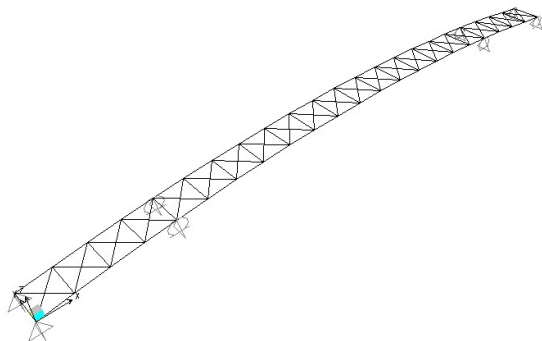
6.1 Prostorski model konstrukcije

Za dimenzioniranje konstrukcije sem pripravila 3D linijski model. Primarno nosilno konstrukcijo predstavljata dva vzdolžna lesena lepljena nosilca dimenzij $b/h = 40/180$ cm, trdnostnega razreda GL28h, locirana na osni razdalji 3,56 m. V prečni smeri so na vsake 3,0 m vzdolž osi konstrukcije, predvideni jekleni okvirji iz HEB200 nosilcev kvalitete S355, ki so med seboj povezani z diagonalami premera 20 mm, kvalitete S235. Jekleni nosilci in diagonale so v primarni nosilec vpeti ekscentrično na razdalji 0,50 m pod osjo primarnega lesenega nosilca. Prečni prerez prostorskega modela je prikazan v Sliki 16.



Slika 16: Prečni prerez prostorskega modela lesene brvi za pešce in kolesarje

Konstrukcija je skrajno levo podprta z nepomično vrtljivo podporo. Na mestu nad obema sredinskima podpornima stenama in nad desnim krajnim opornikom je konstrukcija podprta z vzdolžno pomičnimi podporami. Osni razpon krajnjih dveh polj znaša 11,91 m in tvori skupaj z osnim razponom sredinskega polja, ki znaša 41,92 m, konstrukcijo skupne teoretične dolžine 65,74 m. Računski model je prikazan na Sliki 17.



Slika 17: Prikaz računskega 3D modela konstrukcije

Elementi brvi se obtežijo z lastno težo, stalno obtežbo, obtežbo prometa, obtežbo vetra ter temperaturno obtežbo. Obtežba snega je razmeroma majhna v primerjavi z obtežbo pešcev in kolesarjev, zato jo zanemarimo. Dodatno se upošteva tudi vpliv zavetrovanja konstrukcije.

6.1.1 Lastna in stalna obtežba

Lastno težo obeh primarnih lesenih lepljenih nosilcev, jeklenih diagonal in jeklenega prečnega nosilca upošteva program sam. Z nanosom stalne obtežbe elementov (g_1) pa se ponazori vpliv lesenih podnic, sekundarnih lesenih lepljenih nosilcev, jeklenih prečnih vertikalnih nosilcev in ograje. Privzame se, da se obtežba porazdeli enakovredno na vsakega od primarnih lesenih nosilcev.

Stalna obtežba na en leseni lepljeni nosilec (g_1) znaša:

$$g_1 = g_{k,pod} + g_{k,vzd} + g_{k,HEB200} + g_{k,ogr} \quad (42)$$

$$g_1 = 0,952 \text{ kN/m} + 0,627 \text{ kN/m} + 0,331 \text{ kN/m} + 0,250 \text{ kN/m} = 2,146 \text{ kN/m}$$

Kjer so:

$g_{k,pod}$ - stalna teža lesenih podnic (D40),

$g_{k,vzd}$ - stalna teža sekundarnih lesenih lepljenih nosilcev (GL28h),

$g_{k,HEB200}$ - stalna teža jeklenih vertikalnih nosilcev, ki preprečujejo bočno zvrnitev in

$g_{k,ogr}$ - stalna teža ograje na nosilcih ($g_{k,ogr} = 0,250 \text{ kN/m}$).

Stalna teža lesenih podnic ($g_{k,pod}$):

$$g_{k,pod} = b \cdot h \cdot \gamma_{D40} / 2 = 2,74 \text{ m} \cdot 0,12 \text{ m} \cdot 5,79 \text{ kN/m}^3 / 2 = 0,952 \text{ kN/m}. \quad (43)$$

Stalna teža zaradi petih linij sekundarnih lesenih lepljenih nosilcev ($g_{k,vzd}$):

$$g_{k,vzd} = \frac{5 \cdot b \cdot h \cdot \gamma_{GL28h}}{2} = \frac{5 \cdot 0,24 \text{ m} \cdot 0,26 \text{ m} \cdot 4,02 \text{ kN/m}^2}{2} = 0,627 \text{ kN/m}. \quad (44)$$

Medtem ko se podnice in sekundarni leseni lepljeni nosilci pojavljajo kontinuirno vzdolž konstrukcije, pa se jekleni okviri pojavijo le na vsake 3,0 m. Temu primerno se izračuna tudi stalna teža jeklenih vertikalnih nosilcev, ki preprečujejo bočno zvrnitev ($g_{k,HEB180}$):

$$g_{k,HEB200} = A \cdot l \cdot \gamma_{S355} / 3 \quad (45)$$

$$g_{k,HEB200} = 0,00781 \text{ m} \cdot 1,65 \text{ m} \cdot 76,97 \text{ kN/m}^3 / 3 = 0,331 \text{ kN/m}$$

Za dimenzioniranje primarnih vzdolžnih elementov se obtežbe nanesejo v različnih obtežnih primerih. Pri obremenitvi s stalno obtežbo (S_o) se upošteva pravilo, pri katerem se ugodni vpliv lastne teže pomnoži z delnim faktorjem 1,00, medtem ko se neugodni vpliv lastne teže pomnoži z delnim faktorjem 1,35. Vpliv stalne obtežbe elementov se pravilno upošteva z redukcijo karakteristične vrednosti obtežbe polju, kjer obtežba deluje ugodno, z delnim faktorjem 1,35. Omenjeni koeficient se nato upošteva kasneje v kombinaciji obtežb.

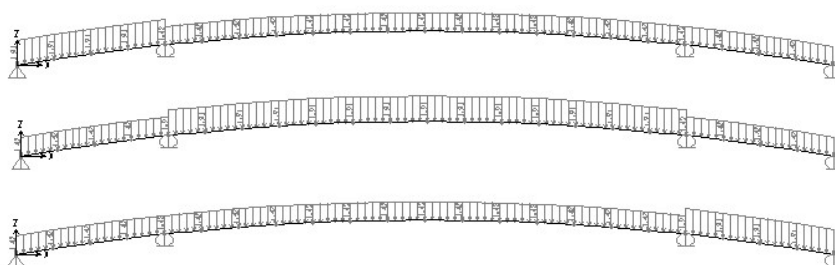
Redukcija karakteristične vrednosti obtežbe polju, kjer obtežba deluje ugodno ($g_{1,ug}$):

$$g_{1,ug} = \frac{g_1}{1,35} = \frac{2,146 \text{ kN/m}}{1,35} = 1,589 \text{ kN/m} \quad (46)$$

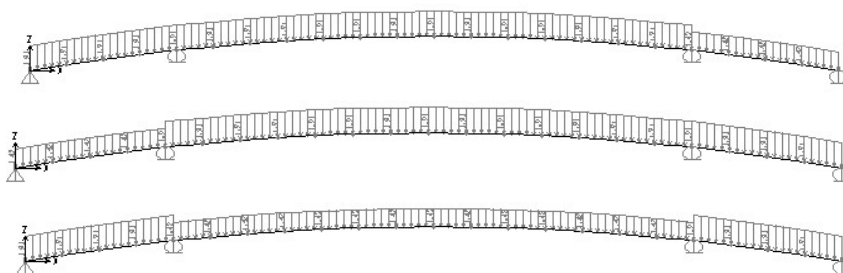
V programu sem definirala šest različnih načinov nanosa obtežbe modela. V prvem primeru (slika 18) deluje stalna obtežba podnic na vse elemente nosilca (So0). Ta primer uporabimo za grobo določanje notranjih sil. V drugem primeru se upošteva vpliv neugodne obtežbe le na prvo polje (So1), v tretjem primeru se upošteva vpliv neugodne obtežbe na sredinsko polje (So2), v četrtem na tretje polje (So3). Na preostalih dveh poljih se v omenjenih treh primerih upošteva ugodni vpliv obtežbe. V četrtem primeru se vpliv neugodne obtežbe upošteva na prvem in drugem polju (So4), v petem primeru na drugem in tretjem polju (So5) ter v šestem primeru na prvem in tretjem polju (So6). Na preostalem polju se v zadnjih treh primerih upošteva ugodni vpliv obtežbe.



Slika 18: Prikaz razporeditve stalne obtežbe (g_1); So0



Slika 19: Prikaz različne razporeditve stalne obtežbe (g_1 in $g_{1,ug}$); So1 - zgoraj, So2 - sredina, So3 - spodaj



Slika 20: Prikaz različne razporeditve stalne obtežbe (g_1 in $g_{1,ug}$); So4 – zgoraj, So5 - sredina, So6 - spodaj

6.1.2 Prometna obtežba

Pri definiranju vpliva prometne obtežbe na objekt sta bili določeni dve skupini prometne obtežbe (gr_1 in gr_2 - točka 4.3). Prva (gr_1) zajema kombinacijo enakomerno porazdeljene obtežbe pešcev in kolesarjev s horizontalno obtežbo, druga (gr_2) pa zajema kombinacijo obtežbe servisnega vozila s horizontalno obtežbo.

Skupina prometne obtežbe gr1

V modelu sem upoštevala s standardom priporočeno vrednost vertikalne porazdeljene obtežbe pešcev in kolesarjev $q_{fk} = 5,00 \text{ kN/m}^2$. Vpliv obtežbe na lameliran nosilec sem določila na podlagi medosne širine med nosilcema:

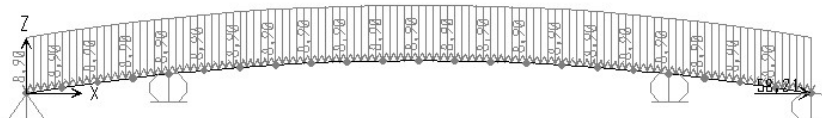
$$q_{fk,1} = q_{fk} \cdot b_{os}/2 = 5,00 \text{ kN/m}^2 \cdot 3,56\text{m}/2 = 8,9 \text{ kN/m}. \quad (47)$$

Horizontalna obtežba (Q_{flk}) je obtežba, ki deluje v smeri vzdolžne osi mostu, zaradi vpliva hoje pešcev (glej točko 4.3.4.). Določena je kot večja izmed vrednosti 10% skupne vertikalne karakteristične porazdeljene obtežbe pešcev in kolesarjev ali 60 % karakteristične vrednosti obtežbe servisnega vozila. Privzamem, da se obtežba porazdeli enakovredno med oba nosilca.

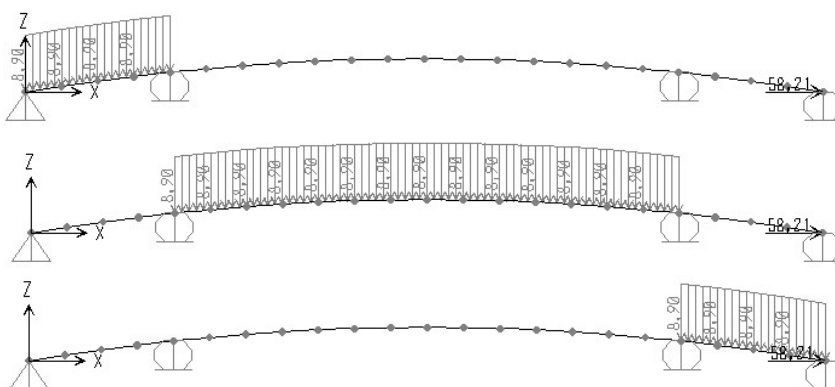
Horizontalna obtežba ($Q_{flk,1}$) enega primarnega vzdolžnega nosilca:

$$Q_{flk,1} = \frac{Q_{flk}}{2} = \frac{117,02 \text{ kN}}{2} = 58,21 \text{ kN}. \quad (48)$$

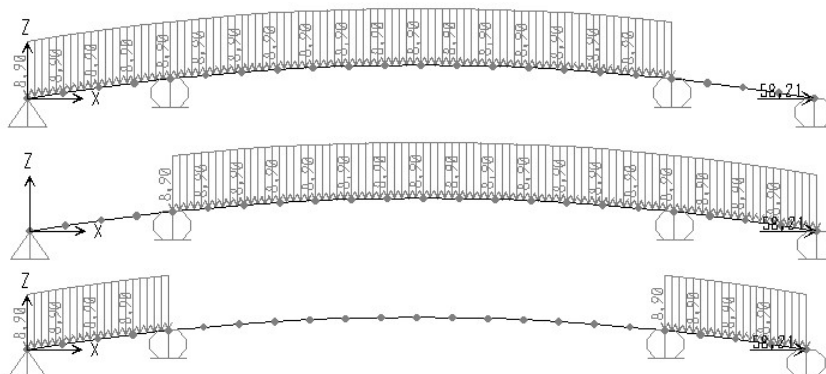
Enako kot v primeru nanosa stalne obtežbe konstrukcije, tudi primeru nanosa enakomerne linijske obtežbe velja pravilo pri katerem se upošteva delni faktor za ugodni in neugodni vpliv. V primeru obtežbe za pešce in kolesarje ta znaša za neugoden vpliv 1,35, za ugoden vpliv pa 0. V programu sem definirala šest različnih načinov nanosa skupine prometne obtežbe (gr1), kot je prikazano na slikah 21 – 23.



Slika 21: Prikaz razporeditve prometne obtežbe ($q_{fk,1}$) gr1.0



Slika 22: Prikaz različne razporeditve prometne obtežbe ($q_{fk,1}$) gr1.1 – zgoraj; gr1.2 – sredina; gr1.3 – spodaj



Slika 23: Prikaz različne razporeditve prometne obtežbe ($q_{fk,1}$) gr1.4 – zgoraj; gr1.5 – sredina; gr1.6 – spodaj

Skupina prometne obtežbe gr2

Upoštevamo standardno dvoosno servisno vozilo, z medosno razdaljo 3,0 m in kolotekom 1,3 m. Vrednost obremenitve na sprednjo os znaša 40kN, na zadnjo os pa 80 kN (skupaj 120 kN). Vpliv obtežbe se na lamelirana nosilca porazdeli enakovredno.

$$Q_{serv,1} = Q_{serv}/2 = 120kN/2 = 60kN \quad (49)$$

Sprednja os je obremenjena z 20kN, zadnja z 40 kN (skupaj 60 kN).

Enako kot v primeru skupine prometne obtežbe gr1 znaša horizontalna obtežba ($Q_{flk,1}$) enega primarnega vzdolžnega nosilca:

$$Q_{flk,1} = \frac{Q_{flk}}{2} = \frac{116,41 kN}{2} = 58,21 kN.$$

Izračunano obtežbo servisnega vozila nanesimo na model kot premikajočo obtežbo vzdolž osi. Program SAP2000 nanese obtežbo na dolžino Δx , vrednosti notranjih sil pa so prikazane v obliki ovojníc. Razporeditev prometne obtežbe skupine gr2 prikazuje Slika 24.



Slika 24: Prikaz razporeditve skupine prometne obtežbe ($Q_{serv,1}$ in $Q_{flk,1}$) gr2

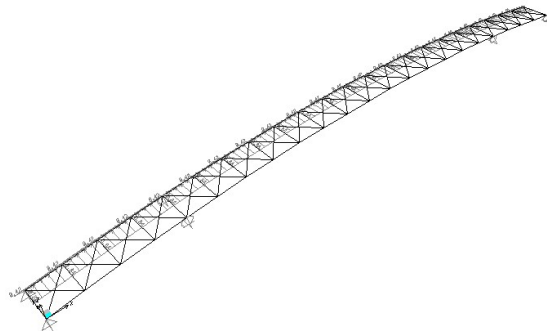
6.1.3 Obtežba vetra

Obtežba vetra je že izračunana pod točko 4.4. in je ni potrebno prilagoditi (Slika 25). Na model se obtežba vetra v prečni smeri (smer x) nanese v obliki enakomerne linijske obtežbe v vrednosti ($f_{Wk,x}$):

$$f_{Wk,x} = 1,153 kN/m.$$

Obtežba vetra v vzdolžni smeri (smer y) pa znaša ($f_{Wk,y}$):

$$f_{Wk,y} = 0,577 \text{ kN/m.}$$



Slika 25: Prikaz razporeditve obtežbe vetra ($f_{Wk,x}$ in $f_{Wk,y}$) - Fwk

6.1.4 Temperaturna obtežba

Na model se nanese obtežba enakomerne temperaturne v višini spodnjih vrednosti:

$$\Delta T_{N,pos} (\text{raztezanje}) = 30,8^\circ\text{C},$$

$$\Delta T_{N,pos} (\text{krčenje}) = -32,6^\circ\text{C}.$$

6.1.5 Obtežba snega

Obtežba snega pri predvideni bruto širini mostu, ki z upoštevanjem zunanjih zaščitnih elementov znaša 4,08 m, vsakega od lameliranih nosilcev obremeni z linijsko obtežbo:

$$s_{k,1} = 3,37 \text{ kN/m.}$$

Ker se obtežba snega obravnava na enak način kot obtežba pešcev in kolesarjev, po vrednosti pa je veliko manjša, jo v nadaljnjih izračunih zanemarim.

6.1.6 Obtežba zaradi zagotavljanja stabilnosti primarnih nosilcev

Zaradi delovanja obtežbe vetra, potresa in vpliva bočne zvrnitve je potrebno primarna nosilca varovati v horizontalni ravnini tlačnih pasov. Uklonsko zavarovanje se v horizontalni ravnini običajno izvede s sistemom križnih jeklenih diagonal. Vitkost diagonal je običajno velika, zato se upošteva, da nosijo samo natezne diagonale (Beg, D.(ur), Pogačnik, A. (ur.). 2009).

Obtežba zaradi zagotavljanja stabilnosti primarnih nosilcev zajamem z določitvijo nadomestne bočne obtežbe skladno s točko 9.2.5.3 standarda SIST EN 1995 – 1-1:2005:

$$q_d = k_l \cdot \frac{n \cdot N_d}{k_{f,3} \cdot L} = 0,603 \cdot \frac{2 \cdot 1320,45}{30 \cdot 41,22} = 1,288 \text{ kN/m} \quad (50)$$

Kjer so:

k_l - modifikacijski koeficient,

n - število nosilcev, ki so zavarovani z eno zavarovano konstrukcijo s predpostavko, da so vzdolžni rastrji e konstantni (e=3,0 m),

N_d - tlačna sila v pasu, ki ga varujemo,

$k_{f,3}$ - modifikacijski faktor od 30-80, (priporočena vrednost 30) in
 L - celotna dolžina sistema, ki se zavaruje (osna razdalja med podporami).

$$L = \max(L_1; L_2; L_3) = \max(12,09 \text{ m}; 41,22 \text{ m}; 12,09 \text{ m}) = 41,22 \text{ m} \quad (51)$$

Tlačno silo v pasu, ki ga varujemo (N_d) določimo:

$$N_d = (1 - k_{crit}) \cdot \frac{M_d}{h} = \frac{M_d}{h} = \frac{2376,80 \text{ kN}}{1,8 \text{ m}} = 1320,45 \text{ kN} \quad (52)$$

Kjer so:

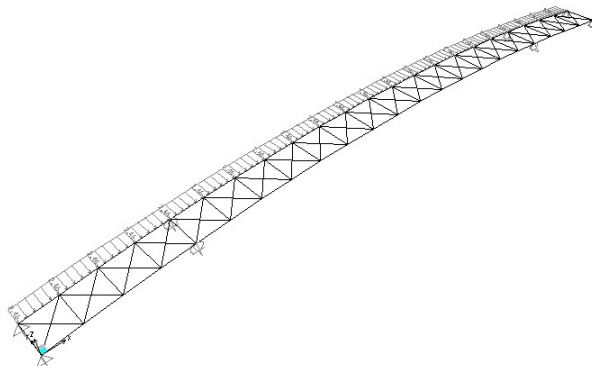
k_{crit} - koeficient, ki upošteva vpliv vitkosti tlačnega pasu; konzervativno ga ocenim na
 $k_{crit} \approx 0$

M_d - ekstremna vrednost upogibnega momenta (glej točko 8.1.1.) in

h - višina elementa, ki ga varujemo.

Modifikacijski koeficient (k_l) določim na podlagi spodnjega izraza.

$$k_l = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,0 \\ \sqrt{15/L} = \sqrt{15/41,22} \end{array} \right. = \min \{ 1,0; 0,603 \} = 0,603 \quad (53)$$



Slika 26: Prikaz razporeditve nadomestne bočne obtežbe (q_d);

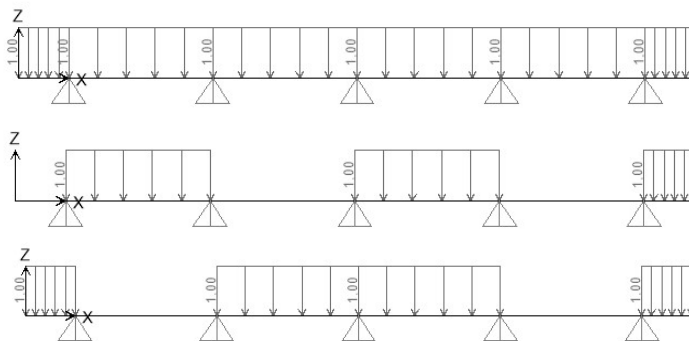
6.2 2D model za dimenzioniranje podnic

Za dimenzioniranje podnic sem pripravila model, ki upošteva redukcijo enakomerne ploskovno porazdeljene prometne obtežbe (q_{fk}). Za podnice sem izbrala lesene elemente, širine 20 cm. Podpore (vzdolžni nosilci) se nahajajo na medsebojni osni razdalji 0,59 m, previsni del podnice pa znaša 0,19 m. Vpliv na dimenzioniranje podnic predstavljajo lastna teža elementov, ki jo program nanese sam in obtežba prometa.

Vpliv obtežbe pešcev in kolesarjev na en element, se določi na podlagi širine podnic. Pri obtežbi posamezna podnica prevzame:

$$q_{fk,pod} = q_{fk} \cdot b = 5,00 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,20 \text{ m} = 1,00 \text{ kN/m} \quad (54)$$

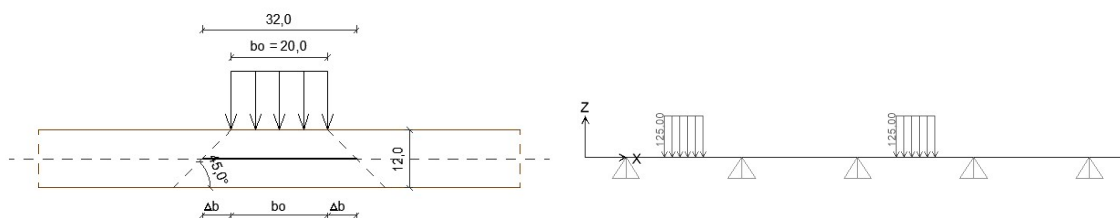
Enako kot v prostorskem modelu sem obtežbo na model nanesla na različne načine (Slika 27). V prvem primeru sem upoštevala, da deluje obtežba v vseh poljih (Po0). Ta primer služi za grobo oceno notranjih sil. V drugem primeru sem upoštevala, da deluje obtežba neugodno v vsakem drugem polju (Po1). V tretjem primeru pa sem upoštevala, da deluje obtežba neugodno v dveh zaporednih poljih (Po2).



Slika 27: Prikaz različne razporeditve prometne obtežbe ($q_{fk,pod}$); Po0 - zgoraj, Po1 - sredina, Po2 - spodaj

Koncentrirana obtežba (Q_{fwk}) ima vrednost 10kN in deluje na površini 0,10 m x 0,10 m. Ker je konstrukcija zasnovana tako, da je omogočen dostop za servisna vozila je potrebno zagotoviti, da element prenese osno obtežbo v vrednosti 80 kN, v obliki dveh sil (2 x 40 kN), ki delujeta na površini 0,20 m x 0,20 m. Razdalja med osema znaša za standardno dvoosno servisno vozilo 1,30 m. Ker se obtežba pojavi na manjši površini se primerno preračuna glede na sredinsko os podnice, po spodnji enačbi. Obtežba se na model nanese v šestih korakih, kjer se območje delovanja obtežbe zamakne za dolžino $\Delta x = 0,20$ m. Previsna dela podnic nisem obtežila, ker privzamem, da vozilo dejansko nikoli ne bo zapeljalo manj kot 20 cm do roba ograde. Razporeditev prometne obtežbe skupine gr2 prikazuje Slika 28.

$$q_{SV1,1os,pod} = Q_{SV1,1os} / 0,32 = 40 \text{ kN} / 0,32 \text{ m} = 125 \text{ kN/m} \quad (55)$$



Slika 28: Vplivna dolžina delovanja obtežbe (levo), eden izmed šestih načinov porazdelitve obtežbe servisnega vozila (desno)

Poleg prometne obtežbe se upošteva še lastna teža elementov (Lo). Ostale obtežbe, kot so stalna obtežba, obtežba vetra, temperature in snega se v postopku dimenzioniranja podnic ne upoštevajo. Velja ugotovitev, da so v primerjavi s prometno obtežbo zanemarljivo majhne oz obtežbe prevzamejo drugi elementi brvi.

Z namenom kontrole najbolj neugodnega vpliva na elemente sem definirala štiri obtežne kombinacije, kot jih prikazuje Preglednica 35.

Preglednica 35: Obtežne kombinacije za dimenzioniranje podnic

Oznaka	Lo	Po	Q_{SV1}
COpod1	1,35	1,35*Po0	0
COpod2	1,35	1,35*Po1	0
COpod3	1,35	1,35*Po2	0
COpod4	1,35	0	1,35

6.3 2D model za dimenzioniranje sekundarnih vzdolžnih elementov

Sekundarne nosilne elemente v vzdolžni smeri predstavlja po 11 lesenih lepljenih nosilcev dolžine 6 m. Elementi so razporejeni v petih linijah na medsebojni osni razdalji 0,59 m. Vzdolžni elementi so ukrivljeni v enakem radiju (200 m) kot primarni nosilci, vendar pa ukrivljenost na 6 m dolgem elementu ni izrazita in sem element ponazorila z ravnim linijskim modelom. Model za dimenzioniranje vzdolžnih elementov je prikazan na Sliki 29.



Slika 29: Prikaz modela za dimenzioniranje vzdolžnih elementov

Elementi se obremenijo z lastno težo, stalno obtežbo podnic, obtežbo prometa ter temperaturno obtežbo. Obtežbo snega in vetra sem v modelu zanemarila. Lastna teža podnic se določi na podlagi spodnje enačbe:

$$g_{k,pod,neug} = b_{os} \cdot h \cdot \gamma_{les} = 0,59 \text{ m} \cdot 0,12 \text{ m} \cdot 5,79 \text{ kN/m}^3 = 0,410 \text{ kN/m} \quad (56)$$

Kjer so:

$g_{k,pod,neug}$ - neugodno delujoča obtežba zaradi teže podnic,

b_{os} - medosna razdalja med vzdolžnimi elementi,

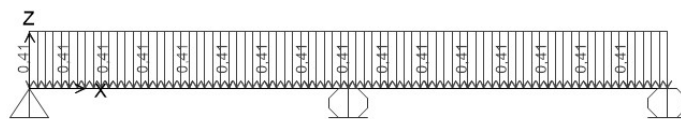
h - višina podnic (predpostavljena višina podnic 0,12m; višina je dokazana s povratno analizo, glej točko 7.) in

γ_{les} - prostorninska teža podnic [kN/m³].

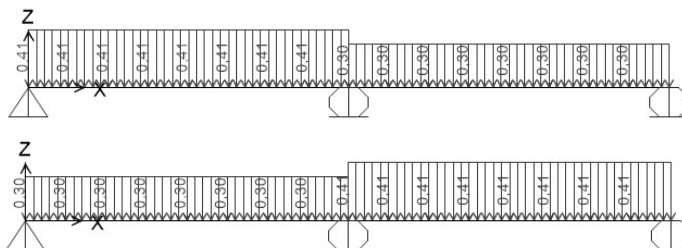
Skladno s pripravo ostalih modelov sem tudi v primeru priprave linijskega modela za dimenzioniranje sekundarnih vzdolžnih elementov obtežbe nanesa na različne načine. Pri definiranju treh različnih obtežnih primerov sem upoštevala delna faktorja za stalno obtežbo 1,35 oziroma 1,00. V prvem primeru deluje stalna obtežba podnic na vse elemente nosilca (So0), s čimer sem določila okvirne notranje sile v elementu. V drugem primeru sem obtežbo nanesa izmenično ugodno in neugodno glede na sosednja polja (So1). V tretjem primeru se ugodni in neugodni vpliv na nosilec zamenjata (So2). Prikaz treh različnih načinov nanosa obtežbe prikazujeta Sliki 30 in 31.

Določitev vrednosti stalne obtežbe podnic v primeru ugodnega vpliva na element:

$$g_{k,pod,ug} = g_{k,pod,neug}/1,35 = 0,410 \text{ kN/m}/1,35 = 0,304 \text{ kN/m} \quad (57)$$



Slika 30: Prikaz vpliva stalne obtežbe podnic ($g_{k,pod,neug}$) – enakomerna porazd. obtežbe (So0)



Slika 31: Stalna obtežba podnic; obtežni primer So1 – zgoraj; obtežni primer So2 - spodaj

Vpliva prometne obtežbe na vzdolžni element po skupini prometne obtežbe gr1 in gr2 (točka 4.2.5). se primerno korigirata. Prva (gr1) zajema kombinacijo enakomerno porazdeljene obtežbe pešcev in kolesarjev s horizontalno obtežbo, druga (gr2) zajema kombinacijo obtežbe servisnega vozila s horizontalno obtežbo.

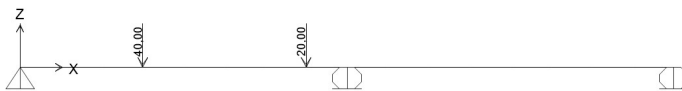
Vpliv prometne obtežbe pešcev in kolesarjev na en vzdolžni element, ocenim na podlagi medosne razdalje med nosilci:

$$q_{fk,vzd} = q_{fk} \cdot b_{os} = 5,00 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,59 \text{ m} = 2,95 \text{ kN/m}. \quad (58)$$

Kjer sta:

$q_{fk,vzd}$ - enakomerno porazdeljena linijska obtežba zaradi vpliva pešcev in kolesarjev in
 b_{os} - medosna razdalja med vzdolžnimi nosilci.

Vpliv obtežbe servisnega vozila na en vzdolžni element lahko konzervativno ocenim na polovico osnih obremenitev servisnega vozila. Izračunano obtežbo servisnega vozila nanese na model kot premikajočo obtežbo vzdolž osi. Program SAP2000 nanese obtežbo na dolžino Δx , vrednosti notranjih sil pa sem dobila v obliki ovojnica. Najbolj neugodno pozicijo servisnega vozila prikazuje Slika 32.



Slika 32: Obtežba servisnega vozila (Q_{serv})

Potrebna je še redukcija točkovne horizontalne sile, ki se izvede po enačbah v točki 4.2.3. Točkovna horizontalna obtežba enega vzdolžnega elementa ($Q_{flk,vzd}$) znaša:

$$Q_{flk,vzd} = \max\{Q_{hor1,vzd}, Q_{hor2,vzd}\} = 36 \text{ kN}$$

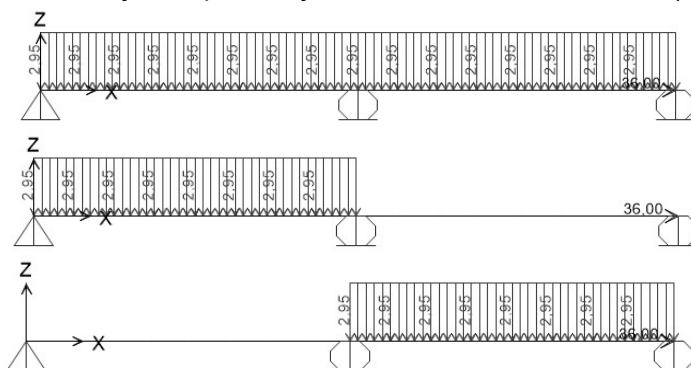
$$Q_{hor1,vzd} = 0,1 \cdot q_{fk} \cdot A = 0,1 \cdot 5 \text{ kN/m}^2 \cdot 3,54 \text{ m}^2 = 1,77 \text{ kN}$$

$$A = b_{os} \cdot l_{vzd} = 0,59 \text{ m} \cdot 6,0 \text{ m} = 3,54 \text{ m}^2$$

$$Q_{hor2,vzd} = 0,6 \cdot Q_{serv,1} = 0,6 \cdot 60 = 36 \text{ kN}$$

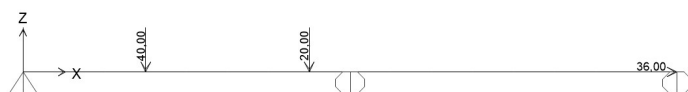
$$Q_{serv,1} = 80/2 \text{ kN} + 40/2 \text{ kN} = 60 \text{ kN}$$

Nanos prometne obtežbe skupine gr1 sem predvidela v treh različnih obtežnih primerih, ki sledijo zgledu nanosa obtežbe v primeru stalne obtežbe. Pri definiranju obtežnih primerov sem upoštevala delna faktorja za spremenljivo obtežbo 1,35 oziroma 0,0 (Slika 33).



Slika 33: Enakomerna prometna obtežba; GR1.0 – zgoraj, GR1.1 – sredina, GR1.2 - spodaj

Prometna obtežba skupine gr2 se predvidi v enem obtežnem primeru, z upoštevanjem delnega faktorja za spremenljivo obtežbo 1,35 oziroma 0,0 (Slika 34).



Slika 34: Kombinacija prometne obtežbe gr2

Z namenom kontrole najbolj neugodnega vpliva na konstrukcijo se definirajo štiri različne obtežne kombinacije, ki so prikazane v preglednici 36.

Preglednica 36: Obtežne kombinacije za dimenzioniranje sekundarnih vzdolžnih elementov

Oznaka	Lo	So	gr1	gr2
COV1	1,35	1,35 * So0	1,35 * gr1.0	0
COV2	1,35	1,35 * So0	0	1,35
COV3	1,35	1,35 * So1	1,35 * gr1.1	0
COV4	1,35	1,35 * So2	1,35 * gr1.2	0

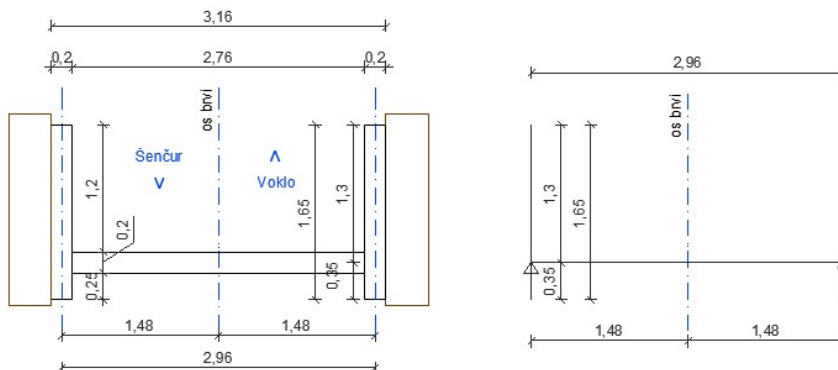
Za kontrolo povesov sekundarnih lesenih nosilcev se definirajo štiri različne obtežne kombinacije, ki so prikazane v preglednici 37.

Preglednica 37: Obtežne kombinacije za kontrolo povesov sekundarnih vzdolžnih elementov

Oznaka	Lo	So	gr1	gr2
MSU_V1	1	1 * So0	1 * gr1.0	0
MSU_V2	1	1 * So0	0	1
MSU_V3	1	1 * So1	1 * gr1.1	0
MSU_V4	1	1 * So2	1 * gr1.2	0

6.4 2D model za dimenzioniranje prečnih elementov

V prečni smeri sta oba primarna lesena lepljena nosilca povezana z okvirji iz jeklenih vroče valjanih profilov. Jekleni okvirji so vzdolž mostu pozicionirani na osni razdalji 3 m. Zaradi bočnega zavarovanja lesenih lepljencev so predvideni jekleni nosilci med seboj povezani v obliki črke H. Elementi se obremenijo z lastno težo, stalno obtežbo podnic in vzdolžnih elementov ter obtežbo prometa. Dodatno se upošteva tudi vpliv notranjih sil v lesenih lepljencih oz obremenitev zaradi bočnega zavarovanja le teh. Računski model za analizo notranjih statičnih količin v jeklenem elementu prikazuje Slika 35.



Slika 35: Prikaz prečnega prereza projektirane brvi (levo); prikaz računskega modela (desno)

Stalna obtežba s podnic in vzdolžnih elementov se na jekleni nosilec prenaša točkovno preko petih nosilcev. Zaradi različnih medosnih razdalij je vrednost točkovne obtežbe notranjih treh nosilcev ($G_{k,1}$) nekoliko večja od vrednosti točkovne obtežbe, ki se prenaša preko zunanjih dveh vzdolžnih nosilcev ($G_{k,2}$).

$$G_{k,1} = G_{k,pod,1} + G_{k,vzd} = 1,230 \text{ kN} + 0,75 \text{ kN} = 1,98 \text{ kN} \quad (59)$$

Kjer sta:

$G_{k,pod,1}$ - stalna obtežba s podnic - prenos preko enega notranjega vzdolžnega nosilca in

$G_{k,vzd}$ - stalna obtežba vzdolžnega nosilca.

$$G_{k,2} = G_{k,pod,2} + G_{k,vzd} = 1,01 \text{ kN} + 0,75 \text{ kN} = 1,76 \text{ kN} \quad (60)$$

Kjer je:

$G_{k,pod,2}$ - stalna obtežba s podnic - prenos preko enega zunanjega vzdolžnega nosilca.

Vrednost točkovne obtežbe zaradi vpliva stalne obtežbe podnic - prenos preko notranjih treh vzdolžnih nosilcev:

$$G_{k,pod,1} = b_{os} \cdot h \cdot l_{os} \cdot \gamma_{D40} = 0,59 \text{ m} \cdot 0,12 \text{ m} \cdot 3 \text{ m} \cdot 5,79 \text{ kN/m}^3 = 1,23 \text{ kN}. \quad (61)$$

Kjer so:

b_{os} - medosna razdalja med lesenimi vzdolžnimi nosilci,

h - višina podnice,

l_{os} - medosna razdalja med jeklenimi nosilci in

γ_{D40} - prostorninska teža masivnega lesa D40.

Ocenjena vrednosti točkovne obtežbe zaradi vpliva stalne obtežbe podnic – prenos preko zunanjih dveh vzdolžnih nosilcev:

$$G_{k,pod,2} = b_{rob} \cdot h \cdot l_{os} \cdot \gamma_{D40} = 0,49 \text{ m} \cdot 0,12 \text{ m} \cdot 3 \text{ m} \cdot 5,79 \text{ kN/m}^3 = 1,01 \text{ kN}. \quad (62)$$

Kjer je:

b_{rob} - razdalja od konca podnice do osi sekundarnega lesenega vzdolžnega nosilca.

Ocenjena vrednost točkovne obtežbe zaradi vpliva teže vzdolžnih nosilcev:

$$G_{k,vzd} = b \cdot h \cdot l_{os} \cdot \gamma_{GL28h} = 0,24 \text{ m} \cdot 0,26 \text{ m} \cdot 3 \text{ m} \cdot 4,02 \text{ kN/m}^3 = 0,75 \text{ kN}. \quad (63)$$

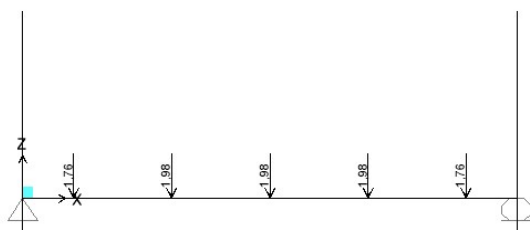
Kjer so:

b - širina vzdolžnega nosilca,

h - višina vzdolžnega nosilca in

γ_{GL28h} - prostorninska teža lepljenega lesa GL28h.

Ker ima model samo eno polje je najbolj neugoden le en razporeditve obtežbe (So0) prikazan na Sliki 36.



Slika 36: Stalna obtežba podnic in vzdolžnih elementov ($G_{k,1}$, $G_{k,2}$); nanos v enem polju (So0)

Vpliv enakomerno porazdeljene prometne obtežbe pešcev in kolesarjev sem določila na enak način kot v primeru stalne obtežbe. Vrednost točkovne obtežbe zaradi vpliva porazdeljene prometne obtežbe pešcev in kolesarjev - prenos preko notranjih treh vzdolžnih nosilcev:

$$Q_{fk,1} = q_{fk} \cdot b_{os} \cdot l_{os} = 5,00 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,59 \text{ m} \cdot 3,00 \text{ m} = 8,85 \text{ kN}. \quad (64)$$

Kjer so:

q_{fk} - enakomerno porazdeljena linijska obtežba zaradi obtežbe pešcev in kolesarjev,

b_{os} - osna razdalja med lesenimi vzdolžnimi elementi in

l_{os} - osna razdalja med jeklenimi prečnimi elementi.

Ocena vrednosti točkovne obtežbe zaradi vpliva porazdeljene prometne obtežbe pešcev in kolesarjev – prenos preko zunanjih dveh vzdolžnih nosilcev:

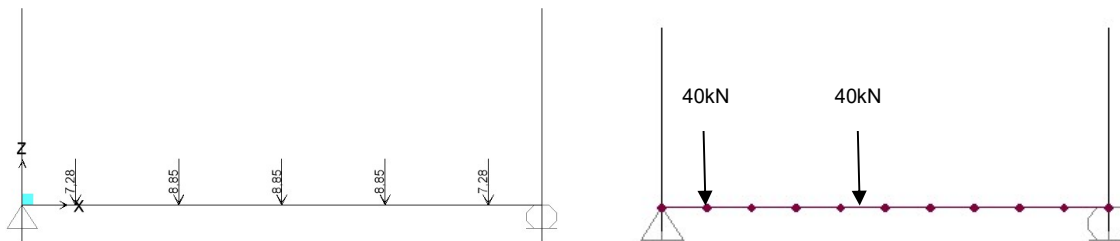
$$Q_{fk,1} = q_{fk} \cdot b_{rob} \cdot l_{os} = 5,00 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,49 \text{ m} \cdot 3,00 \text{ m} = 7,28 \text{ kN}. \quad (65)$$

Kjer je:

b_{rob} - razdalja od konca podnice do osi sekundarnega lesenega vzdolžnega nosilca.

Obtežba pešcev in kolesarjev (Po0) se razporedi na enak način kot v primeru stalne obtežbe. Konstrukcija je zasnovana tako, da je na njej omogočen dostop za servisna vozila (Q_{SV1}).

Temu primerno je potrebno zagotoviti, da element prenese osno obtežbo v skupni vrednosti 80kN v obliki dveh sil (2x40 kN), ki delujeta na medsebojni razdalji 1,30 m (Slika 37).



Slika 37: Obt. pešcev in kolesarjev ($Q_{fk,1}$, $Q_{fk,2}$ - Po0) - levo; obt. servisnega vozila (Q_{sv1})

Z namenom kontrole najbolj neugodnega vpliva na konstrukcijo se definirajo naslednje obtežne kombinacije, kot jih prikazuje Preglednica 38.

Preglednica 38: Obtežne kombinacije za kontrolo jeklenih elementov

Oznaka	Lo	So0	Po0	Q_{sv1}
COP1	1,35	1,35	1,35	0
COP2	1,35	1,35	0	1,35

Ločeno se pri modelu upošteva še vpliv zaradi bočne zvrnitve nosilca. Jeklena nosilca sta namreč vpeta na oddaljenosti 0,49 m od osi primarnega nosilca. Pri pregledu rezultatov (točka 7.) je mogoče ugotoviti, da izmed vseh najbolj izstopata dve kombinaciji obtežbe.

1. Pregled rezultatov 2D modela za dimenzioniranje prečnih elementov pokaže, da se največje notranje sile v elementih pojavijo kot posledica kombinacije COP2 ($1,35 Lo$ "+" $1,35 So0$ "+" $1,35 Q_{sv1}$) – obtežba servisnega vozila.
2. Pregled rezultatov 3D modela pokaže, da se največji pozitivni momenti pojavijo na sredini mostu zaradi kombinacije CO11 ($1,35 Lo0$ "+" $1,35 So2$ "+" $1,35 Gr1.2$ "+" $0,3 \cdot 1,5Fw,k$) – enakomerno porazdeljena obtežba pešcev in kolesarjev, ki deluje v srednjem polju.

Vpliv bočne zvrnitve – vpliv servisnega vozila (1)

Prva serija dodatnih kombinacij (3 kombinacije) obtežb predvideva, da se vrednostim dobljenim v 2D modelu, zaradi delovanja servisnega vozila, prištejejo pripadajoče notranje sile, ki se v prečne elemente prenesejo preko delovanja primarnih vzdolžnih nosilcev.

Zaradi pozitivnega upogibnega momenta (maksimalna vrednost na sredini mostu) se v zgornjem delu nosilca pojavi tlačni pas. Vpliv uklona tlačnega pasu se ponazori z izračunom rezultante tlačnih napetosti ($N_{d,CO2}$) kot funkcije upogibnega momenta ($M_{d,CO2}$) in višine elementa (h):

$$N_{d,CO2} = (1 - k_{crit}) \cdot \frac{M_{d,CO2}}{h} = \frac{1611,02 \text{ kNm}}{1,8 \text{ m}} = 913,34 \text{ kN.} \quad (66)$$

Kjer so:

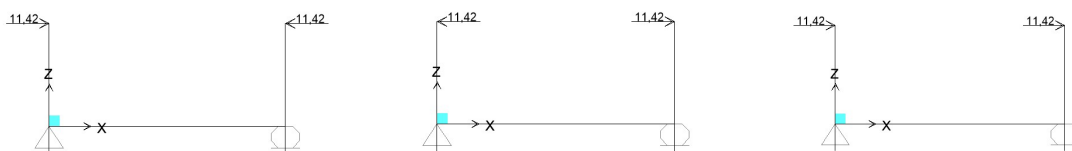
k_{crit} - koeficient, ki upošteva vpliv vitkosti tlačnega pasu; konzervativno ga ocenim na $k_{crit} \approx 0$,

$M_{d,CO2}$ – največji upogibni moment primarnega nosilca v primeru kombinacije obtežbe ob upoštevanju vpliva servisnega vozila (CO2) in
 h - višina nosilca [m].

Vrednost nadomestne obtežbe ($F_{d,CO2}$) za določitev potrebne računske nosilnosti sem določila v odvisnosti od rezultante tlačnih osnih napetosti ($N_{d,CO2}$) in za lepljen les znaša:

$$F_{d,CO2} = \frac{N_d}{80} = \frac{913,34 \text{ kN}}{80} = 11,42 \text{ kN}. \quad (67)$$

Nadomestno obtežbo sem nanela na model v treh različnih obtežnih primerih tako, da povzroči ekstremne vrednosti notranjih sil v elementih. Načine obremenitve matematičnega modela prikazuje Slika 38.



Slika 38: Nadomestna obtežba zaradi preprečevanja bočne zvrnitve primarnih nosilcev, Bo1 - levo; Bo2 – sredina; Bo3 – desno

Novo tri kombinacije obtežb so prikazane v Preglednici 39 in obsegajo kombinacijo obstoječih vplivov COP2 z vplivom zaradi bočne zvrnitve Bo1, Bo2 in Bo3. Nadomestna obtežba je že pomnožena z varnostnimi faktorji, zato se dodatno ne faktorira.

Preglednica 39: Prva serija dodatnih kombinacij obtežb

Oznaka	Lo	So0	Po0	Q_{SV1}	Bo
COB1	1,35	1,35	0	1,35	1,0*Bo1
COB2	1,35	1,35	0	1,35	1,0*Bo2
COB3	1,35	1,35	0	1,35	1,0*Bo3

Vpliv bočne zvrnitve – enakomerno porazdeljena obtežba pešcev in kolesarjev

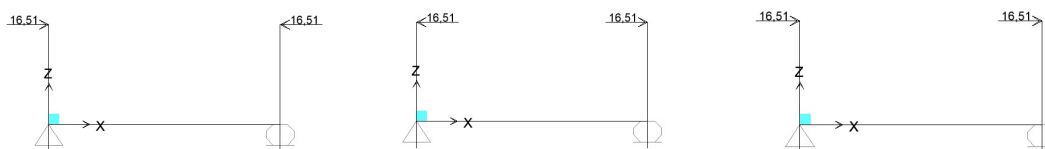
Rezultanta tlačnih osnih napetosti ($N_{d,CO11}$) zaradi vpliva upogibnega momenta:

$$N_{d,CO11} = (1 - k_{crit}) \cdot \frac{M_{d,CO11}}{h} = \frac{2376,80 \text{ kNm}}{1,8 \text{ m}} = 1320,45 \text{ kN}$$

Nadomestna obtežba (F_{CO11}) znaša:

$$F_{CO11} = \frac{N_d}{80} = \frac{1320,45 \text{ kN}}{80} = 16,51 \text{ kN}$$

Tri dodatne obtežne primere nadomestne obtežbe zaradi preprečevanja bočne zvrnitve prikazuje Slika 39.



Slika 39: Nadomestna obtežba zaradi preprečevanja bočne zvrnitve, Bo4 - levo; Bo5 – sredina; Bo6 – desno

Novo tri kombinacije obtežb obsegajo kombinacijo obstoječih vplivov COP1 z vplivom zaradi bočne zvrnitve Bo4, Bo5 in Bo6. Nadomestna obtežba je že pomnožena z varnostnimi faktorji, zato se dodatno ne faktorira. Drugo serijo dodatnih kombinacij obtežb prikazuje Preglednica 40.

Preglednica 40: Druga serija dodatnih kombinacij obtežb

Oznaka	Lo	So0	Po0	Q_{SV1}	Bo
COB4	1,35	1,35	1,35	0	1,0*Bo4
COB5	1,35	1,35	1,35	0	1,0*Bo5
COB6	1,35	1,35	1,35	0	1,0*Bo6

Kontrola togosti jeklenega prečnega okvirja

Kontrola togosti jeklenega prečnega okvirja se izvede za zagotavljanje ustreznega bočnega podpiranja glavnega lesenega nosilca. Standard SIST EN 1995-1-1:2005 v točki 9.2.5 predpisuje, da mora imeti vsaka vmesna podpora vsaj minimalno vzmetno togost (c_{min}).

Zahtevano minimalno vzmetno togost (c_{min}) v odvisnosti od tlačne sile ($N_{d,CO11}$), ki je posledica upogibnega momenta v primarnem lepljenem nosilcu, izračunam glede na spodnjo enačbo:

$$c_{min} = \frac{k_s \cdot N_{d,CO11}}{a}, 1 \leq k_s \leq 4. \quad (68)$$

Kjer so:

k_s - modifikacijski faktor, katerega priporočena vrednost znaša $k_s = 4$,

$N_{d,CO11}$ - tlačna osna sila

a - dolžina polja

Minimalna vzmetna togost (c_{min}) vmesne podpore:

$$c_{min} = \frac{4 \cdot 1315,45 \text{ kN}}{3 \text{ m}} = 1753,93 \text{ kN/m}.$$

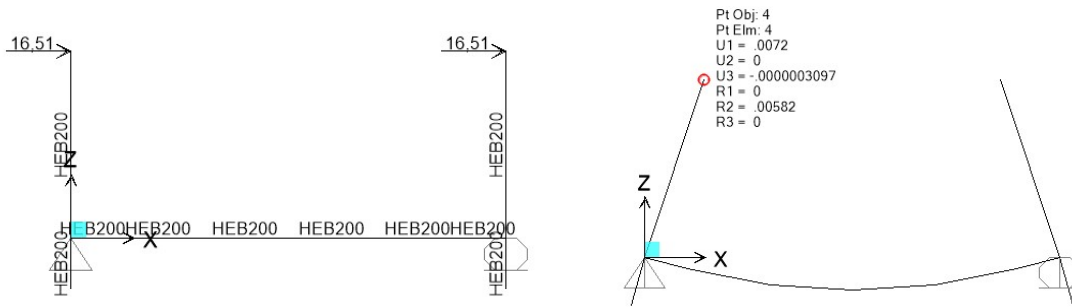
Za določitev dejanske togosti jeklenega elementa sem preverila pomike pri nanosu obtežbe, kot je prikazano v sliki 38. Ekstremna vrednost pomika se pojavi ob načinu obremenitve, kot je prikazano v Sliki 39. Togost jeklenega elementa znaša:

$$c_{dej} = \frac{F}{u} = \frac{16,51 \text{ kN}}{0,0072 \text{ m}} = 2294,99 \text{ kN/m}. \quad (69)$$

Kjer sta:

F - nadomestna obtežba (F_{CO11}) in

u - ekstremni pomik.



Slika 40: Obremenitev okvirja (levo), prikaz pomikov (desno)

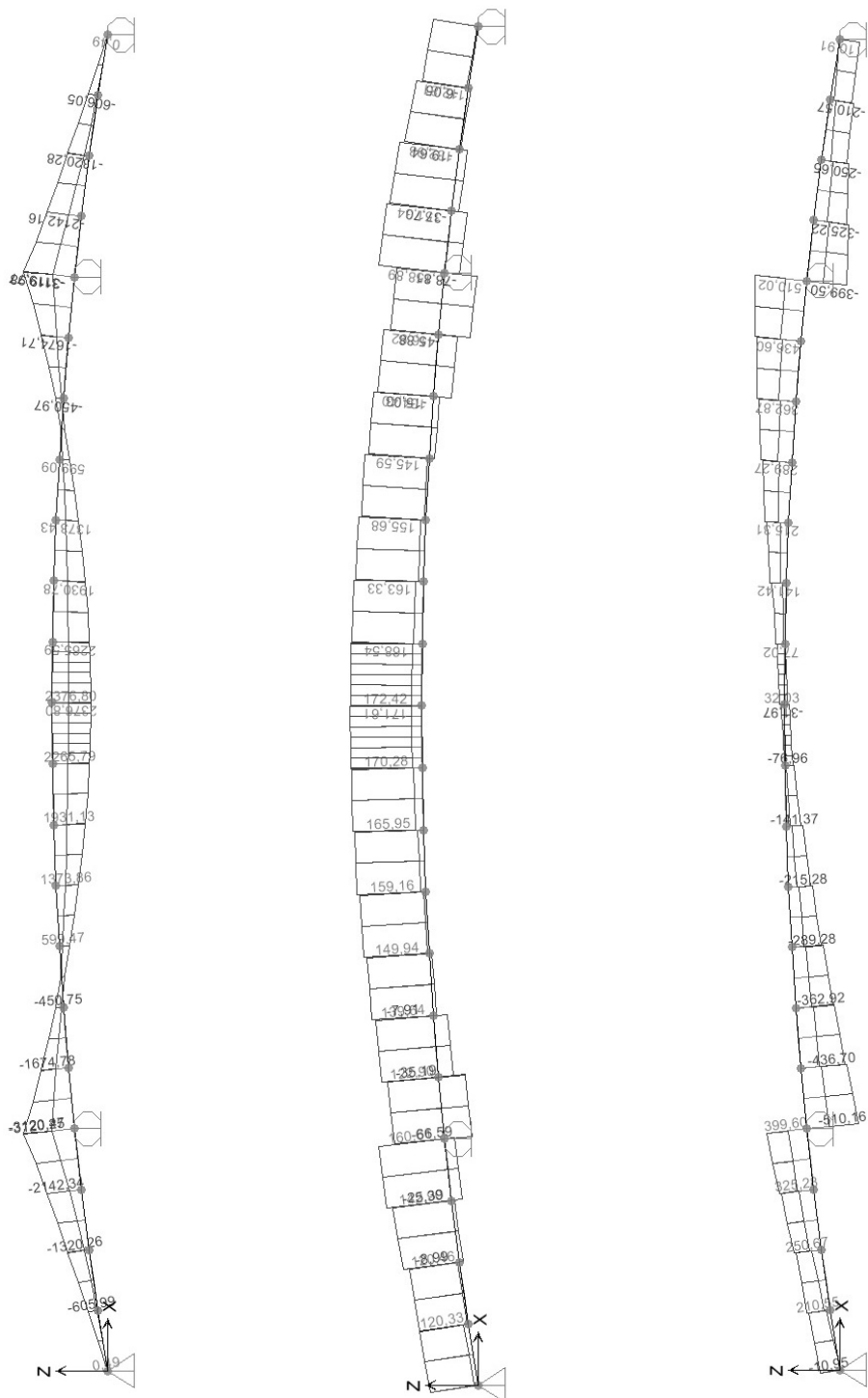
Kontrola minimalne togosti vmesne podpore znaša:

$$c_{min} = 1753,93 \text{ kN/m} \leq c_{dej} = 2292,68 \text{ kN/m}.$$

7 REZULTATI

7.1 Prostorski model

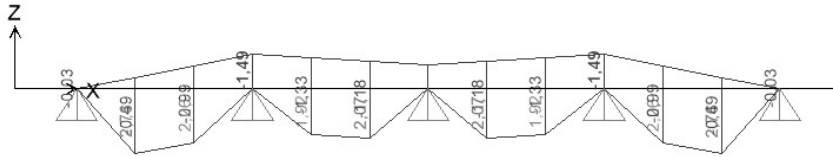
Ovojnice notranjih sil relevantnih za dimenzioniranje primarnih lesenih nosilcev prikazuje Slika 40.



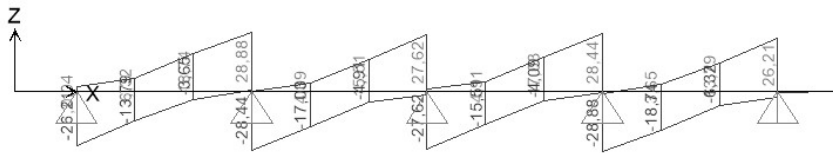
Slika 41: Ovojnici upogibnih momentov M_y [kNm] - levo, osnih sil N [kN] - sredina, prečnih sil V_z [kN] - desno

7.2 Notranje sile v podnicah

Ovojnice notranjih sil relevantnih za dimenzioniranje podnic sta prikazani na Sliki 42 in 43.



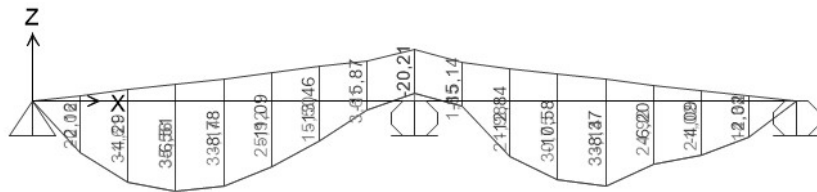
Slika 42: Ovojnici upogibnih momentov M_y [kNm]



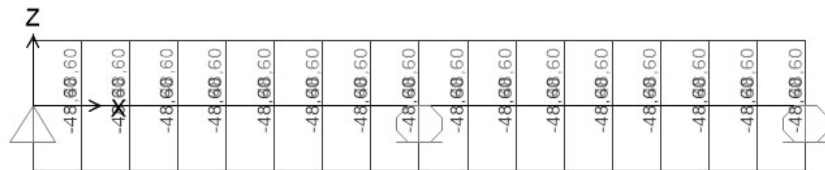
Slika 43: Ovojnici prečnih sil V_z [kN]

7.3 Notranje sile v vzdolžnih elementih

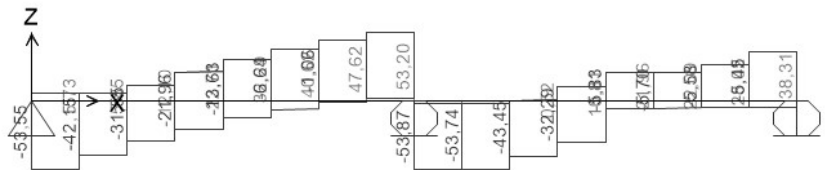
Ovojnice notranjih sil relevantnih za dimenzioniranje vzdolžnih elementov so prikazane na slikah 44 do 46.



Slika 44: Ovojnici upogibnih momentov M_y [kNm]



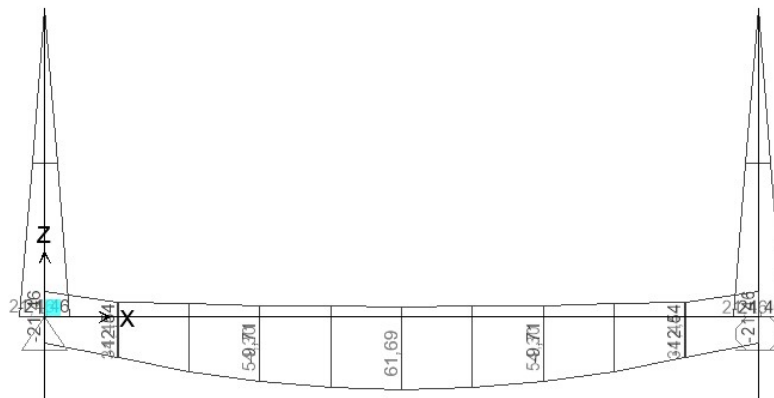
Slika 45: Ovojnici osnih sil N [kN]



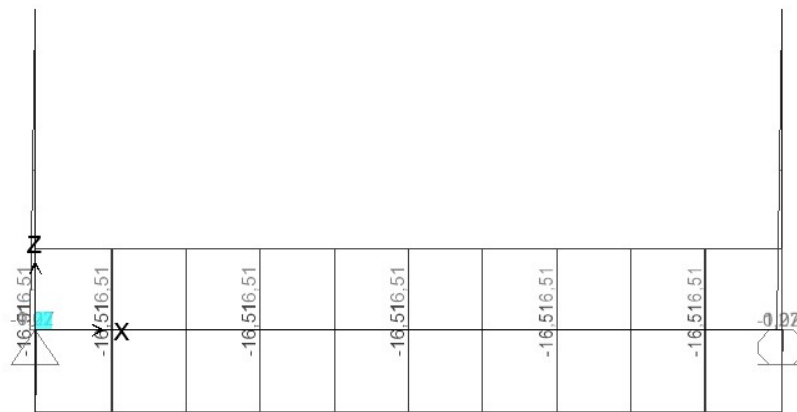
Slika 46: Ovojnici prečnih sil V_z [kN]

7.4 Notranje sile v jeklenih elementih

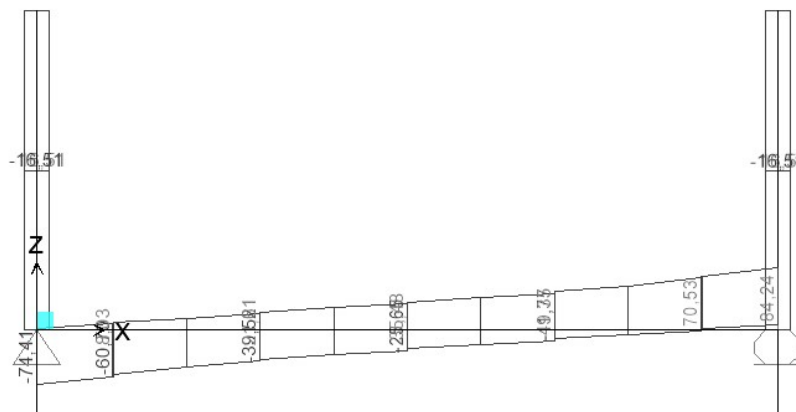
Ovojnice notranjih sil relevantnih za dimenzioniranje jeklenih elementov so prikazane na slikah 47 do 49.



Slika 47: Ovojnici upogibnih momentov M_y [kNm]



Slika 48: Ovojnici osnih sil N [kN]



Slika 49: Ovojnici prečnih sil V_z [kN]

8 DIMENZIONIRANJE ELEMENTOV

8.1 Kontrola lameliranih lepljenih elementov

8.1.1 Primarni vzdolžni nosilci

Obtežba mostu se preko sekundarnih elementov brvi prenaša na dva primarna vzdolžna nosilca dolžine 65,74 m in z dimenzijami $b/h = 40/180$ cm. Celotni nosilec je ukrivljen v radiju 200m. Nosilec sem razdelila na tri dele, predvsem zaradi problemov pri transportu elementov na končno lokacijo. Spoji nosilca so predvideni na mestu najmanjših upogibnih obremenitev v sredinskem polju. Nosilec je iz lameliranega lesa trdnostnega razreda GL28h, njegove geometrijske karakteristike pa so prikazane v Preglednici 41.

Preglednica 41: Geometrijske karakteristike primarnega vzdolžnega nosilca

$h_{ap} =$	180 cm	$r =$	20000 cm
$b_{ap} =$	40 cm	$r_{in} =$	19910 cm
$A_{ap} =$	7200 cm ²	$t =$	3 cm
$W_{y,ap} =$	216000 cm ³	$\alpha_{ap} =$	0
$I_z =$	19440000 cm ⁴		

Kontrole mejnega stanja nosilnosti (MSN) izvedemo na mestih ekstremnih vrednosti notranjih sil z upoštevanjem pripadajočih ostalih notranjih sil. Spodnja preglednica z odebeljeno pisavo označuje vrednosti ekstremnih momentov (M_{max} in M_{min}), osnih (N_{max} in N_{min}) in prečnih sil (V_{max} in V_{min}) ter njim pripadajoče vrednosti ostalih notranjih sil. Za vsako izmed 6 kombinacij nato izvedemo kontrole normalnih in strižnih napetosti. V diplomski nalogi sem obravnavala samo najbolj kritično izmed njih. Ta je v Preglednici 42 označena v obarvanem polju.

Preglednica 42: Ekstremne vrednosti notranjih sil in pripadajoče notranje sile

		Merodajne statične količine					
		1. $M_{Ed,max}$	2. $M_{Ed,min}$	3. $N_{Ed,max}$	4. $N_{Ed,min}$	5. $V_{Ed,max}$	6. $V_{Ed,min}$
Notranje statične količine	$M_{Ed,y}$	2376,80	-3120,47	-1547,35	-1544,63	-3119,98	-3120,47
	N_{Ed}	104,48	19,54	203,17	-78,82	15,92	19,54
	$V_{Ed,z}$	-8,88	-510,16	276,57	249,64	510,02	-510,16
	$V_{Ed,y}$	0,00	-0,30	-1,62	-0,07	0,28	-0,30
	T_{Ed}	-1,33	-3,91	13,83	0,05	3,89	-3,91
	$M_{Ed,z}$	-0,51	-0,09	3,81	1,52	-0,02	-0,09
	kombinacija	CO11	CO19	CO02	CO04	CO23	CO19

Kjer obtežne kombinacije vsebujejo naslednje obtežne primere:

Oznaka	Lo	So	gr1	gr2	Fw,k	Tk.ogr	Tk.shl.
CO11	1,35	1,35 * So2	1,35 * gr1.2	0	1,5 * 0,3	0	0
CO19	1,35	1,35 * So4	1,35 * gr1.4	0	1,5 * 0,3	0	0
CO02	1,35	1,35 * So0	0	1,35	1,5 * 0,3	0	0
CO04	1,35	1,35 * So0	0	0	1,5	0	0
CO23	1,35	1,35 * So5	1,35 * gr1.5	0	1,5 * 0,3	0	0

Kontrola upogibne nosilnosti nosilca

Kontrola upogibne nosilnosti se izvede na mestu minimalnega momenta (nad oporno steno):

$$\sigma_{m,g,d} = k_l \cdot \frac{M_{Ed}}{W_{y,ap}} \leq f_{m,g,d} \cdot k_r \quad (70)$$

Kjer so:

k_l - koeficient, ki upošteva vpliv višine nosilca (h_{ap}), naklon roba pri slemenu (α_{ap}) in radij ukrivljenosti (r),

M_{Ed} - ekstremna vrednost upogibnega momenta,

$W_{y,ap}$ - odpornostni moment prereza,

$f_{m,g,d}$ - upogibna trdnost lepljenega lesa in

k_r - koeficient, ki upošteva vpliv krivljenja lamel med proizvodnjo.

Koeficient (k_l), ki upošteva vpliv višine nosilca (h_{ap}), naklon roba pri slemenu (α_{ap}) in radij ukrivljenosti (r) znaša:

$$k_l = k_1 + k_2 \left(\frac{h_{ap}}{r} \right) + k_3 \left(\frac{h_{ap}}{r} \right)^2 + k_4 \left(\frac{h_{ap}}{r} \right)^3 \quad (71)$$

$$k_l = 1 + 0,35 \left(\frac{180}{20000} \right) + 0,6 \left(\frac{180}{20000} \right)^2 = 1,003$$

Kjer so:

k_1, k_2, k_3, k_4 - koeficienti po spodnjih enačbah:

$$k_1 = 1 + 1,4 \tan \alpha_{ap} + 5,4 \tan^2 \alpha_{ap} = 1 + 0 + 0 = 1 \quad (72)$$

$$k_2 = 0,35 - 8 \tan \alpha_{ap} = 0,35 - 0 = 0,35 \quad (73)$$

$$k_3 = 0,6 + 8,3 \tan \alpha_{ap} - 7,8 \tan^2 \alpha_{ap} = 0,6 + 0 - 0 = 0,6 \quad (74)$$

$$k_4 = 6 \tan^2 \alpha_{ap} = 0 \quad (75)$$

h_{ap} - višina nosilca in

α_{ap} - naklon nagnjenega roba ($\alpha_{ap} = 0$).

Odpornostni moment prereza (W_y):

$$W_{y,ap} = \frac{b_{ap} \cdot h_{ap}^2}{6} = \frac{40 \cdot 180^2}{6} = 216000 \text{ cm}^3. \quad (76)$$

Upogibna trdnost lepljenega lesa $f_{m,d}$:

$$f_{m,g,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,g,k}}{\gamma_m}. \quad (77)$$

Kjer so:

k_{mod} - modifikacijski faktor,

$f_{m,g,k}$ - karakteristična upogibna trdnost lepljenega lesa in

γ_m - materialni varnostni faktor ($\gamma_m = \gamma_{GL28} = 1,25$).

$$f_{m,g,d} = 0,9 \cdot \frac{2,8 \text{ kN/cm}^2}{1,25} = 2,016 \text{ kN/cm}^2$$

Koeficient, ki upošteva vpliv krivljenja lamel med proizvodnjo (k_r):

$$k_r = \begin{cases} 1 & \text{za } \frac{r_{in}}{t} \geq 240 \\ 0,76 + 0,001 \frac{r_{in}}{t} & \text{za } \frac{r_{in}}{t} < 240 \end{cases} \quad (78)$$

Kjer sta:

r_{in} - radij ukrivljenosti v notranji osi lepljenega nosilca in

t - debelina lamele.

Notranji radij ukrivljenosti lepljenega nosilca (r_{in}):

$$r_{in} = r - \frac{h_{ap}}{2} = 20000 - \frac{180}{2} = 19910 \text{ cm}. \quad (79)$$

Koeficient, ki upošteva vpliv krivljenja lamel med proizvodnjo (k_r) je tako:

$$k_r = 1; \text{ zaradi } \frac{r_{in}}{t} = \frac{19910}{3} = 6636 \geq 240.$$

Kontrola upogibne napetosti:

$$\sigma_{m,g,d} = 1,003 \cdot \frac{3120,47 \cdot 100}{216000} = 1,449 \text{ kN/cm}^2 \leq 1 \cdot 2,016 \text{ kN/cm}^2 \quad (80)$$

Ker so pripadajoče osne sile zanemarljive v primerjavi z momentom, jih v kontroli upogibne nosilnosti nisem upoštevala.

Kontrola natezних napetosti pravokotno na vlakna – preprečevanje cepitve elementa

Kontrolo prečne napetosti sem izvedla na mestu ekstremnega pozitivnega momenta (na sredini razpona nosilca), kjer bi se eventualno lahko pokazale največje cepilne napetosti:

$$\sigma_{t,90,g,d} = k_p \cdot \frac{M_{ap,d}}{W_y} \leq k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,g,d}. \quad (81)$$

Kjer so:

$\sigma_{t,90,g,d}$ - največja natezna napetost pravokotno na vlakna,

k_p - koeficient, ki upošteva nelinearen potek radialnih napetosti po prerezu,

$M_{ap,d}$ - ekstremni pozitivni upogibni moment ($M_{ap,d} = 2376,80 \text{ kN/m}$),

W_y - odpornostni moment prereza ($W_y = 150000 \text{ cm}^3$),

k_{dis} - koeficient, ki upošteva učinek porazdelitve napetosti v temenskem območju ($k_{dis} = 1,4$),

k_{vol} - koeficient, ki upošteva vpliv volumna in

$f_{t,90,g,d}$ - projektna natezna trdnost pravokotno na vlakna.

Koeficient, ki upošteva nelinearen potek radialnih napetosti po prerezu (k_p):

$$k_p = k_5 + k_6 \left(\frac{h_{ap}}{r} \right) + k_7 \left(\frac{h_{ap}}{r} \right)^2 = 0 + 0,25 \cdot \left(\frac{180}{20000} \right) + 0 = 0,0023. \quad (82)$$

Kjer so:

k_5, k_6, k_7 - koeficienti po spodnjih izrazih,

$$k_5 = 0,2 \tan \alpha_{ap} = 0 \quad (83)$$

$$k_6 = 0,25 - 1,5 \tan \alpha_{ap} + 2,6 \tan^2 \alpha_{ap} = 0,25 - 0 + 0 = 0,25 \quad (84)$$

$$k_7 = 2,1 \tan \alpha_{ap} - 4 \tan^2 \alpha_{ap} = 0 \quad (85)$$

h_{ap} - višina lepljenega lameliranega nosilca,

r - radij ukrivljenosti in

α_{ap} - naklon nagnjenosti roba glede na os elementa ($\alpha_{ap} = 0$).

Koeficient, ki upošteva vpliv volumna (k_{vol}) znaša za lepljen lameliran les:

$$k_{vol} = \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0,2}. \quad (86)$$

Kjer sta:

V_0 - referenčna prostornina ($V_0 = 10000 \text{ cm}^3$) in

V - prostornina temenskega območja ($V \leq \frac{2}{3} V_b$).

Prostornina temenskega območja (V):

$$V \leq \frac{2}{3} \cdot V_{ap} = \frac{2}{3} \cdot 39678000 = 26524000 \text{ cm}^3. \quad (87)$$

Kjer je:

V_{ap} - volumen celotnega nosilca

Volumen celotnega nosilca:

$$V_{ap} = b_{ap} \cdot h_{ap} \cdot s_{ap} = 40 \text{ cm} \cdot 180 \text{ cm} \cdot 6631 \text{ cm} = 31828800 \text{ cm}^3. \quad (88)$$

Kjer so:

b_{ap} - širina lameliranega nosilca,

h_{ap} - višina lameliranega nosilca in

s_{ap} - dolžina lameliranega nosilca.

$$k_{vol} = \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0,2} = \left(\frac{10000 \text{ cm}^3}{31828800 \text{ cm}^3} \right)^{0,2} = 0,199$$

Projektna natezna trdnost pravokotno na vlakna ($f_{t,90,d}$):

$$f_{t,90,g,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{t,90,g,k}}{\gamma_m} = 0,9 \cdot \frac{0,045 \text{ kN/cm}^2}{1,25} = 0,032 \text{ kN/cm}^2. \quad (89)$$

Kontrola natezних napetosti v prečni smeri glede na vlakna:

$$\sigma_{t,90,g,d} = 0,0023 \cdot \frac{237680 \text{ kNcm}}{216000 \text{ cm}^3} \leq 1,4 \cdot 0,199 \cdot 0,032 \text{ kN/cm}^2 \quad (90)$$

$$\sigma_{t,90,g,d} = 0,002 \text{ kN/cm}^2 \leq 0,009 \text{ kN/cm}^2$$

Kontrola strižnih napetosti

Kontrola strižnih napetosti za element se izvede na podlagi spodnje enačbe:

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{\frac{2A_{ef}}{3}} \leq f_{v,g,d} \quad (91)$$

Kjer so:

τ_{Ed} - projektne strižne napetosti zaradi vpliva prečne sile,

V_{Ed} - projektna vrednost prečne sile,

A_{ef} - učinkoviti prečni prerez elementa in

$f_{v,g,d}$ - projektna strižna trdnost lesa.

Učinkoviti prečni prerez elementa se izračuna po spodnji enačbi:

$$A_{ef} = b_{ef} \cdot h_{ap} = 26,8 \cdot 180 \text{ cm} = 4824 \text{ cm}^2. \quad (92)$$

Kjer sta:

b_{ef} - efektivna širina elementa in

h_{ap} - višina elementa.

Efektivna širina elementa (b_{ef}) se za masivni in lepljeni les izračuna z upoštevanjem koeficienta k_{cr} .

$$b_{ef} = b_{ap} \cdot k_{cr} = 40 \text{ cm} \cdot 0,67 = 26,8 \text{ cm} \quad (93)$$

Projektna strižna trdnost ($f_{v,g,d}$) za les kvalitete GL 28 h:

$$f_{v,g,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{v,g,k}}{\gamma_m} = 0,9 \cdot \frac{0,32 \text{ kN/cm}^2}{1,25} = 0,230 \text{ kN/cm}^2. \quad (94)$$

Kontrola strižnih napetosti za najbolj obremenjen prerez znaša:

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{\frac{2}{3}A_{ef}} = \frac{510,02 \text{ kN}}{\frac{2}{3} \cdot 4824} = 0,159 \text{ kN/cm}^2 \leq f_{v,g,d} = 0,230 \text{ kN/cm}^2.$$

Interakcija striga in natezne napetosti pravokotno na vlakna:

V temenskem območju morajo napetosti pri kombinaciji natega pravokotno na vlakna ($\sigma_{t,90,d}$) in striga (τ_{Ed}) zadostiti naslednjemu pogoju:

$$\frac{\tau_{Ed}}{f_{v,d}} + \frac{\sigma_{t,90,d}}{k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d}} \leq 1 \quad (95)$$

Ker so strižne napetosti v območju ekstremnih prečnih nateznih napetosti minimalne, in obratno, je enačbi avtomatično zadoščeno. Izbrani prečni prerez zadostuje vsem kontrolam mejnega stanja nosilnosti.

Bočna zvrnitev lepljenega nosilca

Ker je v prečnih jeklenih okvirjih, ki preprečujejo bočno zvrnitev primernih nosilcev na razdalji 3,0 m in so spodaj povezani s prekržanimi diagonalami, ki so del zavarovalne konstrukcije sem pri dimenzioniranju primarnih nosilcev upoštevala polno upogibno nosilnost – torej, da so bočno podprti. V nadaljevanju je skladno s točko 6.3.3. standarda SIST EN 1995 – 1-1:2005 dokazana upravičenost te predpostavke.

Relativna upogibna vitkost pri upogibu ($\lambda_{rel,m}$):

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{f_{m,g,k} / \sigma_{m,crit}} \quad (96)$$

Kjer je:

$\sigma_{m,crit}$ - kritična upogibna napetost

Kritična upogibna napetost ($\sigma_{m,crit}$), dobljena s poenostavljenim izrazom za elemente iz lesa iglavcev, pravokotnega prečnega prereza:

$$\sigma_{crit,m} = \frac{0,78 \cdot b_{ap}^2}{h_{ap} \cdot l_{ef}} \cdot E_{0,05} = \frac{0,78 \cdot 40^2}{180 \cdot 300} \cdot 1020 = 23,57 \text{ kN/cm}^2. \quad (97)$$

Kjer so:

b_{ap} - širina lepljenega elementa,

h_{ap} - višina lepljenega elementa,

$E_{0,05}$ - elastični modul (definiran za posamezne trdnosti materiala; $E_{0,05} = 1020 \text{ kN/cm}^2$) in

l_{ef} - efektivna dolžina nosilca (standard predlaga $L_{ef} = L = 300 \text{ cm}$).

Kljub temu, da se napetostni momenti po dolžini primarnih nosilcev med jeklenimi okvirji spreminjajo, sem privzela konzervativno predpostavko, da velja $L_{ef} = L = 300 \text{ cm}$.

Relativna upogibna vitkost ($\lambda_{rel,m}$) znaša:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,g,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{2,800}{23,57}} = 0,345. \quad (98)$$

Kot že omenjeno je relativna upogibna vitkost (λ_{rel}) kriterij za nevarnost pojava bočne zvrnitve.

$$\text{V primeru, da } \begin{cases} \lambda_{rel,m} \leq 0,75 & \dots \text{ ni nevarnosti bočne zvrnitve} \\ \lambda_{rel,m} > 0,75 & \dots \dots \dots \text{ nevarnost bočne zvrnitve} \end{cases} \quad (99)$$

Faktor k_{crit} upošteva zmanjšanje upogibne nosilnosti zaradi bočne zvrnitve:

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \dots \dots \dots \text{ za } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75 \cdot \lambda_{rel,m} & \dots \text{ za } 0,75 < \lambda_{rel,m} < 1,4 \\ 1/\lambda_{rel,m}^2 & \dots \dots \dots \text{ za } 1,4 < \lambda_{rel,m} \end{cases} \quad (100)$$

Ker je v obravnavanem primeru $\lambda_{rel,m} = 0,345 \leq 0,75$, nevarnosti bočne zvrnitve ni. Faktor znaša $k_{crit} = 1$. Izvedena kontrola potrjuje ustrezno izbrano predpostavko o bočni stabilnosti prereza.

Kontrole v mejnem stanju uporabnosti

Pri projektiranju lesenih konstrukcij je potrebno poleg napetostnim kriterijem (ti zagotavljajo varnost pred porušitvijo), zadostiti tudi pogojem uporabnosti. To pomeni, da element v času predvidene življenjske dobe zadrži svoj uporabnostni vidik in izgled. EC5 podaja dva uporabnostna kriterija:

- preverjanje deformacije oziroma povese, ki lahko vplivajo na uporabnost in izgled konstrukcijskega elementa in
- preverjanje vibracij, ki bi lahko povzročile nelagodnost uporabnikov in morajo biti v ustreznih okvirih.

Zahteve za povese

Kriterij mejnega stanja uporabnosti se nanaša na začetne (elastične) povese v času obremenitve (w_{inst}) in povese po izvršenem lezenju (w_{fin}). Kontrolo povosov v času obremenitve oziroma kontrolo trenutnega pomika (w_{inst}) se preveri pri karakteristični kombinaciji vplivov:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} * Q_{k,i} \quad (101)$$

S tem namenom so bile pripravljene kombinacije MSU1 do MSU32 (točka 5.2.1.). Ekstremni pomik za obravnavano konstrukcijo se pojavi na sredini nosilca, pri kombinaciji MSU13, kjer obtežba deluje neugodno v osrednjem polju in znaša 12,82 cm. Omenjeno kombinacijo vplivov prikazuje Preglednica 43.

Preglednica 43: Kombinacija obtežnih faktorjev za določitev ekstremnega pomika

Oznaka	Lo	So2	gr1.2	gr2	Fw,k	Tk.ogr	Tk.shl.
MSU13	1,00	1,00	1,00	0	0,3	0	0

Kontrola trenutnega pomika (w_{inst}):

$$w_{inst} = 0,0895 \text{ m} \leq L/300 = 41,92 \text{ m}/300 = 0,1048 \text{ m} \quad (102)$$

Kjer je:

L - osni razpon med podpornima stenama.

Kontrola povosov po izvršenem lezenju oziroma kontrola končnih povosov (w_{fin}) se določi pri začetnih pomikih povečanih za pomike zaradi lezenja, ki jih izračunamo zaradi navidezno stalne kombinacije obtežb:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (103)$$

Lezenje konstrukcije se zajame z upoštevanjem koeficienta lezenja (k_{def}) v obliki:

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q1} + \sum_{i \geq 1} w_{fin,Qi} \quad (104)$$

Kjer so:

$w_{fin,G}$ - povos zaradi delovanja stalne obtežbe,

$w_{fin,Q1}$ - povos zaradi delovanja prevladujoče spremenljive obtežbe in

$w_{fin,Qi}$ - povos zaradi spremljajočih spremenljivih obtežb.

Končni povos zaradi delovanja stalne obtežbe ($w_{fin,G}$), kamor spadata lastna in stalna obtežba:

$$w_{fin,G} = w_{inst,G} (1 + k_{def}) = (0,0364 \text{ m} + 0,0114 \text{ m})(1 + 0,8) = 0,0860 \text{ m}. \quad (105)$$

Kjer sta:

$w_{inst,G}$ - začetni povosi zaradi delovanja lastne in stalne obtežbe in

k_{def} - koeficient lezenja znaša za lameliran lepljen les in razred uporabnosti II.: $k_{def} = 0,8$.

Končni povos zaradi delovanja prevladujoče spremenljive obtežbe ($w_{fin,Q1}$):

$$w_{fin,Q1} = w_{inst,Q1} (1 + \psi_{2,1} k_{def}) = 0,0504 (1 + 0 \cdot 0,8) = 0,0504 \text{ m}. \quad (106)$$

Kjer sta:

$w_{inst,Q1}$ - začetni upogibi zaradi delovanja obtežbe pešcev in kolesarjev in

$\psi_{2,1}$ - faktor za navidezno stalno vrednost spremenljivega vpliva (za temperaturno obtežbo znaša $\psi_{2,1} = 0,5$, v vseh ostalih primerih je $\psi_{2,i} = 0$).

Končni povos zaradi spremljajočih spremenljivih obtežb ($w_{fin,Qi}$):

$$\sum_{i \geq 1} w_{fin,Qi} = \sum_{i \geq 1} w_{inst,Qi} (\psi_{o,i} + \psi_{2,i} k_{def}) = 0,0002 \cdot (0,3 + 0 \cdot 0,8) = 0,0001 \text{ m}. \quad (107)$$

Kjer sta:

$w_{inst,Qi}$ - začetni povosi zaradi delovanja obtežbe vetra in

$\psi_{o,i}$ - faktor za kombinacijsko vrednost spremljajoče spremenljive obtežbe vetra.

Kontrola končnih povosov po izvršenem lezenju oziroma kontrola končnih upogibov (w_{fin}):

$$w_{fin} = 0,0860 \text{ m} + 0,0504 \text{ m} + 0,0001 \text{ m} = 0,1365 \text{ m} \leq L/150 = 41,22 \text{ m}/150 = 0,2061 \text{ m}.$$

Kontrola vibracij brvi:

Vibracije, ki se lahko pojavijo v življenjski dobi konstrukcije ne smejo zmanjševati njne funkcionalnosti in ne smejo moteče vplivati na uporabnike. Pri kontroli se upoštevajo najbolj neugodne pozicije stalne in spremenljive obtežbe. Odziv konstrukcije na dinamično vzbujanjepri uporabi je odvisen predvsem od osnovne lastne frekvence konstrukcije.

Vpliv pešcev in kolesarjev je odvisen od večih faktorjev na primer števila in lokacije pešcev, možnosti, da se uporabniki po konstrukciji gibljejo v skupini in tako dalje. Če so ekstremni vplivi na konstrukcijo izvzeti se lahko privzame, da pešci ob uporabi brvi povzročajo vnos periodičnih sil v konstrukcijo in sicer:

- vertikalne sile s frekvencami med 1 in 3 Hz,

- horizontalne sile s frekvencami med 0,5 in 1,5 Hz.

Skupina tekačev lahko konstrukcijo prečka s frekvenco 3Hz.

Standard SIST EN 1990 v dodatku A2 določa, da je potrebno izvesti dodatne kontrole vibracij v primeru, da so lastne frekvence konstrukcije manjše od:

- 5 Hz za vertikalne vibracije in
- 2,5 Hz za horizontalne in torzijske vibracije.

Z modalno analizo konstrukcija so bili pridobljeni lastni nihajni časi in frekvence obravnavane brvi, kot so prikazani v Preglednici 44. Ker je osnovna lastna frekvenca v vertikalni smeri manjša od 5Hz je potrebno izvesti dodatne kontrole vibracij v vertikalni smeri.

Preglednica 44: Lastni nihajni časi in frekvence obravnavane brvi

Nihajna oblika	T [s]	F[Hz]	Smer gibanja
1.	0,256	3,908	vertikalna
2.	0,192	5,201	horizontalna / torzijska
3.	0,140	7,136	torzijska
4.	0,090	11,143	vertikalna
5.	0,081	12,332	horizontalna / torzijska
6.	0,071	14,182	torzijska

Kontrola vibracij v vertikalni smeri

Kriterij udobja za uporabnika se podrobneje določi na podlagi maksimalnih sprejemljivih pospeškov katerega koli dela objekta. Priporočljive maksimalne vrednosti pospeškov so:

- 0,7 m/s² za vertikalne vibracije,
- 0,2 m/s² za horizontalne vibracije (ob upoštevanju normalne uporabe) in
- 0,4 m/s² za izredne primere (upoštevanje vpliva skupine ljudi).

V primeru, ko ena oseba prečka most, pri tem povzroči vertikalni pospešek ($a_{vert,1}$) v m/s²:

$$a_{vert,1} = \begin{cases} \frac{200}{M \cdot \xi} & \text{za } f_{vert} \leq 2,5 \text{ Hz} \\ \frac{100}{M \cdot \xi} & \text{za } 2,5 \text{ Hz} < f_{vert} \leq 5 \text{ Hz} \end{cases} \quad (108)$$

Kjer sta:

M - masa celotne konstrukcije podana v [kg] in

ξ - faktor dušenja.

Masa celotne konstrukcije (M):

$$M = \frac{F}{g} = \frac{711826,75 \text{ N}}{9,81 \text{ m/s}^2} = 72561,34 \text{ kg}$$

Kjer je:

F - točkovna obtežba konstrukcije zaradi lastne in stalne obtežbe v [N] - glej točko 4.6.4

g - gravitacijski pospešek ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)

Faktor dušenja (ξ) znaša za:

$$\xi = \begin{cases} 0,010 \dots \text{objekti brez mehaniskih veznih stikov} \\ 0,015 \dots \dots \dots \text{objekti z mehanskimi veznimi stiki} \end{cases} \quad (109)$$

Kontrola vertikalnih vibracij:

$$a_{vert,1} = \frac{100}{M \cdot \xi} = \frac{100}{72561,34 \cdot 0,015} = 0,092 \text{ m/s}^2 \leq a_{max} = 0,7 \text{ m/s}^2. \quad (110)$$

Ob upoštevanju možnosti, da brv hkrati prečka večje število ljudi, znaša ocenjeni vertikalni pospešek ($a_{vert,n}$):

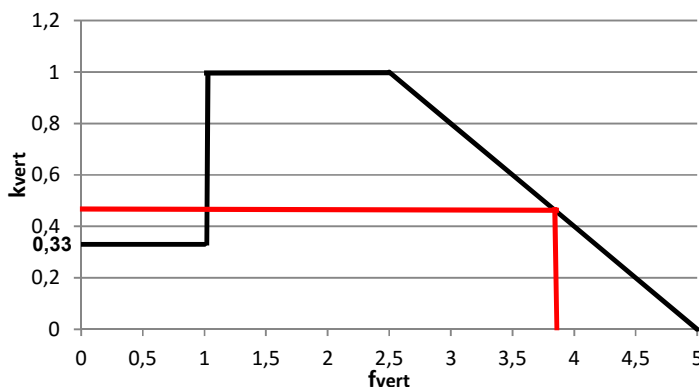
$$a_{vert,n} = 0,23 \cdot a_{vert,1} \cdot n \cdot k_{vert}. \quad (111)$$

Kjer so:

$a_{vert,1}$ - vertikalni pospešek, ki ga povzroči ena oseba ob prečkanju brvi,

n - število oseb, ki prečka brv ($n = 13$ ljudi) in

k_{vert} - koeficient v odvisnosti od lastne frekvence objekta ($k_{vert} = 0,437$), glej Sliko 50.



Slika 50: Vrednost faktorja k_{vert} , v odvisnosti od vrednosti lastne frekvence

Kontrola vertikalnega pospeška ($a_{vert,n}$) ob upoštevanju večjega števila ljudi:

$$a_{vert,n} = 0,23 \cdot 0,092 \cdot 13 \cdot 0,437 = 0,12 \text{ m/s}^2 \leq a_{max} = 0,4 \text{ m/s}^2. \quad (112)$$

Kontrola vertikalnih vibracij, v primeru da uporabniki prečkajo most s tekom:

$$a_{vert,1} = \frac{600}{M \cdot \xi} = \frac{600}{64136,05 \cdot 0,015} = 0,624 \text{ m/s}^2 \leq a_{max} = 0,7 \text{ m/s}^2. \quad (113)$$

Izmed kontrol mejnega stanja nosilnosti in mejnega stanja uporabnosti je za dimenzioniranje primarnih vzdolžnih nosilnih elementov najbolj kritična kontrola mejnega stanja uporabnosti začetnih (hipnih) povosov v času obremenitve (w_{inst}). Izkoriščenost dimenzioniranega prereza je 94 %.

8.1.2 Sekundarni vzdolžni nosilci

V vzdolžni smeri so za prenos obtežb predvideni sekundarni lepljeni nosilci prečnega prereza 24/26 cm. V vzdolžni smeri je nosilec razdeljen na 11 elementov dolžine 6,0 m, ki potekajo preko dveh polj. V prečnem prerezu je predvidenih pet linij vzdolžnih nosilcev. Nosilci so iz lameliranega lesa GL 28h, njegove geometrijske karakteristike pa so prikazane v Preglednici 45.

Preglednica 45: Geometrijske karakteristike sekundarnega vzdolžnega nosilca

$h =$	26 cm
$b =$	24 cm
$A =$	572 cm ²
$W_y =$	2478,7 cm ³
$L =$	600 cm

Vzdolžni leseni elementi se dimenzionirajo na podlagi notranjih sil, ki so posledica lastne teže elementa, stalne obtežbe podnic, temperaturne obtežbe ter obtežbe prometa (skupina gr1 in gr2). Privzela sem, da obtežbo vetra prevzamejo ostali elementi objekta, obtežbo snega pa sem zanemarila v primerjavi s porazdeljeno prometno obtežbo. Glede na pridobljene rezultate prevladuje vpliv skupine obtežbe, ki vključuje obtežbo servisnega vozila (gr2). Merodajne notranje sile v elementu in pripadajoče vrednosti ostalih notranjih sil prikazuje Preglednica 46.

Preglednica 46: Ekstremne vrednosti notranjih sil in pripadajoče notranje sile

		Merodajne statične količine					
		1. $M_{Ed,max}$	2. $M_{Ed,min}$	3. $N_{Ed,max}$	4. $N_{Ed,min}$	5. $V_{Ed,max}$	6. $V_{Ed,min}$
Notranje statične količine	$M_{Ed,y}$	35,92	-20,84	0,00	0,00	-8,56	-20,84
	N_{Ed}	48,60	48,60	48,60	-48,60	48,60	48,60
	$V_{Ed,z}$	12,10	4,21	-5,58	-5,58	54,25	-54,92
	kombinacija	COV2	COV2	COV1	COV1	COV2	COV2

Kontrola normalnih in strižnih napetosti se izvede za vseh šest primerov. V pričujoči diplomski nalogi pa bodo prikazane kontrole le za najbolj kritični primer. Kontrola normalnih napetosti je izvedena za maksimalni moment (1. $M_{Ed,max}$) in pripadajočo osno silo, kontrola strižnih napetosti za maksimalno strižno silo (5. $V_{Ed,max}$).

Kjer predstavljajo kombinacije:

Oznaka	Lo	So0	gr1.0	gr2	Tk.ogr	Tk.shl.
COV1	1,35	1,35	1,35	0	0	0
COV2	1,35	1,35	0	1,35	0	0

Kontrola normalnih napetosti:

Kontrolo normalnih napetosti pri dvoosnem upogibu z natezno osno silo izvedemo na podlagi spodnjih dveh izrazov:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (114)$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (115)$$

Kjer so:

$\sigma_{t,0,d}$ - projektna normalna napetost zaradi delovanja natezne osne sile,

$f_{t,0,d}$ - projektna natezna trdnost v smeri vlaken lesa,

$\sigma_{m,y,d}$ - maksimalna projektna normalna napetost zaradi upogibnega momenta okrog osi y,

$f_{m,y,d}$ - projektna upogibna trdnost

$\sigma_{m,z,d}$ - maksimalna projektna normalna napetost zaradi upogibnega momenta okrog osi z,

$f_{m,y,d}$ - projektna upogibna trdnost in

k_m - redukcijski koeficient, za pravokotne prereze je priporočena $k_m = 0,7$, za ostale pa 1,0.

V primeru, ko ni nevarnosti uklona se kontrola normalnih napetosti pri dvoosnem upogibu s tlačno osno silo izvede na podlagi spodnjih dveh izrazov:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (116)$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (117)$$

Kjer sta:

$\sigma_{c,0,d}$ - projektna normalna napetost zaradi tlačne osne sile in

$f_{c,0,d}$ - projektna tlačna trdnost v smeri vlaken lesa.

V primeru dimenzioniranja sekundarnih vzdolžnih lesenih elementov lepljenega lesa, kjer gre za interakcijo enoosnega upogiba z natezno osno silo, se izraz primerno poenostavi, kontrola elementa pa se izvede na podlagi spodnjega izraza:

$$\frac{\sigma_{t,0,g,d}}{f_{t,0,g,d}} + \frac{\sigma_{m,y,g,d}}{f_{m,y,g,d}} \leq 1. \quad (118)$$

Projektna normalna napetost zaradi delovanja natezne osne sile ($\sigma_{t,0,g,d}$):

$$\sigma_{t,0,g,d} = \frac{N_{Ed,prip}}{A} = \frac{N_{Ed,prip}}{b \cdot h} = \frac{48,60}{24 \cdot 26} = 0,078 \frac{kN}{cm^2}. \quad (119)$$

Projektna natezna trdnost v smeri vlaken lesa ($f_{t,0,g,d}$) za les kvalitete GL 28 h:

$$f_{t,0,g,d} = k_{mod} \cdot \frac{k_h \cdot f_{t,0,g,k}}{\gamma_m} = 0,7 \cdot \frac{1,087 \cdot 1,95}{1,25} = 1,187 \frac{kN}{cm^2}. \quad (120)$$

Kjer so:

k_{mod} - modifikacijski faktor, ki upošteva zmanjšanje trdnosti lesa zaradi trajanja obtežbe in pogojev okolja pri uporabi za razred uporabnosti III znaša $k_{mod} = 0,7$,

k_h - faktor širine oziroma višine,

$f_{t,0,g,k}$ - karakteristična natezna trdnost v smeri vlaken lesa in

γ_m - materialni varnostni faktor ($\gamma_m = \gamma_{GL28h} = 1,25$).

Pri določanju projektne natezne trdnosti lepljenega elementa se upošteva tudi ugoden vpliv višine elementa. Za pravokotne prereze velja, da se upošteva faktor višine k_h , ki za elemente nižje oziroma ožje od 600 mm znaša:

$$k_h = \min \left\{ \frac{(600/h)^{0,1}}{1,1} = \frac{((600/260)^{0,1}}{1,1} = \frac{1,087}{1,1} = 1,087. \quad (121)$$

Projektna normalna napetost zaradi delovanja upogibnega momenta ($\sigma_{m,y,g,d}$)

$$\sigma_{m,y,g,d} = \frac{M_{Ed,max}}{W_y} = \frac{6 \cdot M_{Ed,max}}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot 35,92 \cdot 100}{24 \cdot 26^2} = 1,328 \frac{kN}{cm^2}. \quad (122)$$

Projektna upogibna trdnost ($f_{m,g,d}$) se izračuna po enaki enačbi kot pri primarnem nosilcu:

$$f_{m,y,g,d} = k_{mod} \cdot \frac{k_h \cdot f_{m,y,g,k}}{\gamma_m} = 0,7 \cdot \frac{1,087 \cdot 2,8}{1,25} = 1,705 \frac{kN}{cm^2}.$$

Kontrola normalnih napetost za najbolj kritičen prerez znaša:

$$\frac{0,078}{1,328} + \frac{1,328}{1,705} = 0,845 \leq 1.$$

Kontrola strižnih napetosti

Kontrola strižnih napetosti za element se izvede skladno z enačbo (91):

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{\frac{2}{3}A} \leq f_{v,g,d}.$$

Kjer so:

τ_{Ed} - projektne strižne napetosti zaradi vpliva prečne sile,

V_{Ed} - projektna vrednost prečne sile,

$f_{v,d}$ - projektna strižna trdnost lesa in

A - prečni prerez elementa.

Prečni prerez elementa se izračuna skladno z enačbo (92):

$$A = b_{ef} \cdot h = 18 \cdot 26 = 468 \text{ cm}^2$$

Kjer sta:

b_{ef} - efektivna širina elementa in

h - višina elementa.

Efektivna širina elementa (b_{ef}) se za masivni in lepljeni les izračuna z upoštevanjem koeficienta k_{cr} . Koeficient znaša za masivni les $k_{cr} = 0,67$, ker lameliran les ne izgubi tolikšne efektivne širine lahko predpostavim $k_{cr} = 0,75$:

$$b_{ef} = b \cdot k_{cr} = 24 \cdot 0,75 = 18 \text{ cm}$$

Projektna strižna trdnost ($f_{v,g,d}$) za les kvalitete GL 28 h:

$$f_{v,g,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{v,g,k}}{\gamma_m} = 0,7 \cdot \frac{0,32}{1,25} = 0,179 \text{ kN/cm}^2.$$

Kontrola strižnih napetost za najbolj obremenjen prerez:

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{\frac{2}{3}A} = \frac{54,25}{\frac{2}{3} \cdot 468} = 0,174 \text{ kN/cm}^2 \leq f_{v,g,d} = 0,179 \text{ kN/cm}^2.$$

Izmed kontrol mejnega stanja nosilnosti je za dimenzioniranje sekundarnih nosilnih vzdolžnih elementov najbolj kritična kontrola strižnih napetosti prereza. Največji vpliv na elemente povzroča obtežba servisnega vozila. Izkoriščenost dimenzioniranega prereza je 97,03%.

Kontrole v mejnem stanju uporabnosti

Kontrola trenutnega pomika (w_{inst}) se izvede skaldno z enačbo (102):

$$w_{inst} = 0,0041 \text{ m} \leq L/300 = 3,0 \text{ m}/300 = 0,0100 \text{ m}.$$

Kjer je:

L – osni razpon med jeklenima okviroma.

Lezenje konstrukcije se zajame z upoštevanjem koeficienta lezenja (k_{def}) skladno z enačbo (104):

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q1} + \sum_{i \geq 1} w_{fin,Qi}.$$

Kjer so:

$w_{fin,G}$ - povs zaradi delovanja stalne obtežbe,

$w_{fin,Q1}$ - povs zaradi delovanja prevladujoče spremenljive obtežbe in

$w_{fin,Qi}$ - povs zaradi spremljajočih spremenljivih obtežb.

Končni povs zaradi delovanja stalne obtežbe ($w_{fin,G}$), kamor spadata lastna in stalna obtežba:

$$w_{fin,G} = w_{inst,G} (1 + k_{def}) = (0,00003 \text{ m} + 0,0004 \text{ m})(1 + 2) = 0,00021 \text{ m}.$$

Kjer sta:

$w_{inst,G}$ - začetni povsi zaradi delovanja lastne in stalne obtežbe in

k_{def} - koeficient lezenja znaša za lameliran lepljen les in razred uporabnosti III.: $k_{def} = 2,0$.

Končni povos zaradi delovanja prevladujoče spremenljive obtežbe ($w_{fin,Q1}$):

$$w_{fin,Q1} = w_{inst,Q1} (1 + \psi_{2,1} k_{def}) = 0,00410 (1 + 0 \cdot 2) = 0,00410 \text{ m.}$$

Kjer sta:

$w_{inst,Q1}$ - začetni upogibi zaradi delovanja obtežbe servisnega vozila

$\psi_{2,1}$ - faktor za navidezno stalno vrednost spremenljivega vpliva (za temperaturno obtežbo znaša $\psi_{2,1} = 0,5$, v vseh ostalih primerih je $\psi_{2,i} = 0$).

Spremljajočih spremenljivih obtežb ($w_{fin,Qi}$) v kombinaciji obtežb, ki povzroči ekstremne povese (MSU_V2) ni.

Kontrola končnih povosov po izvršenem lezenju oziroma kontrola končnih upogibov (w_{fin}):

$$w_{fin} = 0,00021 \text{ m} + 0,00410 \text{ m} = 0,00431 \text{ m} \leq L/150 = 3 \text{ m}/150 = 0,02000 \text{ m.}$$

Izmed kontrol mejnega stanja uporabnosti je za dimenzioniranje primarnih vzdolžnih nosilnih elementov kritična kontrola začetnih (hipnih) povosov v času obremenitve (w_{inst}). Izkoriščenost dimenzioniranega prereza je 41,23%.

8.2 Kontrola masivnih lesenih elementov

8.2.1 Dimenzioniranje podnic

V diplomski nalogi so izbrane podnice iz hrastovega lesa kvalitete D40, dolžine 2,74 m in prečnega prereza $b/h = 20/12$ cm. Podnice so vijačene na pet sekundarnih vzdolžnih nosilcev iz lepljenega lameliranega lesa, pozicioniranih na medosni razdalji 0,59 m. Zaradi izbranega linijskega modela se v podnicah pojavijo prečne sile in momenti. Maksimalne in pripadajoče vrednosti notranjih sil so zbrane v Preglednici 47.

Preglednica 47: Ekstremne vrednosti notranjih sil in pripadajoče notranje sile

		Merodajne statične količine			
		1. $M_{Ed,max}$	2. $M_{Ed,min}$	3. $V_{Ed,max}$	4. $V_{Ed,min}$
Notranje statične količine	M_{Ed}	2,76	-1,49	-0,56	-1,49
	V_{Ed}	6,32	0,98	28,88	-28,88
	kombinacija	COpod4	COpod4	COpod4	COpod4

Kontrola upogibne nosilnosti podnic

Kontrola maksimalne projektne normalne napetosti zaradi delovanja upogibne obremenitve ($\sigma_{m,d}$) se izvede na podlagi izraza:

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d}. \quad (123)$$

Projektna normalna napetost zaradi delovanja upogibnega momenta ($\sigma_{m,d}$):

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{Ed}}{W} = \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2/6} = \frac{2,76 \cdot 100}{20 \cdot 12^2/6} = 0,575 \text{ kN/cm}^2. \quad (124)$$

Projektna upogibna trdnost ($f_{m,d}$):

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot \frac{k_h \cdot f_{m,k}}{\gamma_m} = 0,7 \cdot \frac{1,046 \cdot 4,0}{1,3} = 2,252 \text{ kN/cm}^2 \quad (125)$$

Kjer so:

k_{mod} - modifikacijski faktor, ki upošteva zmanjšanje trdnosti lesa zaradi trajanja obtežbe in pogojev okolja pri uporabi (3. razred uporabe),

k_h - faktor višine,

$f_{m,k}$ - karakteristična upogibna trdnost lesa in

γ_m - materialni varnostni faktor ($\gamma_m = \gamma_{D4} = 1,30$).

Faktor višine (k_h) za masivni les s pravokotnim prerezom, po višini manjšim od 150 mm in karakteristično gostoto $\rho_k \leq 700 \text{ kg/m}^3$ znaša:

$$k_h = \min \left\{ \frac{(150/h)^{0,2}}{1,3} = \frac{(150/150)^{0,2}}{1,3} = \frac{1,046}{1,3} = 1,046. \right. \quad (126)$$

Kontrola maksimalne projektne normalne napetosti zaradi delovanja upogibne napetosti:

$$\sigma_{m,d} = 0,575 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \leq f_{m,d} = 2,252 \text{ kN/cm}^2.$$

Kontrola strižne nosilnosti podnic

Kontrola strižnih napetosti za element se izvede na podlagi enačbe (91):

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{\frac{2}{3}A} \leq f_{v,d}.$$

Kjer so:

τ_{Ed} - projektne strižne napetosti zaradi vpliva prečne sile,

V_{Ed} - projektna vrednost prečne sile,

$f_{v,d}$ - projektna strižna trdnost lesa in

A - prečni prerez elementa.

Prečni prerez elementa (A) izvede na podlagi enačbe (92):

$$A = b_{ef} \cdot h = 18 \cdot 12 = 216 \text{ cm}^2.$$

Kjer sta:

b_{ef} - efektivna širina elementa in

h - višina elementa.

Efektivna širina elementa (b_{ef}) se za masivni les izračuna z upoštevanjem koeficienta k_{cr} . V splošnem znaša $k_{cr} = 0,67$, ker pa v tem primeru ne gre za primarni nosilni element lahko privzamem nekoliko manj strogo korekcijo prečnega prereza in sicer:

$$b_{ef} = b \cdot k_{cr} = 20 \cdot 0,75 = 18 \text{ cm}.$$

Projektna strižna trdnost ($f_{v,d}$) za masiven les kvalitete C40:

$$f_{v,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} = 0,7 \cdot \frac{0,380}{1,3} = 0,205 \text{ kN/cm}^2.$$

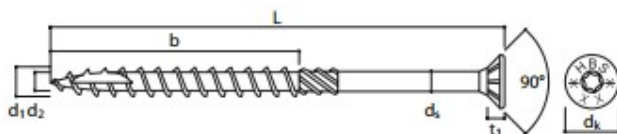
Kontrola strižnih napetost za najbolj obremenjen prerez znaša:

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{\frac{2}{3}A} = \frac{28,88 \text{ kN}}{\frac{2}{3} \cdot 216 \text{ cm}^2} = 0,201 \text{ kN/cm}^2 \leq f_{v,g,d} = 0,205 \text{ kN/cm}^2.$$

Izmed kontrol mejnega stanja nosilnosti je za dimenzioniranje podnic najbolj kritična kontrola strižnih napetosti prereza. Največji vpliv na elemente povzroča obtežba servisnega vozila. Izkoriščenost dimenzioniranega prereza je 98,02 %.

Kontrola lesnih vijakov – kontrola osne obremenitve

Za pritrjevanje lesenih podnic na sekundarne lepljene nosilce se uporabijo lesni vijaki. Pri izbiri le teh se izvede kontrola osne obremenjenosti lesnih vijakov. Ocena nosilnosti le teh se izvede na podlagi standarda SIST EN 1995-1-1 – 1.1. del, točke 8.7.2. V diplomski nalogi so izbrani lesni vijaki HBS $\phi 6$ mm, skupne dolžine $L=240$ mm, dolžine navoja 75 mm (Slika 51).



Slika 51: Geometrija izbranega vijaka rothoblaas HBS vijaka

(Vir: <http://www.rothoblaas.com/uploads/media/vijaki-za-les-sl.pdf>, Pridobljeno: 1.8.2016)

Najmanjši potrebni razmiki oz oddaljenost od roba lesa za osno obremenjene lesne vijake so podani v Preglednici 48.

Preglednica 48: Najmanjši razmiki in oddaljenosti do roba lesa za osno obremenjene lesne vijake

Položaj lesnih vijakov	Najmanjši razmiki	Najmanjša oddaljenost od roba
Pravokotno na vlakna	4d	4d
V robnem vlaknu	4d	2,5d

(Vir: SIST EN 1995-1-1 – 1.1.del: str. 79)

Najmanjši razmiki in najmanjša oddaljenost od roba znašajo:

$$4d = 4 \cdot 6 = 24 \text{ mm} < \text{izbrano: } 50 \text{ mm.} \quad (127)$$

Najmanjša dolžina vtisnjene navojnega dela na strani konice znašajo:

$$6d = 6 \cdot 6 = 36 \text{ mm} < \text{izbrano: } 80 \text{ mm.} \quad (128)$$

Karakteristična osna izvlečna nosilnost vijakov:

$$F_{ax,\alpha,Rk} = n_{ef} \cdot (\pi \cdot d \cdot l_{ef})^{0,8} \cdot f_{ax,\alpha,k} \quad (129)$$

Kjer so:

$F_{ax,\alpha,Rk}$ - karakteristična izvlečna nosilnost vijaka pod kotom α glede na vlakna lesa,

n_{ef} - efektivno število lesenih vijakov,

d - zunanji premer navoja,

l_{ef} - dolžina vtisnjene navojnega dela, zmanjšana za en premer lesnega vijaka in

$f_{ax,\alpha,k}$ - karakteristična izvlečna trdnost pod kotom α glede na vlakna lesa.

Efektivno število lesnih vijakov (n_{ef}):

$$n_{ef} = n^{0,9} = 2^{0,9} = 1,866. \quad (130)$$

Dolžina vtisnjene navojnega dela, zmanjšana za en premer lesnega vijaka (l_{ef}):

$$l_{ef} = t_2 - d = 75 \text{ mm} - 6 \text{ mm} = 69 \text{ mm}. \quad (131)$$

Karakteristična izvlečna trdnost pod kotom α glede na vlakna lesa ($f_{ax,\alpha,k}$):

$$f_{ax,\alpha,k} = \frac{f_{ax,k}}{\sin^2 \alpha + 1,5 \cos^2 \alpha} = \frac{29,89}{\sin^2 90 + 1,5 \cos^2 90} = 29,89 \text{ N/mm}^2. \quad (132)$$

Kjer sta:

$f_{ax,k}$ - karakteristična izvlečna trdnost pravokotno na vlakna lesa in α - kot pod katerim je vijachen vijak (v tem primeru $\alpha = 90^\circ$).

Karakteristična izvlečna trdnost pravokotno na vlakna lesa ($f_{ax,k}$):

$$f_{ax,k} = 3,6 \cdot 10^{-3} \rho_k^{1,5} = 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot 410^{1,5} = 29,89 \text{ N/mm}^2. \quad (133)$$

Kjer je:

ρ_k - karakteristična gostota, v kg/m^3 (za les GL28h je $\rho_k = 410 \text{ kg/m}^3$).

Karakteristična osna izvlečna nosilnost vijakov:

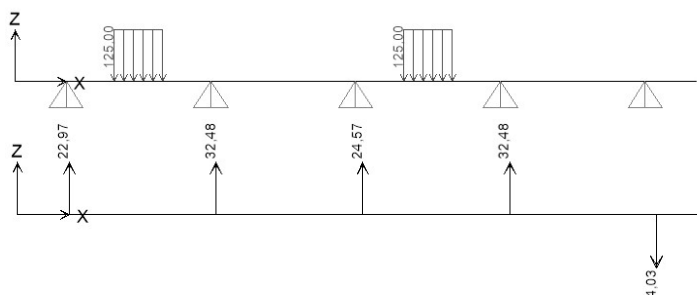
$$F_{ax,\alpha,Rk} = n_{ef} \cdot (\pi \cdot d \cdot l_{ef})^{0,8} \cdot f_{ax,\alpha,k} \quad (134)$$

$$F_{ax,\alpha,Rk} = 1,866 \cdot (\pi \cdot 6 \cdot 69)^{0,8} \cdot 29,89 = 17,29 \text{ kN}$$

Projektna osna izvlečna nosilnost vijakov:

$$F_{ax,\alpha,Rd} = k_{mod} \cdot \frac{F_{ax,\alpha,Rk}}{\gamma_m} = 0,7 \cdot \frac{17,29}{1,3} = 9,31 \text{ kN}. \quad (135)$$

Najbolj neugodni način obtežbe podnic je prikazan na Sliki 52.



Slika 52: Prikaz najbolj neugodne porazdelitve obtežbe in pripadajoče vrednosti izvlečne sile

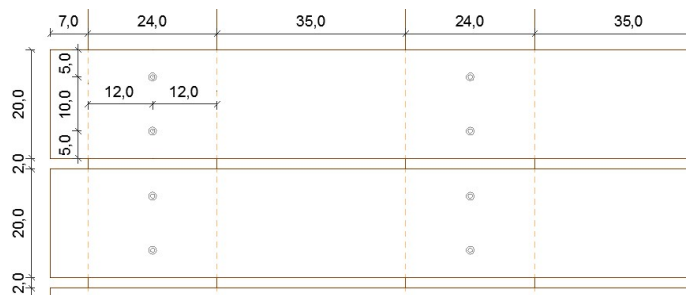
Kontrola izvlečne nosilnosti se izvede na podlagi enačbe:

$$F_{izvl} = 4,03 \text{ kN} \leq F_{ax,\alpha,Rd} = 9,31 \text{ kN}.$$

Kjer je:

F_{izvl} - izvlečna natezna osna sila oz reakcija v robnem vzdolžnem elementu.

Dejanski raspored izbranih vijakov na podnice je prikazan na Sliki 53.

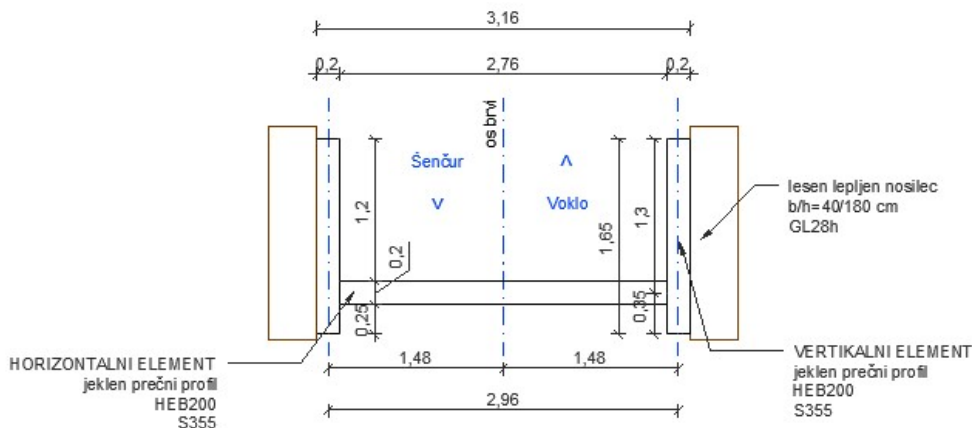


Slika 53: Prikaz izbranih vijakov in njihovih pozicij

8.3 Kontrola jeklenih elementov

8.3.1 Dimenzioniranje prečnega jeklenega okvirja

V prečni smeri sta oba primarna lesena lepljena nosilca povezana z okvirji iz jeklenih vroče valjanih profilov. Jekleni okvirji, stikovani v obliki črke »H«, so vzdolž mostu pozicionirani na osni razdalji 3 m in zagotavljajo bočno podporo primarnih lesenih nosilcev. V horizontalni smeri je predviden jeklen vroče valjan profil HEB200, v vertikalni smeri pa obtežbo prevzemata dva jeklena nosilca HEB200. Zasnovo ravninskega modela prikazuje Slika 54.



Slika 54: Prikaz zasnove 2D modela za dimenzioniranje jeklenih pečnih elementov

Dimenzioniranje PREČNEGA ELEMENTA

Za prevzem obremenitev v prečni smeri je bil izbran vroče valjani H profil s širokima paralelnima pasnicama HEB200. V horizontalni smeri meri nosilec v dolžino 2,76 m, nosilca v vertikalni smeri pa 1,65 m. Geometrijske karakteristike izbranega elementa so prikazane v Preglednici 49.

Preglednica 49: Geometrijske karakteristike jeklenega profila HEB200

Geometrijske karakteristike		Geometrijske karakteristike	
b =	20,00 cm	g =	61,30 kg/m
h =	20,00 cm	ly =	5700,00 cm ⁴
tf =	1,50 cm	Wy =	570,00 cm ³
tw =	0,90 cm	iy =	8,54 cm
r =	1,80 cm	lz =	2000,00 cm ⁴
d =	13,40 cm	Wz =	200,00 cm ³
c = h-2tf =	17,00 cm	iz =	5,07 cm
A =	78,10 cm ²	Wy,pl =	643,00 cm ³
		Wz,pl =	306,00 cm ³

Za dimenzioniranje prečnega elementa je bil poleg prostorskega (3D) modela pripravljen še ravninski (2D) model. V 2D modelu sta bili za relevantne obtežbe pripravljeni 2 kombinaciji obtežb, izmed katerih je ekstremni moment pripadal kombinaciji obtežb zaradi obtežbe servisnega vozila (COP2, točka 6.4). Pri dimenzioniranju prečnega jeklenega elementa je potrebno upoštevati, da element znotraj konstrukcije deluje kot povezovalni element med primarnima vzdolžnima lesenima nosilcema. Zaradi obtežbe servisnega vozila se na sredini polja pojavi ekstremna momentna obtežba, kar lahko povzroči bočno zvrnitev nosilca. Z upoštevanjem dodatne obtežbe zaradi bočne zvrnitve so bile pripravljene dodatne tri kombinacije obtežb, izmed katerih je bila za ekstremno vrednost momenta v horizontalnem elementu kritična kombinacija COB1 (glej stran 44). Za dimenzioniranje obeh vertikalnih elementov je bila za ekstremno vrednost momenta kritična kombinacija COB4. Vrednosti ekstremnega momenta in njemu pripadajočih ostalih sil ter vrednost ekstremne prečne sile so prikazane v Preglednici 50.

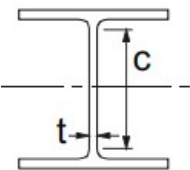
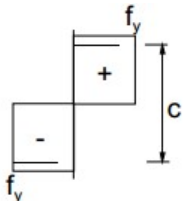
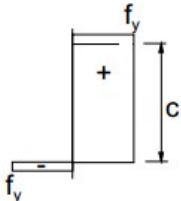
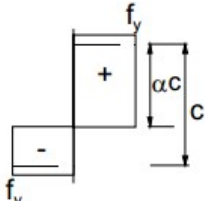
Preglednica 50: Merodajne notranje sile v elementu in pripadajoče vrednosti notranjih sil

ELEM. VERTIKALNO	2D model COB1	ELEM. HORIZONTALNO	2D model COB4
$M_{Ed,max}$ [kNm]	61,69	$M_{Ed,max}$ [kNm]	21,46
$N_{Ed,príp}$ [kN]	-11,42	$N_{Ed,príp}$ [kN]	0
$V_{Ed,príp}$ [kN]	25,64	$V_{Ed,príp}$ [kN]	16,51
	2D model COB3		2D model COB4
$V_{Ed,max}$ [kN]	84,24	$V_{Ed,max}$ [kN]	16,51

Ena izmed glavnih posebnosti prečnih prerezov jeklenih elementov je njihova odpornost proti lokalnemu izbočenju oziroma kompaktnost. Za lažjo izbiro ustreznega prereza so ti razdeljeni v štiri razrede 1., 2., 3. in 4. razred. V diplomski nalogi je bil za prenos obtežb izbran najbolj kompakten prečni prerez, 1. razreda kompaktnosti (1.RK). Temu primerno se najprej izvedejo kontrole kompaktnosti prečnega elementa HEB200, materiala S355, ki bodo potrdile primernost izbranega profila.

Kontrola kompaktnosti stojine

Pri kontroli kompaktnosti stojine so možne tri kontrole. Prva je kontrola v primeru, ko je prerez upogibno obremenjen. Druga v primeru, da je prerez obremenjen samo tlačno. Tretja pa v primeru, ko je prerez obremenjen z upogibom in tlakom. Pri preverjanju je pomembno razmerje med širino (c) in debelino (t) stojine. Prikaz dimenzij c in t vsebuje Slika 55.

Razmerje c/t :	Upogib:	Tlak:	Upogib in tlak:
			
Kontrole kompaktnosti stojine (1. RK):	$\frac{c}{t} \leq 72 \cdot \varepsilon$	$\frac{c}{t} \leq 33 \cdot \varepsilon$	$\text{pri } \alpha > 0,5 : \frac{c}{t} \leq \frac{396 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1}$ $\text{pri } \alpha \leq 0,5 : \frac{c}{t} \leq \frac{36 \cdot \varepsilon}{\alpha}$

Slika 55: Prikaz dimenzij c in t pri kontroli kompaktnosti stojine

(Vir: povzeto po: Beg, D.(ur), Pogačnik, A. (ur.). 2009: str. 3-24)

Ker je element obremenjen s kombinacijo upogiba in tlaka se kontrola kompaktnosti (za 1. RK) izvede glede na spodnji enačbi:

$$\text{pri } \alpha > 0,5 : \frac{c}{t} \leq \frac{396 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1} \quad (136)$$

$$\text{pri } \alpha \leq 0,5 : \frac{c}{t} \leq \frac{36 \cdot \varepsilon}{\alpha} \quad (137)$$

Kjer je:

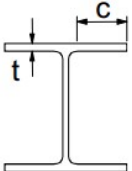
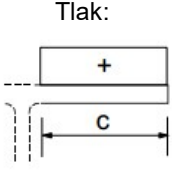
α - koeficient ki se izračuna po spodnji enačbi:

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{N_{Ed}}{f_y \cdot t_w \cdot c} \right) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{11,42}{35,5 \cdot 0,95 \cdot 17} \right) = 0,513 \quad (138)$$

$$\text{pri } \alpha = 0,513 > 0,5 : \frac{c}{t} = 14,89 \leq \frac{396 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1} = \frac{396 \cdot 0,81}{13 \cdot 0,513 - 1} = 56,54 \text{ (1. RK)}$$

Kontrola kompaktnosti pasnice:

Pri kontroli kompaktnosti pasnice je potrebna izvedba kontrole razmerja med širino (c) in debelino (t) tlačne pasnice. Prikaz dimenzij c in t vsebuje Slika 54.

Razmerje c/t :		
		Tlak:

Slika 56: Prikaz dimenzij c in t pri kontroli kompaktnosti pasnice

(Vir: povzeto po: Beg, D.(ur), Pogačnik, A. (ur.). 2009: str. 3-25)

Tlak (kontrola previsnega dela pasnice):

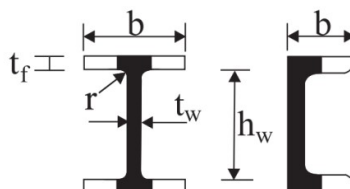
$$\frac{c}{t} = \frac{7,75 \text{ cm}}{1,5 \text{ cm}} = 5,17 \leq 9 \cdot \varepsilon = 9 \cdot 0,81 = 7,29. \quad (1.RK) \quad (139)$$

Kjer je c:

$$c = \frac{b - t_w}{2} - r = \frac{20 \text{ cm} - 0,9}{2} - 1,8 \text{ cm} = 7,75 \text{ cm}. \quad (140)$$

Kompaktnost prečnega prereza v strigu:

Pri kontroli kompaktnosti prečnega prereza v strigu je potrebna izvedba kontrole razmerja med širino (h_w) in debelino (t_w) stojine. Prikaz dimenzij vsebuje Slika 55.



Slika 57: Prikaz dimenzij h_w in t_w pri kontroli kompaktnosti prečnega prereza v strigu

(Vir: povzeto po: Beg, D.(ur), Pogačnik, A. (ur.). 2009: str. 3-33)

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{17 \text{ cm}}{0,9 \text{ cm}} = 18,89 \leq 72 \frac{\varepsilon}{\eta} = 72 \cdot \frac{0,81}{1,2} = 48,6. \quad (141)$$

Kjer je:

η - faktor z vrednostmi med 1,0 in 1,2; za jeklo S235 do S460 se lahko vzame $\eta = 1,2$, za jekla višje trdnosti pa $\eta = 1,0$.

Kontrola normalnih napetosti:

Kontrola normalnih napetosti pri prečnem prerezu obremenjenem z enosnim upogibom osno in strižno silo se ob predpostavki, da velja $V_{z,Ed} \leq 0,5 * V_{pl,Rd}$, izvede na podlagi spodnje enačbe:

$$M_{y,Ed} \leq M_{Ny,Rd} \quad (142)$$

Kjer sta:

$M_{y,Ed}$ - vrednost projektne upogibnega momenta okrog osi y in

$M_{Ny,Rd}$ - mejna upogibna nosilnost prereza z upoštevanjem vpliva osne sile, okrog osi y.

Mejna upogibna nosilnost prereza z upoštevanjem vpliva osne sile, okrog osi y ($M_{Ny,Rd}$):

$$M_{Ny,Rd} = \begin{cases} M_{pl,y,Rd}, & n \leq 0,5a \leq 0,25 \\ M_{pl,y,Rd} \cdot \frac{1-n}{(1-0,5a)} \leq M_{pl,y,Rd}, & \text{sicer} \end{cases} \quad (143)$$

Kjer so:

$M_{pl,y,Rd}$ - mejna upogibna plastična nosilnost prereza okrog osi y,

a - koeficient, ki se za I profil določi glede na spodnjo enačbo:

$$a = \frac{A - 2 \cdot b \cdot t_f}{A} = \frac{78,1 \text{ cm}^2 - 2 \cdot 20 \text{ cm} \cdot 1,5 \text{ cm}}{78,1 \text{ cm}^2} = 0,232, \quad (144)$$

n - razmerje med tlačno osno silo (N_{Ed}) v prerezu in projektno nosilnostjo tlačnega elementa ($N_{Pl,Rd}$).

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{Pl,Rd}} = \frac{11,42 \text{ kN}}{2772,55 \text{ kN}} = 0,004 \quad (145)$$

Projektna nosilnost tlačnega elementa ($N_{Pl,Rd}$):

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{m0}} = \frac{78,1 \text{ cm}^2 \cdot 35,5 \text{ kN/cm}^2}{1} = 2772,55 \text{ kN}. \quad (146)$$

Kjer so:

A - prečni prerez elementa,

f_y - napetost tečenja za vroče valjana konstrukcijska jekla in

γ_{m0} - delni faktor odpornosti ($\gamma_{m0} = 1,0$).

$$n \leq 0,5 \cdot a \leq 0,25 \quad (147)$$

$$0,004 \leq 0,5 \cdot 0,232 = 0,116 \leq 0,25$$

Kar pomeni, da se vpliv osne sile v primerjavi z momentom zanemari.

Kontrola vpliva strižne sile:

$$V_{z,Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,z,Rd} = 0,5 \cdot \frac{A_{v,z} \cdot f_y}{\gamma_{m0} \cdot \sqrt{3}} \quad (148)$$

Kjer sta:

$V_{pl,z,Rd}$ - plastična strižna nosilnost prereza v smeri z in

$A_{v,z}$ - površina prereza, ki prevzame strižno obremenitev zaradi prečne sile v smeri z

$$A_{v,z} = A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f \quad (149)$$

$$A_{v,z} = 78,1 \text{ cm}^2 - 2 \cdot 20 \text{ cm} \cdot 1,5 \text{ cm} + (0,9 \text{ cm} + 2 \cdot 1,8 \text{ cm}) \cdot 1,5 \text{ cm} = 24,85 \text{ cm}^2$$

Kontrola vpliva strižne sile:

$$V_{z,Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,z,Rd} = 0,5 \cdot \frac{24,85 \text{ cm}^2 \cdot 35,5 \text{ kN/cm}^2}{1 \cdot \sqrt{3}}$$

$$V_{z,Ed} = 25,64 \text{ kN} \leq 0,5 \cdot 509,32 \text{ kN} = 254,66 \text{ kN}.$$

V primeru, da bi vrednost prečne sile ($V_{z,Ed}$) presegla 50% vrednosti plastične strižne nosilnosti prereza ($V_{pl,z,Rd}$), bi bila potrebna redukcija projektne upogibne nosilnosti zaradi striga. Vpliva prečnih sil na upogibno nosilnost ni potrebno upoštevati.

Kontrola enoosnega upogiba:

$$M_{y,Ed} \leq M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{m0}} = \frac{643 \text{ cm}^3 \cdot 35,5 \text{ kN/cm}^2}{1} \quad (150)$$

$$M_{y,Ed} = 6169 \text{ kNcm} \leq M_{pl,y,Rd} = 22826,5 \text{ kNcm}$$

Kjer sta:

$M_{pl,y,Rd}$ - mejna upogibna plastična nosilnost prereza okrog osi y in

$W_{pl,y}$ - plastični odpornostni moment prereza okrog osi y.

Kontrola prečnega prereza v strigu pri ekstremni prečni obremenitvi

Kontrola plastične strižne nosilnosti prečnega prereza se pri kompaktnih stojinah izvede skladno z enačbo (148):

$$V_{z,Ed} \leq V_{pl,z,Rd} = \frac{A_{v,z} \cdot f_y}{\gamma_{m0} \cdot \sqrt{3}}$$

Kjer sta:

$V_{pl,z,Rd}$ - plastična strižna nosilnost prereza v smeri z in

$A_{v,z}$ - površina prereza, ki prevzame strižno obremenitev zaradi prečne sile v smeri z

$$A_{v,z} = A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f$$

$$A_{v,z} = 78,1 \text{ cm}^2 - 2 \cdot 20 \text{ cm} \cdot 1,5 \text{ cm} + (0,9 \text{ cm} + 2 \cdot 1,9 \text{ cm}) \cdot 1,5 \text{ cm} = 24,85 \text{ cm}^2$$

Kontrola plastične strižne nosilnosti prečnega prereza:

$$V_{z,Ed} = 84,24 \text{ kN} \leq V_{pl,z,Rd} = \frac{A_{v,z} \cdot f_y}{\gamma_{m0} \cdot \sqrt{3}} = \frac{24,85 \text{ cm}^2 \cdot 35,5 \text{ kN/cm}^2}{1 \cdot \sqrt{3}} = 509,32 \text{ kN}$$

Kontrola stabilnosti prereza – bočna zvrnitev elementa:

Kontrola bočne zvrnitve prečnega prereza se izvede glede na spodnji izraz:

$$M_{Ed} \leq M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_{y,pl} \cdot f_y / \gamma_{M1} \quad (151)$$

Kjer sta:

$\chi_{LT}(\bar{\lambda}_{LT}, \alpha_{LT})$ - redukcijski faktor pri bočni zvrnitvi in

$W_{pl,y}$ - odpornostni moment prečnega prereza za močno os (1.RK).

Vitkost prereza ($\bar{\lambda}_{LT}$) se izračuna glede na spodnjo enačbo:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{y,pl} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{643 \cdot 35,5}{496,38}} = 0,678. \quad (152)$$

Kjer je:

M_{cr} - elastični kritični moment bočne zvrnitve.

Elastični kritični moment bočne zvrnitve (M_{cr}) se za dvojno simetrične prereze, na poenostavljen način izračuna glede na spodnjo enačbo:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi}{k_z \cdot L} \sqrt{E \cdot I_z \cdot G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E^2 \cdot I_z \cdot I_w}{(k_\omega \cdot L)^2}} \quad (153)$$

$$M_{cr} = 1 \cdot \frac{\pi}{1 \cdot 296} \sqrt{21000 \cdot 2000 \cdot 8100 \cdot 59,3 + \frac{\pi^2 \cdot 21000^2 \cdot 2000 \cdot 17100}{(1 \cdot 296)^2}}$$

$$M_{cr} = 49637,56 \text{ kNcm} = 496,38 \text{ kNm}$$

Kjer so:

C_1 - koeficient, ki zajema vpliv poteka upogibnih momentov vzdolž nosilca (konzervativno $C_1 = 1,0$),

k_z - uklonski koeficient za uklon okrog šibke osi (konzervativno $k_z = 1,0$),

k_ω - uklonski koeficient, ki izraža robne pogoje za vzbočenje prereza ($k_\omega = 1,0$),

L - razmak med bočnimi podporami,

E - elastični modul materiala ($E = 21000 \text{ kN/cm}^2$),

G - strižni modul materiala ($E = 8100 \text{ kN/cm}^2$),

I_t - torzijski vztrajnostni moment pri enakomerni torziji in

I_z - vztrajnostni moment okrog šibke osi.

Redukcijski faktor pri bočni zvrnitvi (χ_{LT}) je odvisen od izračunane vitkosti prereza ($\bar{\lambda}_{LT}$) in znaša za obravnavan prerez:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \quad \text{pri } \bar{\lambda}_{LT} = 0,678 \geq \bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \quad (154)$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,951 + \sqrt{0,951^2 - 0,75 \cdot 0,678^2}} = 0,589 \leq \frac{1}{0,678^2} = 2,175$$

Koeficient ϕ_{LT} :

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot [1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0})] + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2 \quad (155)$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot [1 + 0,76 \cdot (0,678 - 0,4)] + 0,75 \cdot 0,678^2 = 0,951$$

Kjer je:

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$$

$$\beta = 0,75$$

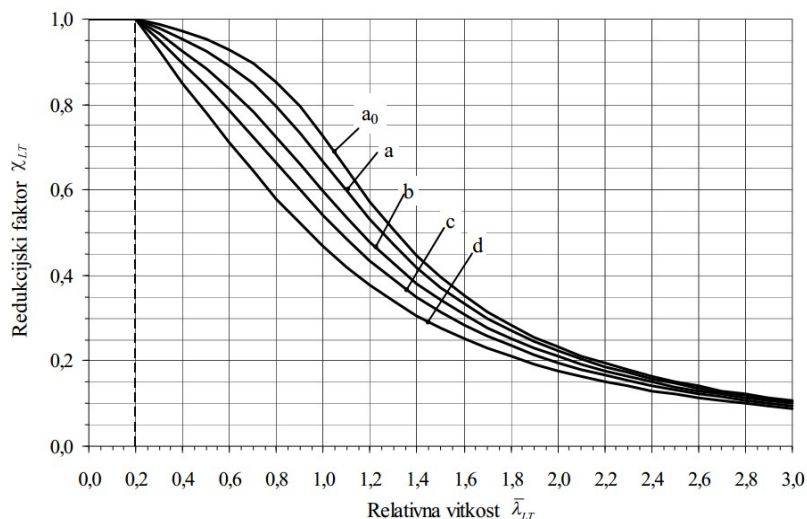
$\alpha_{LT} = \alpha$ - faktor nepopolnosti uklonskih krivulj

Faktor nepopolnosti uklonskih krivulj se razbere iz Preglednice 51, oziroma ustrezne uklonske krivulje, ki se določi na podlagi Slike 58 oz Preglednice 52.

Preglednica 51: Faktor nepopolnosti uklonskih krivulj

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

(Vir: Beg, D.(ur.), Pogačnik, A. (ur.). 2009: str. 3-43)



Slika 58: Diagram uklonskih krivulj
(Vir: Beg, D.(ur), Pogačnik, A. (ur.). 2009: str. 3-44)

Preglednica 52: Izbira uklonske krivulje glede na prečni prerez

Prečni prerez		Omejitve	Uklon okrog osi	Uklonska krivulja (S355)
Vroče vajani prerezi		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40\text{mm}$	y-y z-z a b
			$40\text{mm} \leq t_f \leq 100\text{mm}$	y-y z-z b c
		$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100\text{mm}$	y-y z-z b c
			$t_f > 100\text{mm}$	y-y z-z d d

(Vir: Beg, D.(ur), Pogačnik, A. (ur.). 2009: str. 3-45)

$$h/b = 20/20 = 1 \leq 1,2$$

Kontrola bočne zvrnitve prečnega prereza:

$$M_{Ed} \leq M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_{y,pl} \cdot f_y / \gamma_{M1} = 0,951 \cdot 643 \text{ cm}^3 \cdot 35,5 \text{ kN/cm}^2 / 1 \quad (156)$$

$$M_{Ed} = 6169,0 \text{ kNcm} \leq M_{b,Rd} = 13442,7 \text{ kNcm}$$

Izmed izvedenih kontrol je za dimenzioniranje prečnega elementa najbolj kritična kontrola bočne zvrnitve nosilca. Največji vpliv na elemente povzroča obtežba servisnega vozila.

8.3.2 Dimenzioniranje jeklenih diagonal zavarovalne konstrukcije

Za prevzem obremenitev v prečni smeri je bilo izbrano palično jeklo premera 20 mm in dolžine 4,24 m. Ostale geometrijske in materialne karakteristike izbranega elementa so prikazane v Preglednici 53.

Preglednica 53: Geometrijske in materialne karakteristike izbranega paličnega jekla

Geometrijske karakteristike			Materialne karakteristike		
$\phi =$	2,0	cm	$f_y =$	23,5	kN/cm^2
$A =$	3,14	cm^2	$f_u =$	36,0	kN/cm^2
$l =$	4,24	cm			

Za dimenzioniranje diagonalnih elementa se poleg ekstremne vrednosti natezne osne sile (3D modela), ki je posledica obtežne kombinacije CO8 upošteva še nadomestna obtežba zaradi bočnega zavarovanja, ki je obravnavana v točki 6.1.6. diplomske naloge. Merodajne vrednosti osnih sil so prikazane v Preglednici 54.

Preglednica 54: Merodajne vrednosti osnih sil

	Vrednost osne sile:
$N_{Ed,CO8}[kN]$	42,64
$N_{Ed,boč.zav.}[kN]$	28,46
Skupaj (N_{Ed}):	71,10

Kjer je kombinacija CO8:

Oznaka	Lo	So0	gr1.0	gr2	Fw,k	Tk.ogr	Tk.shl.
CO8	1,35	1,35	0,4 * 1,35	0	1,5	0	0

Kontrola natezne osne sile:

V sklopu kontrole natezne osne sile se izvede kontrola nosilnosti bruto prereza:

$$N_{Ed} \leq N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{m0}} \quad (157)$$

Kjer so:

$N_{pl,Rd}$ - projektna nosilnost bruto prereza,

A - površina prečnega prereza,

f_y - nominalna vrednost napetosti tečenja,

γ_{m0} - delni faktor odpornosti.

$$N_{Ed} = 71,10 \text{ kN} \leq N_{pl,Rd} = \frac{3,14 \cdot 23,5}{1} = 73,83 \text{ kN}$$

Kontrola nosilnosti neto prereza se izvede na podlagi spodnje enačbe:

$$N_{Ed} \leq N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{m2}} \quad (158)$$

Kjer so:

$N_{u,Rd}$ - projektna nosilnost neto prereza,

A_{net} - površina neto prečnega prereza ($A_{net} = A$),

f_u - natezna trdnost vroče valjanega konstrukcijskega jekla,

γ_{m2} - delni faktor odpornosti.

$$N_{Ed} = 71,10 \text{ kN} \leq N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot 3,14 \cdot 36}{1,25} = 81,43 \text{ kN}$$

Izmed izvedenih kontrol je za dimenzioniranje prečnega elementa najbolj kritična kontrola nosilnosti bruto prereza. Največji vpliv na elemente povzroča obtežba vetra v kombinaciji z lastno, stalno in porazdeljeno obtežbo pešcev in kolesarjev. Izkoriščenost dimenzioniranega prereza je 96,30 %.

9 DIMENZIONIRANJE STIKOV IN PRIKLJUČKOV

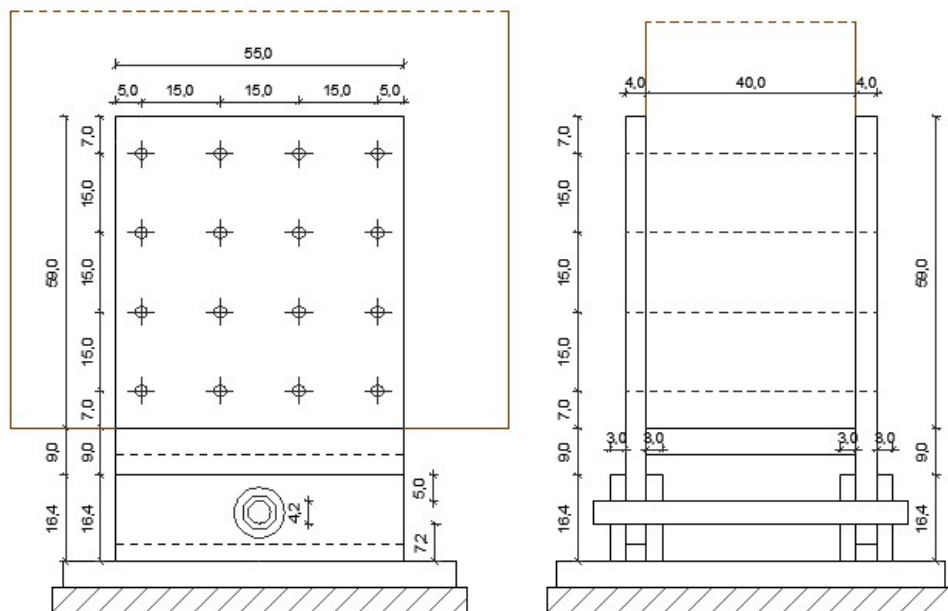
9.1 Priključek primarnega nosilca na AB krajna opornika in AB oporni steni

Priključek primarnega nosilca na krajna opornika in vmesni AB oporni steni se izvede preko jeklenih ležišč. Ležišča omogočajo pomike, kot prikazuje Preglednica 55.

Preglednica 55: Lokacija in pomičnost jeklenih ležišč

Lokacija	x (LKS)	z (LKS)	u(x)	u(y)	u(z)
Os A – krajni opornik	0	0	preprečen	preprečen	preprečen
Os B – AB stena	11,91	1,62	dovoljen	preprečen	preprečen
Os C - sredina	32,87	2,72			
Os D – AB stena	53,83	1,62	dovoljen	preprečen	preprečen
Os E – krajni opornik	65,74	0	dovoljen	preprečen	preprečen

Izbrano ležišče je sestavljeno iz dveh delov. Zgornji del ležišča sestavljata dve vertikalni pločevini debeline 40 mm, ki sta privarjeni na horizontalno pločevino debeline 50 mm tako, da skupaj tvorijo ležišče v obliki črke U. Vertikalni pločevini sta na nosilec pritrjeni z 16 vijaki premera 20 mm, kvalitete 5.8. Spodnji del ležišča predstavljajo štiri vertikalne pločevine debeline 30 mm, ki so privarjene na horizontalno pločevino debeline 50 mm. Pod jekleno pločevino je predvideno tipsko ležišče pomično v vzdolžni smeri in nepomično v prečni smeri, ki ni predmet te diplomske naloge. Oba dela ležišča med seboj povezuje jeklen trn oziroma čep. Geometrijske karakteristike izbranega ležišča prikazuje Slika 59.



Slika 59: Skica predvidenega ležišča

V preglednici 56 so prikazane ekstremne vrednosti reakcij v ležiščih v krajnem oporniku in v ležiščih nad podporno AB steno. Merodajna obremenitev se pojavi v ležišču v levi podporni AB steni, torej v osi B.

Preglednica 56: Prikaz vrednosti v ležišču merodajnem krajnem oporniku in oporni AB steni

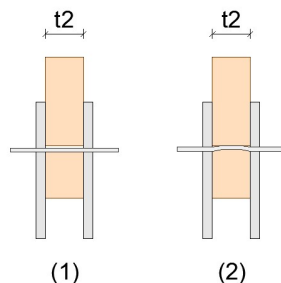
Vrednosti reakcij v krajnem ležišču (os A)	Vrednosti reakcij nad oporno steno (os B)
$V_{x,A,Ed} = 139,58 \text{ kN}$ $V_{y,A,Ed} = 32,92 \text{ kN}$ $V_{z,A,Ed} = 194,68 \text{ kN}$	$V_{x,B,Ed} = 0 \text{ kN}$ $V_{y,B,Ed} = 62,92 \text{ kN}$ $V_{z,B,Ed,max} = 893,84 \text{ kN}$

9.1.1 Dimenzioniranje vijakov

V sklop dimenzioniranja vijakov spada določitev njihovega prereza, števila in določitev razdalje med njimi. Ležišče se obravnava kot zveza z dvema priključnima ravninama (dvostržna zveza), kjer je pločevina na zunanji strani lesenega elementa. Karakteristično nosilnost vijakov v eni stržni ravnini za eno vezno sredstvo sem izvedla skladno s točko 8.2.3 standarda SIST EN 1995 – 1-1:2005. Ker gre za dvostržni stik z debelo jekleno

pločevino ($t \geq d$) na zunanji strani stika sem preverila naslednja dva porušitvena kriterija (Slika 60):

- (1) bočna porušitev lesa okoli veznega sredstva v lesenem elementu in
- (2) večkratna plastifikacija veznega sredstva.



Slika 60: Prikaz porušitvenih kriterijev za dvostržno zvezo les - pločevina - les

(1) Bočno porušitev lesa okoli veznega sredstva v lesenem elementu preverim glede na spodnjo enačbo:

$$F_{v,Rk} = 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d. \quad (159)$$

Kjer so:

$f_{v,Rk}$ - karakteristična nosilnost vijaka v eni strižni ravnini,

$f_{h,2,k}$ - karakteristična vtisna (bočna) trdnost lesa,

t_2 - debelina srednjega lesenega elementa in

d - premer vijaka.

(2) Plastifikacija veznega sredstva v lesenem elementu za debele pločevine ($t = 40 \text{ mm} \geq d = 20 \text{ mm}$):

$$F_{v,Rk} = 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,2,k} \cdot d + \frac{F_{ax,Rk}}{4}}. \quad (160)$$

Karakteristična vrednost momenta plastifikacije vijaka ($M_{y,Rk}$):

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} = 0,3 \cdot 500 \cdot 20^{2,6} = 362050,6 \text{ Nmm} = 36,21 \text{ kNcm} \quad (161)$$

Kjer sta:

$f_{u,k}$ - karakteristična natezna trdnost vijaka; za vijak kvalitete 5.8 je $f_{u,k} = 500 \text{ N/mm}^2$ in

d - premer vijaka, $d = 20 \text{ mm}$.

Karakteristična vtisna trdnost lesa v smeri sile ($f_{h,\alpha,k}$) za vijake znaša:

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}. \quad (162)$$

Kjer sta:

$f_{h,0,k}$ - karakteristična vtisna (bočna) trdnost lesa v smeri vlaken in

k_{90} - koeficient; njegova vrednost je odvisna od vrste lesa in premera vijaka.

Karakteristična vtisna (bočna) trdnost lesa v smeri vlaken ($f_{h,0,k}$):

$$f_{h,0,k} = 0,082(1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k = 0,082(1 - 0,01 \cdot 20) \cdot 410 = 26,90 \text{ N/mm}^2. \quad (163)$$

Kjer sta:

d - premer vijaka v [mm] in

ρ_k - karakteristična gostota lesa [kg/m^3].

Koeficient k_{90} znaša za les iglavcev:

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d = 1,35 + 0,015 \cdot 20 = 1,65. \quad (164)$$

Karakteristična vtisna trdnost lesa v smeri sile ($f_{h,\alpha=90,k}$) za vijake znaša:

$$f_{h,90,k} = \frac{26,90}{1,65 \cdot \sin^2 90 + \cos^2 90} = 16,30 \text{ N/mm}^2.$$

Karakteristična nosilnost vijakov v eni strižni ravnini za eno vezno sredstvo:

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} (1) & 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d = 0,5 \cdot 16,30 \cdot 400 \cdot 20 = 65200,0 \text{ N} \\ (2) & 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,2,k} \cdot d} = 2,3 \sqrt{362050,6 \cdot 16,30 \cdot 20} = 24987,41 \text{ N} \end{cases}$$

$$F_{v,Rk} = 24987,41 \text{ N} = 24,99 \text{ kN}$$

Karakteristična odpornost enega vijaka ($F_{v,ef,Rk}$) se v primeru dvostrizne ravnine določi glede na spodnjo enačbo:

$$F_{v,ef,Rk} = m \cdot F_{v,Rk} = 2 \cdot 24,99 \text{ kN} = 49,97 \text{ kN}. \quad (165)$$

Kjer je:

m - število strižnih ravnin; ($m = 2$).

Projektna odpornost enega vijaka ($F_{v,ef,Rd}$) se določi glede na spodnjo enačbo:

$$F_{v,ef,Rd} = k_{mod} \cdot \frac{F_{v,ef,Rk}}{\gamma_m} = 0,9 \cdot \frac{49,97}{1,25} = 71,97 \text{ kN}. \quad (166)$$

Upoštevam, da se obremenitev porazdeli enakovredno na vsa vezna sredstva. Za sile v smeri y , ki so razmeroma majhne ($V_{y,B,Ed,max} = 24,59 \text{ kN}$) predpostavim, da se v jeklo prenesejo preko kontaktnih napetosti. Potrebno število veznih sredstev (n) se izračuna po spodnjem izrazu:

$$n = \frac{S_d}{F_{v,ef,Rd}} = \frac{893,84 \text{ kN}}{71,97 \text{ kN}} = 12,42 < 16 \text{ vijakov} \quad (167)$$

Kjer je:

S_d - projektna strižna obremenitev priključka, $S_d = V_{z,B,Ed} = 893,84 \text{ kN}$.

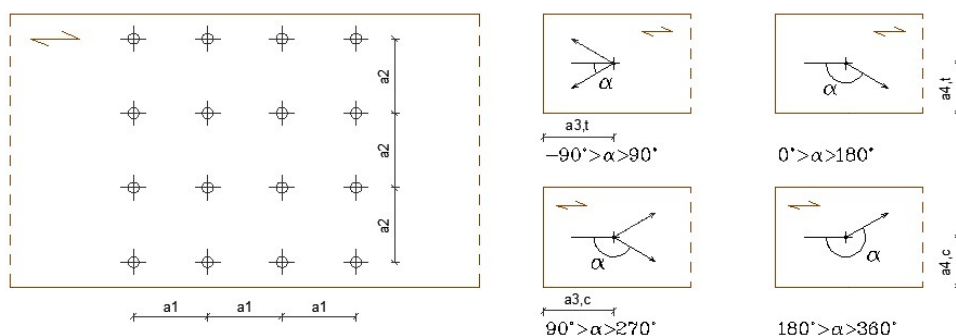
Na podlagi izvedene kontrole je dokazana, ustreznost izbire 16 vijakov premera 20 mm.

Pomemben dejavnik pri dimenzioniranju vijakov je konstruktivna razporeditev vijakov. Minimalni dovoljeni razmaki in odmiki od robov in koncev lesa, ki zagotovijo varnost priključne ravnine, kot jih zahteva Evrokod 5, so prikazani v Preglednici 57 in na Sliki 61.

Preglednica 57: Minimalni dovoljeni razmaki med vijaki in oddaljenosti vijakov od robov in koncev lesa

Označba razmika	Kot smeri sile napram vlaknom lesa	Minimalni dovoljen razmik
a_1 (v smeri vlaken)	$0 \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(4 + \cos \alpha)d$
a_2 (pravokotno na vlakna)	$0 \leq \alpha \leq 360^\circ$	$4d$
$a_{3,t}$ (obremenjen konec)	$-90 \leq \alpha \leq 90^\circ$	$\max. \{7d; 80\text{mm}\}$
$a_{3,c}$ (neobremenjen konec)	$90 \leq \alpha \leq 150^\circ$	$\max. \{1 + 6 \sin \alpha\} d; 4d$
	$150 \leq \alpha \leq 210^\circ$	$4d$
	$210 \leq \alpha \leq 270^\circ$	$\max. \{1 + 6 \sin \alpha\} d; 4d$
$a_{4,t}$ (obremenjen rob)	$0 \leq \alpha \leq 180^\circ$	$\max. \{2 + 2 \sin \alpha\} d; 3d$
$a_{4,c}$ (neobremenjen rob)	$180 \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$

Vir: Beg, D.(ur), Pogačnik, A. (ur.)., 2009: str. 5-66)



Slika 61: Minimalni dovoljeni razmaki med vijaki in oddaljenosti vijakov od robov in koncev lesa

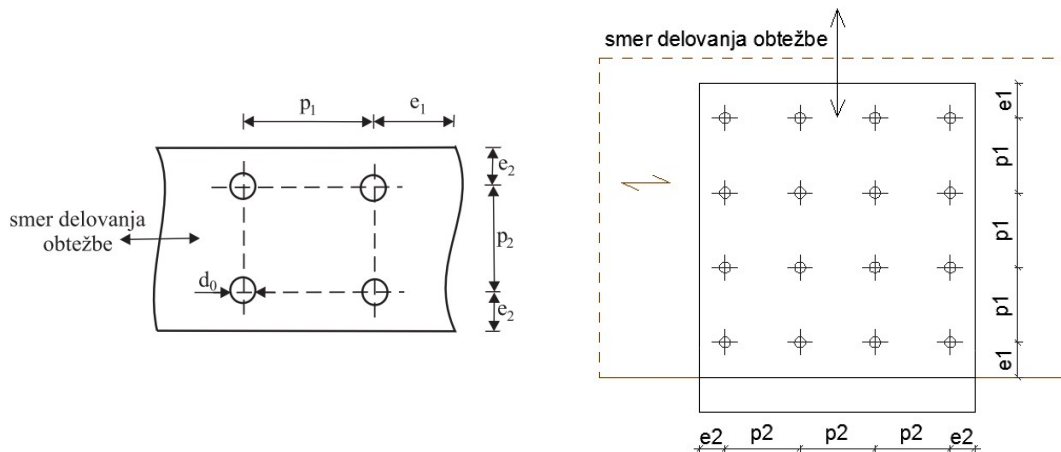
Kontrola predvidenih razmakov ($\alpha = 90^\circ$):

$$a_1 = 150 \text{ mm} > (4 + |\cos 90^\circ|) \cdot 20 \text{ mm} = 80 \text{ mm} \quad (168)$$

$$a_2 = 150 \text{ mm} > 4 \cdot d = 4 \cdot 20 \text{ mm} = 80 \text{ mm} \quad (169)$$

$$a_{4,c} = 70 \text{ mm} > 3 \cdot d = 3 \cdot 20 \text{ mm} = 60 \text{ mm} \quad (170)$$

Določene pogoje za določitev medsebojnih in robnih odmikov veznih sredstev podaja tudi Evrokod 3. Zahtevane razdalje so prikazane na Sliki 61.



Slika 62: Dovoljeni medsebojni in robni odmiki veznih sredstev (standard - levo, izbrano - desno)

Dovoljeni medsebojni in robni odmiki veznih sredstev:

$$e_1 = 2,0 \cdot d_0 = 2,0 \cdot 22 \text{ mm} = 44 \text{ mm} < e_{1,dej} = 70 \text{ mm}$$

$$e_2 = 1,5 \cdot d_0 = 1,5 \cdot 22 \text{ mm} = 33 \text{ mm} < e_{2,dej} = 50 \text{ mm}$$

$$p_1 = 3,0 \cdot d_0 = 3,0 \cdot 22 \text{ mm} = 66 \text{ mm} < p_{1,dej} = 150 \text{ mm}$$

$$p_2 = 3,0 \cdot d_0 = 3,0 \cdot 22 \text{ mm} = 66 \text{ mm} < p_{2,dej} = 150 \text{ mm}$$

9.1.2 Dimenzioniranje čepa

Zgornji in spodnji del ležišča sta med seboj povezana z jeklenim čepom premera 42 mm. Uporaba jeklenega čepa v spojih omogoča prost zasuk primarnega lesenega nosilca okoli osi čepa. Glede na zahteve v mejnem stanju nosilnosti je potrebno za čep preveriti njegovo strižno nosilnost, nosilnost na bočni pritisk za pločevino in čep ter upogibno nosilnost čepa.

Kontrola strižne nosilnosti čepa

Kontrolo strižne nosilnosti čepa v eni strižni ravnini sem izvedla na podlagi spodnje enačbe:

$$F_{v,Rd} = 0,6 \cdot A \cdot f_{up} / \gamma_{M2} \geq F_{v,Ed} \quad (171)$$

Kjer so:

A - površina prečnega prereza čepa,

f_{up} - natezna trdnost čepa; za izbran čep kvalitete 8.8 je $f_{up} = 80 \text{ kN/cm}^2$ in

γ_{M2} - delni varnostni faktor; $\gamma_{M2} = 1,25$.

Površina prečnega prereza čepa (A):

$$A = \pi \cdot \frac{d^2}{4} = \pi \cdot \frac{4,2^2}{4} = 13,85 \text{ cm}^2 \quad (172)$$

V spoju se pojavi obtežba v smeri z ($V_{z,B,Ed}$). Obtežba v smeri y ($V_{y,B,Ed}$), je usmerjena v smeri osi čepa in se na podporno konstrukcijo prenese preko kontaktnih napetosti v jeklenih pločevinah. Zato se projektna strižna obremenitev spoja ($F_{v,Ed}$) določi:

$$F_{v,Ed} = \frac{V_{z,B,Ed}}{4} = \frac{893,84 \text{ kN}}{4} = 223,46 \text{ kN} \quad (173)$$

Strižna nosilnost čepa v eni strižni ravnini:

$$F_{v,Rd} = 0,6 \cdot 13,85 \text{ cm}^2 \cdot 80 \text{ kN/cm}^2 / 1,25 = 532,01 \text{ kN} \geq F_{v,Ed} = 223,46 \text{ kN}.$$

Nosilnost na bočni pritisk za pločevino in čep

Nosilnost na bočni pritisk za pločevino in čep se določi na podlagi spodnje enačbe:

$$F_{b,Rd} = 1,5 \cdot d \cdot t \cdot f_y / \gamma_{M0} \geq F_{b,Ed} \quad (174)$$

Kjer so:

d - premer čepa ($d = 4,2 \text{ cm}$),

t - debelina pločevine,

f_y - napetost tečenja (manjša vrednost od čepa oz od pločevine) in

γ_{M0} - delni varnostni faktor ($\gamma_{M0} = 1,0$).

Debelina pločevine (t):

$$t = \min(t_1; 2t_2) = \min(4 \text{ cm}; 2 \cdot 3 \text{ cm}) = 4 \text{ cm} \quad (175)$$

Kjer sta:

t_1 - debelina pločevine v zgornjem delu ležišča in

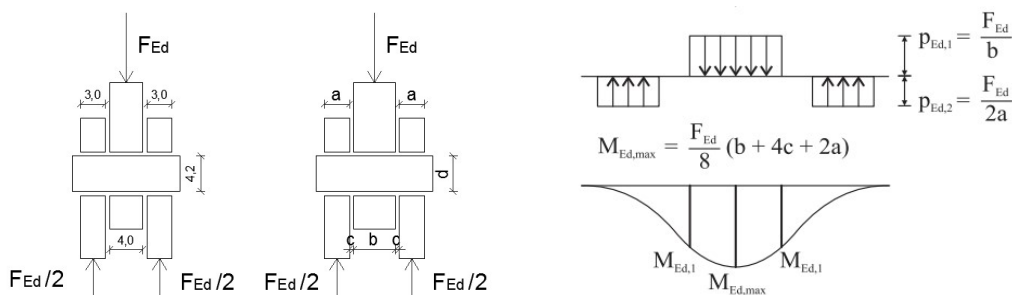
t_2 - debelina pločevine v spodnjem delu ležišča

Kontrola bočne nosilnosti, glede na zgornjo pločevino, za izbrani čep:

$$F_{b,Rd} = 1,5 \cdot 4,2 \text{ cm} \cdot 4 \text{ cm} \cdot 23,5 \text{ kN/cm}^2 / 1 = 592,20 \text{ kN} \geq F_{b,Ed} = \frac{V_{z,B,Ed}}{2} = 446,92 \text{ kN}.$$

Upogibna nosilnost čepa

Zaradi delovanja sile, ki se preko čepa prenaša iz pločevine v zgornjem delu ležišča prenaša v pločevino v spodnjem delu ležišča se v čepu pojavijo upogibni momenti. Za kontrolo le teh se predpostavi poenostavljen potek kontaktnih tlakov, kot jih prikazuje Slika 62.



Slika 63: Obravnavani spoj - levo (vir: lasten); račun upogibnih momentov v čepu – desno
(Vir: Beg, D.(ur), Pogačnik, A. (ur.). 2009: str. 3-79)

Kontrola upogibne nosilnosti čepa se izvede na podlagi spodnje enačbe:

$$M_{Rd} = 1,5 \cdot W_{el} \cdot f_{yp} / \gamma_{M0} \geq M_{Ed,max}. \quad (176)$$

Kjer so:

W_{el} - elastični odpornostni moment prečnega prereza čepa,

f_{yp} - napetost tečenja čepa; za izbran čep kvalitete 8.8 je $f_{yp} = 64 \text{ kN/cm}^2$ in

γ_{M0} - delni varnostni faktor; ($\gamma_{M0} = 1$).

Elastični odpornostni moment prečnega prereza čepa (W_{el})

$$W_{el} = \frac{\pi \cdot d^3}{32} = \frac{\pi \cdot 4,2^3}{32} = 7,27 \text{ cm}^3. \quad (177)$$

Upogibni moment zaradi delovanja zunanje obtežbe ($M_{Ed,max}$):

$$M_{Ed,max} = \frac{F_{Ed}}{8} (b + 4c + 2a) = \frac{446,92 \text{ kN}}{8} (4 + 4 \cdot 0,2 + 2 \cdot 3) = 603,34 \text{ kNcm}. \quad (178)$$

Kjer je:

F_{Ed} - sila, ki deluje na čep

a, b, c - geometrijske karakteristike izbranega spoja

$$F_{Ed} = \frac{V_{z,B,Ed}}{2} = 446,92 \text{ kN}$$

Kontrola upogibne nosilnosti:

$$M_{Rd} = 1,5 \cdot 7,27 \text{ cm}^3 \cdot 64 \text{ kN/cm}^2 / 1 = 698,26 \text{ kNcm} \geq M_{Ed,max} = 603,34 \text{ kNcm}.$$

Zaradi istočasnega delovanja upogibnega momenta in striga v čepu se izvede kontrola interakcije po spodnji enačbi:

$$\left[\frac{M_{Ed,1}}{M_{Rd}} \right]^2 + \left[\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \right]^2 \leq 1 \quad (179)$$

Kjer je: $M_{Ed,1}$ - upogibni moment v območju rege.

Upogibni moment v območju rege ($M_{Ed,1}$):

$$M_{Ed1} = p_{Ed} \cdot a \cdot \frac{a}{2} = \frac{F_{Ed}}{2a} \cdot \frac{a^2}{2} = \frac{F_{Ed} \cdot a}{4} = \frac{446,92 \text{ kN} \cdot 3 \text{ cm}}{4} = 335,19 \text{ kNcm}. \quad (180)$$

Kjer sta:

p_{Ed} - enakomerna nadomestna obtežba na mestu pločevine in

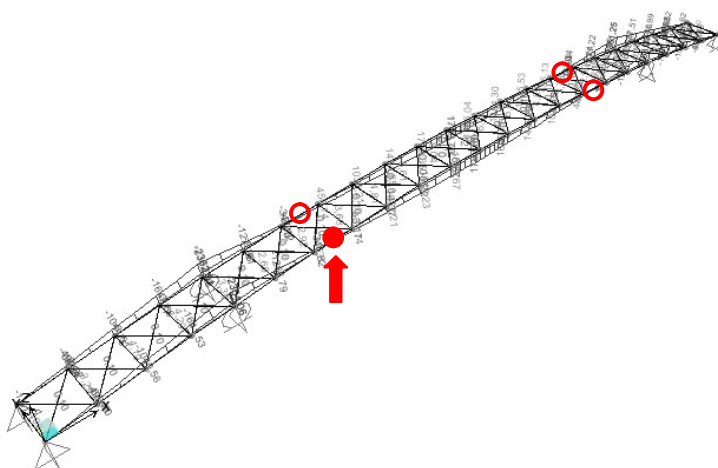
a - debelina pločevine.

Kontrola interakcije upogibnega momenta in striga v čepu:

$$\left[\frac{335,19 \text{ kNcm}}{698,26 \text{ kNcm}} \right]^2 + \left[\frac{446,92 \text{ kN}}{532,01 \text{ kN}} \right]^2 = 0,936 \leq 1 \quad (181)$$

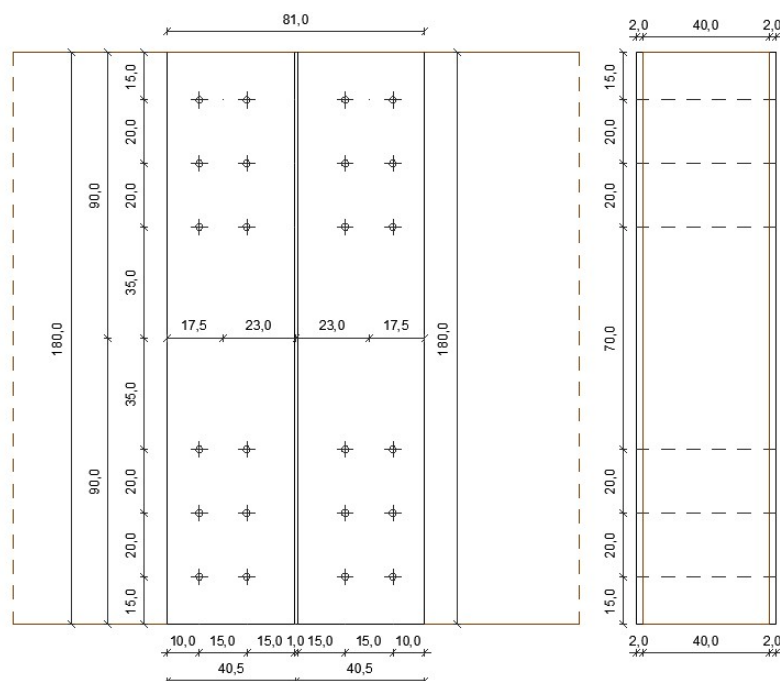
9.2 Stik med glavnimi nosilci

Primarni leseni lepljen nosilec dolžine 65,74 m se zaradi problemov s transportom razdeli na tri dele, ki so med seboj povezani z jekleno pločevino in vijaki. Zunanja dva elementa merita v dolžino 19,50 m, osrednji pa 26,74 m. Jeklen stik se izvede na oddaljenosti 7,48 m od AB podporne stene, na sredini med dvema jeklenima prečnima elementoma. Vsi štirje stiki se dimenzionirajo glede na vrednost notranjih sil pridobljenih na sredini končnega elementa, kot je prikazano na Sliki 64.



Slika 64: Prikaz izbranega vozlišča za določitev notranjih sil v elementu

Stik med glavnimi nosilci bo izveden z jeklenimi zaplatami debeline 20 mm, ter vijaki premera \varnothing 20 mm, trdnostnega razreda 5.8. Geometrija izbrane zaplate je prikazana na Sliki 65.



Slika 65: Prikaz geometrije izbrane zaplate

Notranje sile v izbranem elementu sem določila konzervativno iz ovojnice vseh notranjih sil, brez pripadajočih ostalih notranjih sil:

$$M_{Ed} = 205,11 \text{ kNm}$$

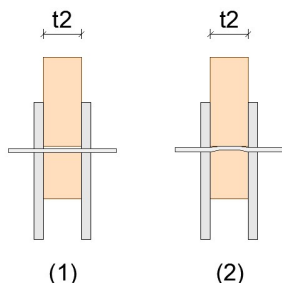
$$V_{z,Ed} = -73,915 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = 159,69 \text{ kN}$$

9.2.1 Dimenzioniranje vijakov

Dimenzioniranje vijakov v primeru momentnega spoja med primarnimi lepljenimi nosilci izvedemo po podobnem postopku, kot dimenzioniranje vijakov jeklenega ležišča. Ležišče se obravnava kot zveza z dvema priključnima ravninama (dvostrizna zveza), kjer je pločevina na zunanji strani lesenega elementa. Karakteristično nosilnost vijakov v eni strižni ravnini za eno vezno sredstvo sem izvedla skladno s točko 8.2.3 standarda SIST EN 1995 – 1-1:2005. Ker gre za dvostrizni stik ($t \geq d$) z debelo jekleno pločevino na zunanji strani stika sem preverila naslednja dva porušitvena kriterija (Slika 66):

- (1) bočna porušitev lesa okoli veznega sredstva v lesenem elementu in
- (2) večkratna plastifikacija veznega sredstva.



Slika 66: Prikaz porušitvenih kriterijev za dvostržno zvezo

(1) Bočno porušitev lesa okoli veznega sredstva v lesenem elementu izvedem skladno z enačbo (159):

$$F_{v,Rk} = 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d.$$

Kjer so:

$f_{v,Rk}$ - karakteristična nosilnost vijaka v eni strižni ravnini,

$f_{h,2,k}$ - karakteristična vtisna (bočna) trdnost lesa,

t_2 - debelina srednjega lesenega elementa in

d - premer vijaka.

(2) Plastifikacija veznega sredstva v lesenem elementu za debele pločevine ($t = d = 20 \text{ mm}$) preverim skladno z enačbo (160):

$$F_{v,Rk} = 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,2,k} \cdot d + \frac{F_{ax,Rk}}{4}}.$$

Karakteristični moment popolne plastifikacije vijaka ($M_{y,Rk}$) določim skladno z enačbo (161):

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} = 0,3 \cdot 500 \cdot 20^{2,6} = 362050,6 \text{ Nmm} = 36,21 \text{ kNcm}.$$

Kjer sta:

$f_{u,k}$ - karakteristična natezna trdnost vijaka; za vijak kvalitete 5.8 je $f_{u,k} = 500 \text{ N/mm}^2$ in

d - premer vijaka; $d = 20 \text{ mm}$.

Karakteristična vtisna trdnost lesa v smeri sile ($f_{h,\alpha,k}$) za vijake znaša skladno z enačbo (162):

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}.$$

Kjer sta:

$f_{h,0,k}$ - karakteristična vtisna (bočna) trdnost lesa v smeri vlaken in

k_{90} - koeficient; njegova vrednost je odvisna od vrste lesa in premera vijaka.

Karakteristična vtisna (bočna) trdnost lesa v smeri vlaken ($f_{h,0,k}$) znaša skladno z enačbo (163):

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot 20) \cdot 410 = 26,90 \text{ N/mm}^2.$$

Kjer so:

d - premer vijaka v [mm],

ρ_k - karakteristična gostota lesa [kg/m^3] in

Koeficient k_{90} znaša za les iglavcev skladno z enačbo (164):

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d = 1,35 + 0,015 \cdot 20 = 1,65$$

Za vrednost kota α privzamem konzervativno vrednost 90° . S tem sem na varni strani in dobim manjšo vtisno trdnost. Karakteristična vtisna trdnost lesa v smeri sile ($f_{h,\alpha=90,k}$) za vijake znaša:

$$f_{h,90,k} = \frac{26,90}{1,65 \cdot \sin^2 90 + \cos^2 90} = 16,30 \text{ N/mm}^2.$$

Ker je izbrana jeklena zaplata debeline $t = d = 20\text{mm}$, določata nosilnost veznega sredstva naslednja kriterija:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d = 0,5 \cdot 16,30 \cdot 400 \cdot 20 = 65202,42 \text{ N} \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,2,k} \cdot d} = 2,3 \sqrt{362050,6 \cdot 16,30 \cdot 20} = 24987,88 \text{ N} \end{array} \right.$$
$$F_{v,Rk} = 24987,88 \text{ N} = 24,99 \text{ kN}$$

Karakteristična odpornost enega vijaka ($F_{v,ef,Rk}$) se določi glede na enačbo (165):

$$F_{v,ef,Rk} = m \cdot F_{v,Rk} = 2 \cdot 24,99 \text{ kN} = 49,98 \text{ kN}.$$

Kjer je:

m - število stičnih ravnin; ($m = 2$).

Projektna minimalna odpornost enega vijaka ($F_{v,ef,Rd}$) se določi glede na enačbo (166):

$$F_{v,ef,Rd} = k_{mod} \cdot \frac{F_{v,ef,Rk}}{\gamma_m} = 0,9 \cdot \frac{49,98}{1,25} = 35,98 \text{ kN}.$$

Preko jeklene zaplate se prenašata momentna obtežba ($M_{Ed} = 205,11 \text{ kNm}$), strižna sila ($V_{z,Ed} = -73,915 \text{ kN}$) in osna sila ($N_{Ed} = 159,69 \text{ kN}$). V primeru dimenzioniranja vijakov je potrebno obtežbo primerno korigirati tako, da se upošteva obremenitev stika v težišču veznih sredstev. Na njihovo vrednost torej vpliva še razdalja (e) od sredine zaplate do težišča veznih sredstev na eni ali drugi strani (Slika 67).

Moment v težišču veznih sredstev ($M_{Ed,c}$):

$$M_{Ed,c} = M_{Ed} + V_{z,Ed} \cdot e = 205,11 \text{ kNm} + 73,915 \text{ kN} \cdot 0,23 \text{ m} = 222,11 \text{ kNm}. \quad (182)$$

Kjer je:

e - razdalja med sredino zaplate in težiščem veznih sredstev ene polovice zaplate.

$$e = 5 + 150 + 150/2 = 230 \text{ mm} = 0,23 \text{ m}$$

Prečna sila ($V_{z,Ed,c}$) in osna sila ($N_{Ed,c}$) v težišču veznih sredstev ene polovice zaplate.

$$V_{z,Ed,c} = V_{z,Ed} = 73,915 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,c} = N_{Ed} = 159,69 \text{ kN}$$

Zaradi momenta v težišču veznih sredstev se v najbolj oddaljenem (in hkrati najbolj obremenjenemu) vijaku pojavi naslednja obtežba ($F_{m,d,max}$):

$$F_{m,d,max} = \frac{M_{Ed,c} \cdot r_{max}}{\sum_i r_i^2}. \quad (183)$$

Kjer je:

r_{max} - razdalja med težiščem veznih sredstev in najbolj obremenjenim vijakom:

$$r_{max} = \sqrt{7,5^2 + 75^2} = 75,37 \text{ cm}. \quad (184)$$

r_i - razdalja med težiščem skupine veznih sredstev in i -tim veznim sredstvom

$$\sum_i r_i^2 = 2 \cdot (4 \cdot 35,79^2 + 4 \cdot 55,51^2 + 4 \cdot 75,37^2) = 80350 \text{ cm}^2 \quad (185)$$

Sila v najbolj oddaljenem vijaku ($F_{m,d,max}$), zaradi momenta:

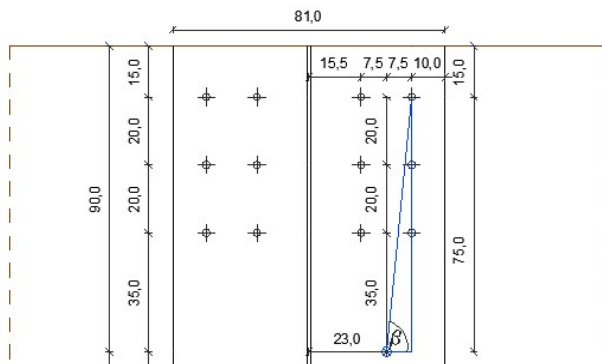
$$F_{m,d,max} = \frac{M_{Ed,c} \cdot r_{max}}{\sum_i r_i^2} = \frac{219,52 \cdot 100 \cdot 65,43}{80350} = 22,38 \text{ kN}.$$

Silo v najbolj oddaljenem vijaku razdelimo na komponento v smeri prečne sile (smer z) in komponento v smeri osne sile (smer x), ki je odvisna od kota (β), kakor je prikazan na Sliki 67.

$$\text{kot } \beta: \quad \beta = \tan^{-1}\left(\frac{75}{7,5}\right) = 84,29^\circ \quad (186)$$

$$\text{smer x:} \quad F_{m,d,max,x} = F_{m,d,max} \cdot \sin \beta = 22,38 \text{ kN} \cdot \sin 84,29^\circ = 20,73 \text{ kN} \quad (187)$$

$$\text{smer z:} \quad F_{m,d,max,z} = F_{m,d,max} \cdot \cos \beta = 22,38 \text{ kN} \cdot \cos 84,29^\circ = 2,07 \text{ kN} \quad (188)$$



Slika 67: Geometrijski prikaz vrednosti kota β

Oсна sila ($N_{Ed,c}$) in prečna sila ($V_{z,Ed,c}$) v težišču veznih sredstev ene polovice zaplate se porazdelita enakovredno na vseh 12 vijakov. Na posamezni vijak odpadeta osna sila ($F_{N,d}$) in prečna sila ($F_{Vz,d}$):

$$F_{N,d} = \frac{N_{Ed,c}}{n} = \frac{159,69 \text{ kN}}{12} = 13,31 \text{ kN}$$

$$F_{Vz,d} = \frac{V_{z,Edct}}{n} = \frac{73,915 \text{ kN}}{12} = 6,16 \text{ kN}$$

Komponente se seštejejo po posamezni smeri:

$$\text{smer } x: F_{d,x} = F_{m,d,max,x} + F_{N,d} = 20,73 \text{ kN} + 13,31 \text{ kN} = 34,04 \text{ kN}$$

$$\text{smer } z: F_{d,z} = F_{m,d,max,z} + F_{Vz,d} = 2,07 \text{ kN} + 6,16 \text{ kN} = 8,23 \text{ kN}$$

Obremenitev najbolj obremenjenega vijaka tako znaša:

$$F_d = \sqrt{F_{d,x}^2 + F_{d,z}^2} = \sqrt{34,04^2 + 8,23^2} = 35,02 \text{ kN}. \quad (189)$$

S tem je dokazano, da je zadoščeno kontroli nosilnost vijakov saj velja:

$$F_d = 35,02 \text{ kN} \leq F_{v,ef,Rd} = 35,98 \text{ kN}.$$

Pomemben dejavnik pri dimenzioniranju vijakov je konstruktivna razporeditev vijakov. Minimalni dovoljeni razmaki in odmiki od robov in koncev lesa, ki zagotovijo varnost priključne ravnine, kot jih zahteva Evrokod 5, so prikazani Preglednici 58.

Preglednica 58: Minimalni dovoljeni razmaki med vijaki in oddaljenosti vijakov od robov in koncev lesa

Označba razmika	Kot smeri sile napram vlaknom lesa	Minimalni dovoljen razmik
a_1 (v smeri vlaken)	$0 \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(4 + \cos \alpha) \cdot d$
a_2 (pravokotno na vlakna)	$0 \leq \alpha \leq 360^\circ$	$4d$
$a_{3,t}$ (obremenjen konec)	$-90 \leq \alpha \leq 90^\circ$	$\max.\{7d; 80\text{mm}\}$
$a_{3,c}$ (neobremenjen konec)	$90 \leq \alpha \leq 150^\circ$	$\max.\{(1 + 6 \sin \alpha) d; 4d\}$
	$150 \leq \alpha \leq 210^\circ$	$4d$
$a_{4,t}$ (obremenjen rob)	$210 \leq \alpha \leq 270^\circ$	$\max.\{(1 + 6 \sin \alpha) d; 4d\}$
	$0 \leq \alpha \leq 180^\circ$	$\max.\{(2 + 2 \sin \alpha) d; 3d\}$
$a_{4,c}$ (neobremenjen rob)	$180 \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$

(Vir: Beg, D.(ur), Pogačnik, A. (ur.). 2009: str. 5-66)

Minimalni dovoljeni razmaki in odmiki od robov in koncev lesa, ki zagotovijo varnost priključne ravnine so odvisni od premera veznih sredstev in kota smeri sile napram vlaknom lesa (α). Glede na vrednost omenjenega kota lahko konzervativno predpostavim, da je $\alpha \approx 0$ in sem s tem na varni strani. Kontrola predvidenih minimalnih razmakov med vijaki (zahteve Evrokod 5):

$$a_1 = 150 \text{ mm} > (4 + |\cos 0|) \cdot 20 \text{ mm} = 100 \text{ mm}$$

$$a_2 = 200 \text{ mm} > 4 \cdot 20 \text{ mm} = 80 \text{ mm}$$

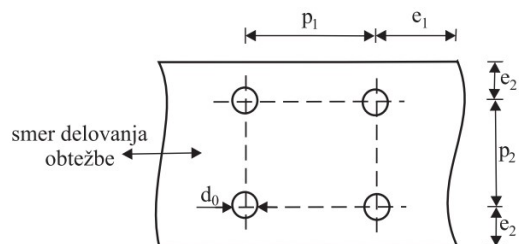
$$a_{3,t} = 150 \text{ mm} > \max.\{7d; 80\text{mm}\} = \max.\{7 \cdot 20; 80\text{mm}\} = 140 \text{ mm}$$

$$a_{4,t} = 150 \text{ mm} > \max.\{(2 + 2 \cdot \sin 0) \cdot 20; 3 \cdot 20\} = 60 \text{ mm}$$

Kjer je:

$$\alpha = 90^\circ - \beta = 90^\circ - 85,97^\circ = 4,02^\circ.$$

Določene pogoje za določitev medsebojnih in robnih odmikov veznih sredstev podaja tudi Evrokod 3. Zahtevane razdalje so prikazane na Sliki 68.



Slika 68: Dovoljeni medsebojni in robni odmiki veznih sredstev

(Vir: Beg, D.(ur), Pogačnik, A. (ur.). 2009: str. 3-67)

Dovoljeni medsebojni in robni odmiki veznih sredstev:

$$e_1 = 2,0 \cdot d_0 = 2,0 \cdot 22 \text{ mm} = 44 \text{ mm} < e_{1,dej} = 100 \text{ mm}$$

$$e_2 = 1,5 \cdot d_0 = 1,5 \cdot 22 \text{ mm} = 33 \text{ mm} < e_{2,dej} = 100 \text{ mm}$$

$$p_1 = 3,0 \cdot d_0 = 3,0 \cdot 22 \text{ mm} = 66 \text{ mm} < p_{1,dej} = 150 \text{ mm}$$

$$p_2 = 3,0 \cdot d_0 = 3,0 \cdot 22 \text{ mm} = 66 \text{ mm} < p_{2,dej} = 150 \text{ mm}$$

10 ZAKLJUČEK

Namen diplomske naloge je bil projektirati leseno brv za pešce in kolesarje, v sklopu ureditve obstoječe poti za pešce in kolesarje, preko avtoceste A2 na odseku Kranj vzhod - Brnik. Zasnova brvi je bila pripravljena tako, da se upošteva najbolj optimalna navezava na obstoječi del poti za pešce in kolesarje, kar je pogojevalo skupni razpon konstrukcije 65,74 m. Višino osi glavnega nosilca (6,5 m) je pogojevala višina prostega profila avtoceste pod njim. Svetla širina brvi 2,74 m, pa je bila izbrana na podlagi navodil za projektiranje kolesarskih površin.

Za primarno nosilno konstrukcijo brvi sta bila izbrana dva lesena lepljena nosilca dimenzij 40/150 cm trdnostnega razreda GL28h. V prečni smeri primarna nosilca povezuje 23 jeklenih okvirov kvalitete S355, pozicioniranih na medsebojni razdalji 3 m. Ti so sestavljeni iz enega profila HEB200 v horizontalni smeri ter z dvema profiloma HEB200 v vertikalni smeri. Za prevzem obremenitev v prečni smeri so v kombinaciji z jeklenimi nosilci izbrane jeklene diagonale premera 20 mm in kvalitete S235. Sekundarne vzdolžne nosilne elemente predstavlja 11 zaporedno nameščenih nosilcev preko dveh polj dolžine 6,0 m, dimenzij 24/26 cm, ki so pozicionirani v petih linijah na medsebojni osni razdalji 0,59 m. Povožna oz pohodna površina je sestavljena iz podnic iz hrastovega lesa kvalitete D40, dolžine 2,70 m s prečnim prerezom 20/12 cm.

Pomemben del projektiranja je bila izbira računskega modela mostu. Za dimenzioniranje vseh elementov je bil pripravljen prostorski (3D) model in trije ravninski (2D) modeli. Modeli so bili sestavljeni iz med seboj centrično povezanih linijskih elementov. Njihova ekscentričnost je bila definirana v samem prečnem prerezu. Konstrukcijo skrajno levo podpirata dve nepomični vrtljivi ležišči. Ležišča na sredinski podporni steni in desnem krajnem oporniku so prav tako vrtljiva in omogočijo pomik v smeri osi konstrukcije (smer x). Razpon krajnih dveh polj znaša osno 11,91 m, razpon sredinskega polja pa 41,92 m.

V diplomski nalogi so bile predstavljene obtežbe, ki vplivajo na konstrukcijo tekom njene življenjske dobe. Prikazan je bil potek izračuna njihovih vrednosti ter način upoštevanja njihovega delovanja na objekt. Vrednosti notranjih sil so bile nato kombinirane z upoštevanjem predpisanih varnostnih faktorjev in združene v določene kombinacije obtežb. Izmed vseh kombinacij so bile izpisane ekstremne vrednosti notranjih sil in njim pripadajoče vrednosti ostalih sil. Te se bile podlaga za dimenzioniranje konstrukcije, kot je bilo prikazano v točki 8 diplomske naloge.

Končne dimenzije elementov v konstrukciji so bile dobljene preko iteracije izračuna notranjih sil, računske kontrole dimenzij in popravljanjem in usklajevanjem računskih modelov v programu sap2000. Med pripravo naloge sem sem spreminjala dimenzije prečnih prerezov, izbirala različne trdnostne razrede oz kvalitete elementov, in njihove dolžine ter medsebojne oddaljenosti. Za zaključek je bilo izvedeno detajlno dimenzioniranje dveh stikov oz priključkov.

Tekom pisanja diplomske naloge sem podrobneje spoznala zahtevnost in razsežnost projektiranja lesenih konstrukcij, najbolj pa sem bila navdušena nad raznolikostjo možnosti, ki jih lahko uporabimo pri konstruiranju lesene brvi.

11 VIRI

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

Kitek Kuzman, M (ur). 2009. Gradnja z lesom izziv in priložnost za Slovenijo. Ljubljana: 252 – 256 str.

Lazar, T. 2011. Leseni in masivni mostovi. Diplomsko delo. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo (samozaložba T. Lazar): str. 18.

Lipar, P. (av.t.), Kostanjšek, J. (soav.t.), Andrejčič Mušič, P. (ur.). 2012. Navodila za projektiranje kolesarskih površin, Novelacija maj 2012. Ministrstvo za infrastrukturo in prostor, Direkcija RS za ceste: str. 11-13, 18, 25, 27.

Suzić, L. 2015. Projektiranje lesene brvi čez Savo Bohinjko pri Bohinjski Bistrici. Diplomaska naloga. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (samozaložba L. Suzić): str. 88.

Arso. 2016. Karta projektnega pospeška tal.

http://www.arso.gov.si/potresi/potresna%20nevarnost/projektni_pospesek_tal.html

(Pridobljeno 1.3.2016)

Arso. 2016. Potresi

<http://www.arso.gov.si/potresi/> (Pridobljeno 12.3.2016)

STANDARDI:

EN 1990:2002/A1:2005: E. Eurocode – Basis of structural design

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, lastne teže, koristne obtežbe stavb.

SIST EN 1991-1-4:2005. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-4. del: Splošni vplivi – vplivi vetra.

SIST EN 1991-1-5:2005. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-5. del: Splošni vpliv – vplivi temperaturnih sprememb.

SIST EN 1991-2:2004. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 2. del: Prometna obtežba mostov.

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

SIST EN 1993-1-8:2005. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-8. del: Projektiranje spojev.

SIST EN 1995-1-1:2005. Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe.

SIST EN 1995-2:2005. Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij – 2. del: Mostovi.

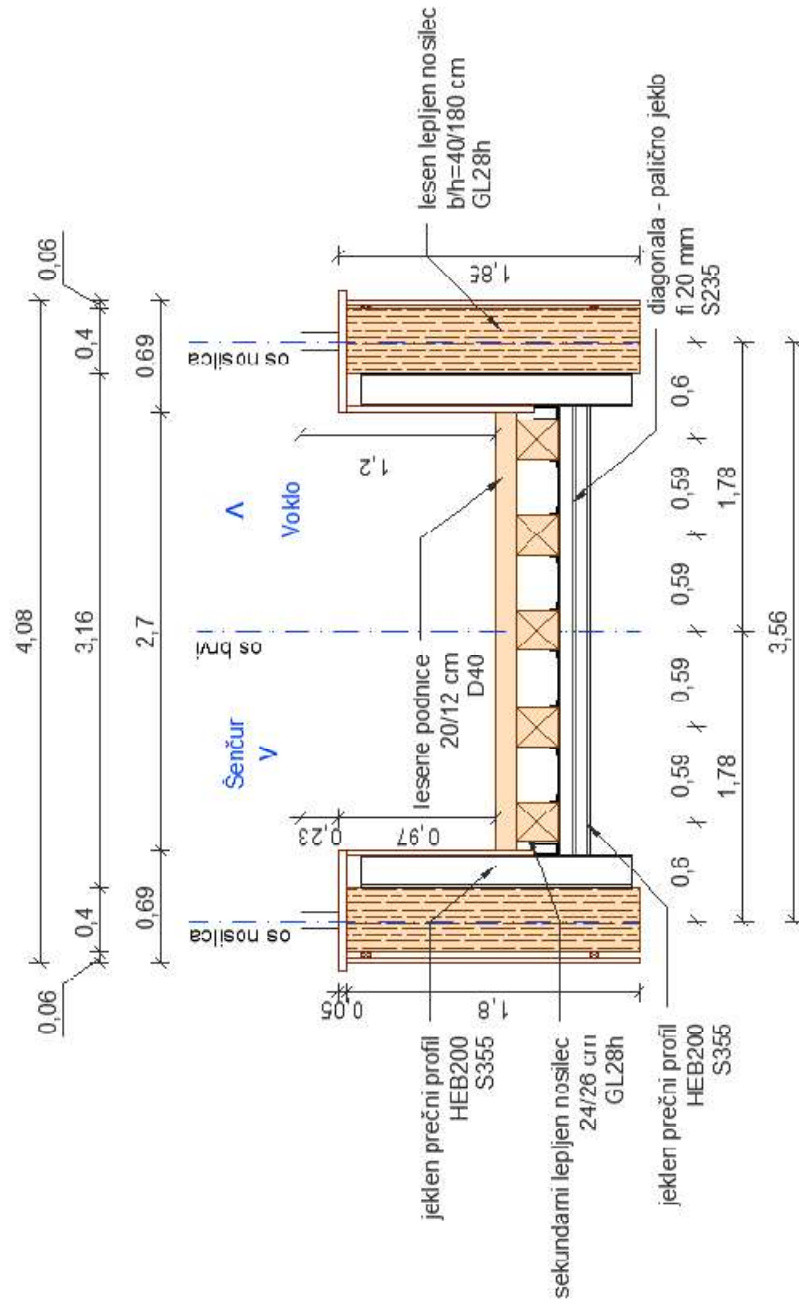
SIST EN 1998-1:2005. Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe.

SIST EN 1998-2:2006. Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 2. del: Mostovi.

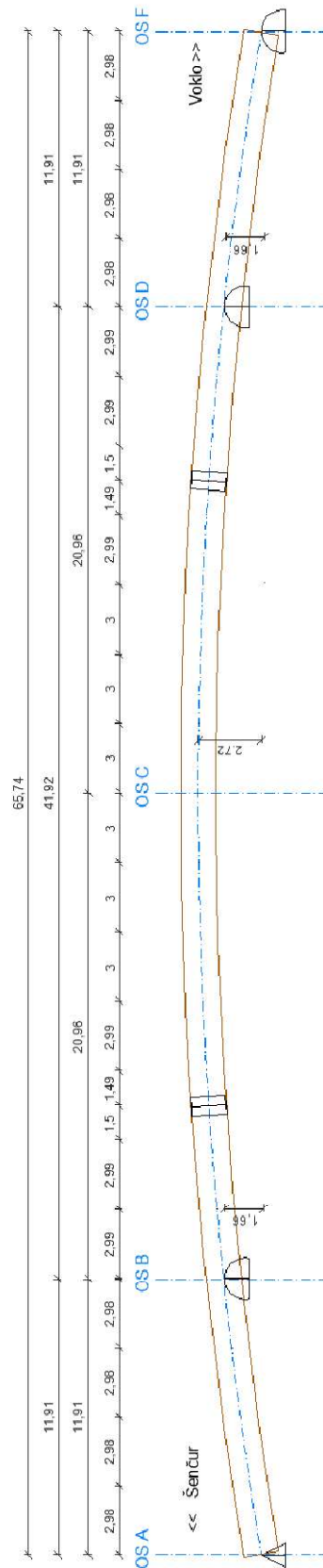
SEZNAM PRILOG

PRILOGA A:	PREČNI PREREZ BRVI
PRILOGA B:	DIMENZIJE PROSTORSKEGA MODELA (VZDOLŽNO)
PRILOGA C:	IZGLED LEŽIŠČA
PRILOGA D:	DETAJL JEKLENE ZAPLATE

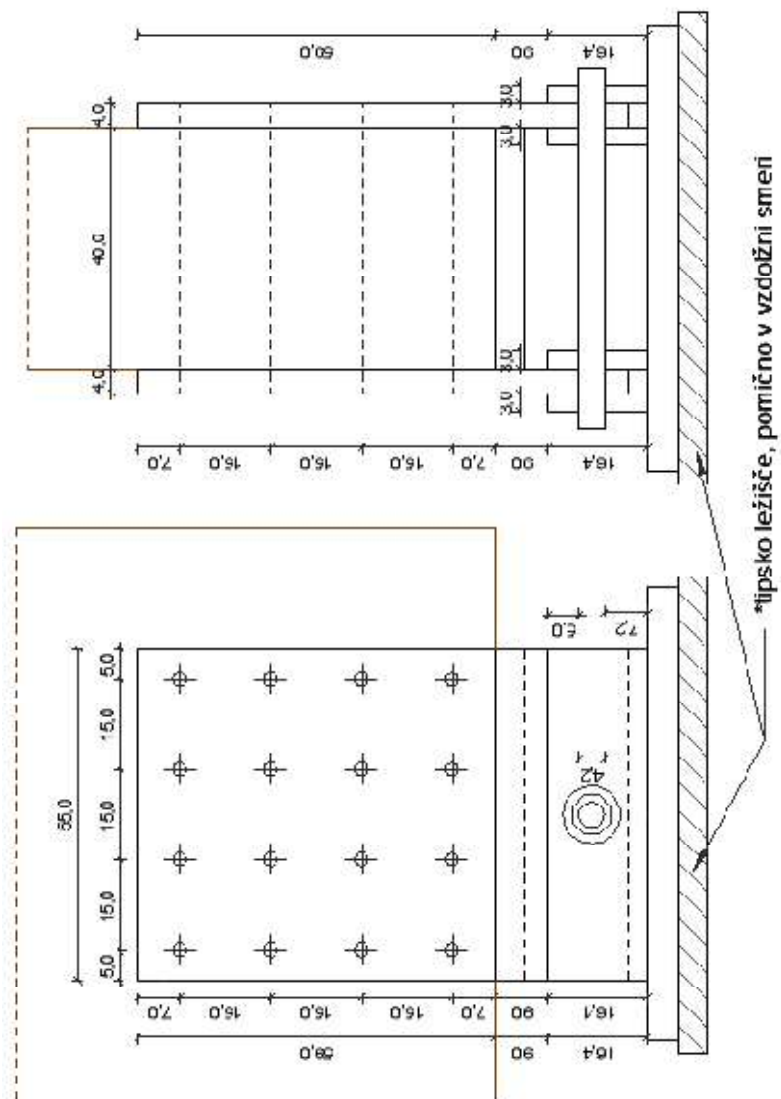
PRILOGA A: PREČNI PREREZ BRVI



PRILOGA B: DIMENZIJE PROSTORSKEGA MODELA (VZDOLŽNO)



PRILOGA C: IZGLED LEŽIŠČA



PRILOGA D: DETAJL JEKLENE ZAPLATE

