

Opinnäytetyö (AMK)

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

2019

Jussi Koivula

EMOLEHMÄPIHATON TERÄSRUNGON SUUNNITTELU

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

2019 | 65 sivua, 43 liitesivua

Jussi Koivula

EMOLEHMÄPIHATON TERÄSRUNGON SUUNNITTELU

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella teräskehistä koostuva emolehmäpihaton runko ja mitoittaa rungon kaksinivelkehät. Työn lähtökohtana käytettiin kohteen pääsuunnittelijalta saatuja pääpiirustuksia. Teräskehistä tehtiin lisäksi toimeksiantajalle kokoonpanopiirustukset.

Työn kaksinivelkehän suunnittelu pohjautuu lähtökohtaisesti teräsrakenteiden eurokoodien määräyksiin ja ohjeisiin. Työssä käsitellään rungon kuormien laskenta ja työn pääpaino on kaksinivelkehän sauvojen ja liitosten mitoituksessa.

Kehän valmistukseen käytettyjen rakenneosien mitoituksessa tarvittavat keskeisimmät laskukaavat ja laskelmien tulokset on koottu opinnäytetyön mitoitusosioon. Lopulliset laskelmat kehän palkeista, pilareista ja liitoksista ovat työn liitteinä.

ASIASANAT:

rakennesuunnittelu, teräsrakenteet, kaksinivelkehä, pihatto

BACHELOR'S | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Civil Engineering

2019 | 65 pages, 43 pages in appendices

Jussi Koivula

DESIGNING OF COWSHED STEEL FRAME

The purpose of this thesis was design a steel structure in the cowshed and make structural designing of a two-pin frames. The starting point of the project were the main drawings made by the principal designer. In addition the assembly drawings of a steel frame were made to the customer.

The design of the two-pin frame is basically based on the regulations and instructions of the Eurocodes for steel structures. The thesis will briefly review the load calculations and the main focus of the thesis is on the dimensioning of the two-pin frames and joints.

The most important calculation formulas used in thesis and calculations are compiled into the dimensioning section. The calculation results of the beams, columns and joints designing are attached end of the thesis.

KEYWORDS:

structural design, steel structures, two-pin frame, cowshed

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	8
2 EMOLEHMÄPIHATTO	9
3 TERÄSRUNKO	11
3.1 Teräs	11
3.2 Hitsatut rakenteet	12
3.3 Teräskehät	16
4 TERÄSRUNGON SUUNNITTELU	18
4.1 Rakennuksen lähtötiedot	18
4.2 Runkojärjestelmä	18
5 RAKENNESUUNNITTELU	22
5.1 Suunnittelun vaatimukset	22
5.2 Kuormat	22
5.3 Pysyvät kuormat	22
5.4 Muuttuvat kuormat	22
5.4.1 Lumikuorma	23
5.4.2 Tuulikuorma	23
5.5 Rakenteiden luokitus ja kuormien yhdistelyt	24
5.6 Materiaaliominaisuudet	26
5.7 Rakenneosien mitoitus	26
5.7.1 Palkin laskenta	27
5.7.2 Palkin laskennan tulokset	38
5.7.3 Pilari laskenta	38
5.7.4 Pilarin laskennan tulokset	43
5.8 Liitosten mitoitus	44
5.8.1 Liitosten laskennan teoria	44
5.8.2 Harjaliitoksen laskelmien tulokset	60
5.8.3 Nurkan pilari-palkki liitoksen tulokset	60
5.8.4 Peruspulttiliitoksen tulokset	61
6 POHDINTA	63

LIITTEET

- Liite 1. HKSCANmallipihatto.
 Liite 2. Palkin mitoitus.
 Liite 3. Pilarin mitoitus.
 Liite 4. Harjaliitoksen mitoitus.
 Liite 5. Pilari-palkkiliitoksen mitoitus.
 Liite 6. Peruspulttiliitoksen mitoitus.

KAAVAT

Kaava 1. Lumikuorma katolla.	23
Kaava 2. Teräksen myötövenymä.	26
Kaava 3. Laipan tehollinen leveys.	29
Kaava 4. Uuman tehollinen korkeus.	29
Kaava 5. Taivutusmomentin käyttöaste.	31
Kaava 6. Kimmoteorian mukainen taivutusvastus.	32
Kaava 7. Kimmoteorian mukainen taivutuskestävyys.	32
Kaava 8. Leikkauskestävyyden käyttöaste.	32
Kaava 9. Uuman pinta-ala.	32
Kaava 10. Plastinen taivutuskestävyys.	32
Kaava 11. Ehto leikkauslommahdukselle.	33
Kaava 12. Leikkauslommahduskestävyys.	33
Kaava 13. Ehto leikkausvoiman, taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutukselle.	34
Kaava 14. Yhteisvaikutusyhtälö normaalivoimalle ja taivutusmomentille.	34
Kaava 15. Kiepahduskestävyyden käyttöaste.	34
Kaava 16. Muunnettu hoikkuus.	34
Kaava 17. Yhteisvaikutus y-akselin suhteen.	35
Kaava 18. Yhteisvaikutus z-akselin suhteen.	35
Kaava 19. Puristuskestävyyden käyttöaste.	39
Kaava 20. Puristuskestävyyden mitoitusarvo.	39
Kaava 21. Taivutusnurjahduksen mitoitusarvo.	40
Kaava 22. Pienennystekijän χ arvo.	40
Kaava 23. Suureen Φ arvo.	42
Kaava 24. Muunnettu hoikkuus λ poikkileikkausluokille 1, 2 ja 3.	42
Kaava 25. Suureen λ_1 arvo.	42
Kaava 26. Vääntönurjahduskestävyyden mitoitusarvo.	42
Kaava 27. Taivutusnurjahdus y-akselin suhteen.	43
Kaava 28. Taivutusnurjahdus z-akselin suhteen.	43
Kaava 29. Epäkeskisyyden aiheuttama taivutusmomentti.	47
Kaava 30. Ruuvien yhdistetty leikkaus- ja vetokestävyys.	49

Kaava 31. Palkin puristetun laipan ja puristetun uuman osan yhdistetty puristuskestävyys.	53
Kaava 32. Vedetyn uuman kestävyys.	53
Kaava 33. Liitoksen kestävyys.	53
Kaava 34. Liitoksen taivutuskestävyys.	53
Kaava 35. Palkin uuman vetokestävyys.	54
Kaava 36. Liitoslevyn normaalivoima.	54
Kaava 37. Päätylevyn vaadittu paksuus.	54
Kaava 38. Pilarin uumen leikkauskestävyys.	55
Kaava 39. Ruuvien vetokestävyys.	55
Kaava 40. Ruuvien jännityspoikkipinta-ala.	55
Kaava 41. Ruuvien leikkauskestävyys.	55
Kaava 42. Yhdistetty leikkaus- ja vetovoima.	56
Kaava 43. Pienahitsin vaadittu a-mitta.	56
Kaava 44. Liitoksen kiertymisjäykkyyden alkuarvo.	57
Kaava 45. Liitoksen kiertymisjäykkyys.	58

KUVAT

Kuva 1. Kylmä emolehmäpihatto (Hellstedt 2014, 35).	10
Kuva 2. Työssä käytetty I-profiili (Ongelin ym. 2010, 11).	13
Kuva 3. I-profiilin poikkileikkauksen akselisto (Ongelin ym. 2010, 77).	13
Kuva 4. Koteloprofiili (Ongelin ym. 2010, 11).	14
Kuva 5. Eri luokkien kriteerit (Kaitila 2014, 42).	15
Kuva 6. Vaihtoehtoisia hitsausmuotoja (Ongelin ym. 2010, 551).	15
Kuva 7. Kehän taivutusmomentit kuormitusyhdistelmälle KY7.	16
Kuva 8. Kehäpalkin kiepahduskestävyys <i>lk</i> .	19
Kuva 9. Todellinen ja mitoituksessa käytetty I-profiilin poikkileikkaus.	26
Kuva 10. Kehän leikkauspiirros.	28
Kuva 11. Hitsatun I-profiilin merkintätapa (Ongelin ym. 2010, 12).	28
Kuva 12. Pilarin eri tuentatapaukset ja nurjahdusmuodot (Kaitila 2014, 74).	40
Kuva 13. Ekvivalentin T-osan laipan mitat (SFS-EN 1993-1-8, 73).	51
Kuva 14. Kehän nurkan päätylevyn puristusvoima (Hämeen ammattikorkeakoulu 2008, 92).	54
Kuva 15. Pienahitsin a-mitta (Kaitila 2014, 106).	56
Kuva 16. Täysin lujan liitoksen vaatimukset (Ongelin ym. 2010, 303).	58
Kuva 17. Jäykkyyden mukainen liitosluokitus (SFS-EN 1993-1-8, 60).	59
Kuva 18. Harjaliitoksen geometria.	60
Kuva 19. Kehän pilari-palkkiliitos.	61
Kuva 20. Peruspulttiliitos.	62

TAULUKOT

Taulukko 1. Teräksen myötö- ja vetomurtolujuudet standardin 10025 mukaan (Ongelin ym. 2010, 26).	12
Taulukko 2. Käyttötarkoituksen mukainen paloluokan määrittäminen (Ympäristöministeriö, 10).	20

Taulukko 3. Rakenteiden viitteellinen suunniteltu käyttöikä (Teräsrakenneyhdistys ry).	21
Taulukko 4. Maastoluokkien mukainen puuskanopeuspaineen ominaisarvo (RIL 201-1-2017, 137).	23
Taulukko 5. Rakennusten seuraamusluokat (RIL 201-1-2017, 26).	24
Taulukko 6. Kuormien yhdistelykertoimet (RIL 201-1-2017, 38).	25
Taulukko 7. Puristettujen taso-osien leveys-paksuussuhteet osa 1 (SFS-EN 1993-1-1, 45).	30
Taulukko 8. Puristettujen taso-osien leveys-paksuussuhteet osa 2 (SFS-EN 1993-1-1, 46).	31
Taulukko 9. Pienennystekijä (Kaitila 2014, 67).	33
Taulukko 10. Kiepahduskäyrien epätarkkuustekijät (SFS-EN 1993-1-1, 66).	35
Taulukko 11. Kiepahduskäyrän valinta (SFS-EN 1993-1-1, 66).	35
Taulukko 12. Yhteisvaikutustarkastelun suureet (Ongelin ym. 2010, 196).	36
Taulukko 13. Yhteisvaikutustekijät sauvoille, joissa ei ole vääntömuodonmuutosta (Ongelin ym. 2010, 198).	36
Taulukko 14. Yhteisvaikutustekijät sauvoille, kun vääntömuodonmuutos mahdollinen (Ongelin ym. 2010, 199).	37
Taulukko 15. Ekvivalentin momentin kertoimet (Ongelin ym. 2010, 200).	37
Taulukko 16. Nurjahduskäyrien epätarkkuustekijät (SFS-EN 1993-1-1, 62).	41
Taulukko 17. Poikkileikkauksen mukainen nurjahduskäyrän valinta (SFS-EN 1993-1-1, 63).	41
Taulukko 18. Liitosten peruskomponentit osa 1 (SFS-EN 1993-1-8, 67).	45
Taulukko 19. Liitosten peruskomponentit osa 2 (SFS-EN 1993-1-8, 68).	46
Taulukko 20. Liitosten peruskomponentit osa 3 (SFS-EN 1993-1-8, 69).	47
Taulukko 21. Ruuvien keskiöväli, pääty- ja reunaetäisyydet (Kaitila 2014, 90).	48
Taulukko 22. Ruuvien nimellisvälykset (Kaitila 2014, 90).	49
Taulukko 23. Ruuvien myötörajan ja vetomurtolujuuden nimellisarvot (SFS-EN 1993-1-8, 21).	49
Taulukko 24. Yksittäisten kiinnitimien kestävyysmitoitussarvot, kun kyseessä leikkaus ja/tai veto (SFS-EN 1993-1-8, 28).	50
Taulukko 25. T-osan kestävyysmitoitussarvo (SFS-EN 1993-1-8, 74).	52
Taulukko 26. Taslujien kaksoispienahitsien suhde ja muodonmuutoskyvyn vaatiman minimimitoituksen suhde (Kaitila 2014, 108).	56
Taulukko 27. Liitoksen jäykkyystekijöiden valinta ruuvikiinnityksille (SFS-EN 1993-1-8, 102).	59

1 JOHDANTO

Opinnäytetyössä tarkastellaan teräksestä valmistetun rungon suunnittelua. Työn tavoitteena on perehtyä emolehmäpihatossa käytettävän teräsrunгон vaatimuksiin ja teräksen ominaisuuksiin rakennusmateriaalina, sekä toteuttaa teräsrunkona toimivan kaksinivelkehän rakennesuunnittelu. Koko suunnittelutyön laajuuden takia työssä keskitytään tuomaan esille vain suunnittelussa huomioitavia tärkeämpiä asioita. Emolehmäpihaton teräsrunгон suunnittelu toteutetaan Metsämaan Metall Oy:lle.

Kaksinivelkehän suunnittelu vaatii osaamista tavanomaisesta poikkeavien liitosten mitoituksessa. Työssä perehdytään myös, kuinka kaksinivelkehä toimii omana jäykkyyjärjestelmänä kehän suuntaisesti. Työn aiheen valintaan vaikuttivat oman oppimisen lisäksi sen kiinnostavuus ja työstä saatu hyöty yritykselle.

Opinnäytetyössä tarkastellaan emolehmäpihaton käyttöön liittyvää toimintaa ja perehdytään pihaton valintaan vaikuttaviin toiminnallisiin seikkoihin. Työssä käsiteltävän teräsrunгон suunnittelussa tarkastellaan rakennuksen kuormat, kuormitusyhdistelyt ja mitoituksen perusasiat. Työhön on valikoitu tiivistetysti vain kehän rakenneosien, kuten palkin, pilarin ja niiden liitoksien mitoitus sekä niitä koskevat tärkeimmät kaavat. Liitosten mitoituksessa vertailuna käytetyn FEM-ohjelman laskelmia ei esitetä työssä niiden laajuuden takia, vaan ne on mahdollista tehdä työssä annetuilla lähtötiedoilla. Rakennuksen mitoitukseen vaikuttavat suunnitteluperusteet, kuten seuraamusluokat käydään lyhyesti pääpiirteittäin lyhyesti läpi. Tarkemmat ohjeistukset laskelmiin löydettiin työssä käytetyn lähdekirjallisuuden avulla.

Työn lähdemateriaaleina on käytetty suurimmalta osaltaan teräsrakentamisen eurokoodeja ja Rautaruukin Hitsatut Profiilit-käsikirjaa. Näiden lisäksi tärkeitä lähdemateriaaleja ovat olleet Teräsrakenneyhdistyksen julkaisut.

Opinnäytetyössä tavoitellaan sellaista kokonaisuutta, jota voidaan hyödyntää jatkossa mahdollisissa samankaltaisissa töissä. Työ sisältää kehän rakenneosien ja liitosten mitoituksen.



Kuva 1. Kylmä emolehmäpihatto (Hellstedt 2014, 35).

Peruskokoisen emolehmäpihattorakennuksen pituutena on 54 metriä ja leveytenä 15,5 metriä, jolloin katetun rakennuksen pinta-ala on noin 840 m². Vapaan liikkumisen ja tarvittavien aputilojen myötä kantavana runkona käytetään teräskehiä, joiden kk-jako on 6 metriä. Liitteessä 1 on esitetty HKSCANin edustajan Kimmo Haapasen suunnittelema mallipihatto. Jänneväleiltään suurissa rakennuksissa käytetään tarvittaessa keskipilareita. Eläimistä syntyvän kosteuden poistamiseksi rakennuksen riittävän ja toimivan ilmanvaihdon kannalta vesikaton on oltava kaltevuudeltaan vähintään 1:3. Vesikaton sekundäärirakenteena ovat puu- tai teräsorret, joiden päälle tulee kantava teräspoimulevy. Luonnonvaloa lisätään korvaamalla 2 metrin korkeudelta poimulevyä valo-aukkokatteella. Riittävän vapaan tilan saamiseksi rakennuksen korkeutena seinien vieressä on 4,9 metriä ja harjalla 7,4 metriä. Rakennuksen päätyihin tulee harvalaudoitus ja liuku- tai pressuovet, alapohjana ja lantakäytävillä toimii 120 millimetriä paksu teräsbetonilaatta. (Haapanen 2017.)

3 TERÄSRUNKO

3.1 Teräs

Teräksen käyttö rakennusmateriaalina perustuu korkeaan lujuuteen mikä takaa kevyet ja muuntojoustavat rakenteet. Rakenteet saadaan kestäväksi suuria kuormia ja tiloista pystytään toteuttamaan avaria, jopa pitkällä jänneväleillä ilman keskipilareita. Teräs takaa rakenteille pitkän käyttöiän ja tiloja voidaan helposti muuttaa uuden käyttötarkoituksen mukaiseksi. (Teräsrakenneyhdistys ry 2010.)

Rakenneteräksenä käytetään standardin SFS-EN 10025-2 mukaan yleisesti joko seostai hiiliteräksiä, joissa hiilipitoisuuden tulee olla alle 1,7 %. Suurempi hiilipitoisuus lisää teräksen lujuutta, mutta heikentää muita ominaisuuksia, kuten iskutietoisuutta, hitsattavuutta ja muovattavuutta, sekä teräksen sulamislämpötila laskee. Seosteräkset ovat niukka- tai runsasseosteisia ja hiiliteräkset ovat seostamattomia. Käyttämällä hienorakeisempaa seosta teräkseen saadaan lisää lujuutta ja iskukestävyyttä. Kromi-, kupari- ja nikkeliseostuksella teräksen korroosiokestävyyttä parannetaan pintaan muodostuvan oksidikerroksen avulla. Teräksen ominaisuuksiin kytetään vaikuttamaan kiderakenteita muokkaamalla lämpökäsittelyllä tai mekaanisesti takomalla tai valssaamalla. (Teräsrakenneyhdistys ry 2010.)

Rakenneteräksen nimike määräytyy standardin SFS-EN 10027-1 mukaan päätunnuksista ja teräksen laatuluokan määrittelevistä mahdollisista lisätunnuksista. Käytettäessä esimerkiksi teräslajimerkintää EN 10025-2–S355J2G4, tarkoittaa termi EN 10025-2 standardia, S on rakenneteräksen tunnus ja sen jälkeen ilmoitettu luku 355 tarkoittaa teräksen myötölujuutta [N/mm^2], J2 on iskutietoisuus -20 asteen lämpötilassa ja lisätunnus G4 tarkoittaa, että teräs on tiivistetty tiivisteaineilla. Taulukossa 1 on esitetty kantavissa rakenteissa yleisemmin käytetyt teräslujuudet ovat S235, S275 ja S355. (Kai-tila 2014, 22, 28.)

Taulukko 1. Teräksen myötö- ja vetomurtolujuudet standardin 10025 mukaan (Ongelin ym. 2010, 26).

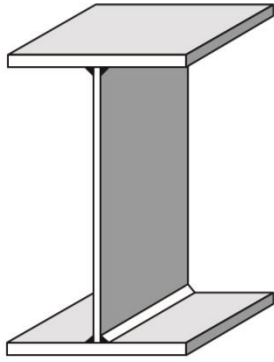
Standardi ja teräslaji	Nimellispaksuus t (mm)			
	t ≤ 40		40 < t ≤ 80	
	f _y (N/mm ²)	f _u (N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	f _u (N/mm ²)
EN 10025-2				
S235	235	360	215	360
S275	275	430	255	410
S355	355	490	335	470
EN 10025-3				
S275 N/NL	275	390	255	370
S355 N/NL	355	490	335	470
S420 N/NL	420	520	390	520
S460 N/NL	460	540	430	540
EN 10025-4				
S275 M/ML	275	370	255	360
S355 M/ML	355	470	335	450
S420 M/ML	420	520	390	500
S460 M/ML	460	540	430	530
EN 10025-5				
S235 W	235	360	215	340
S355 W	355	490	335	490
EN 10025-6				
S460 Q/QL/QL1	460	570	440	550

Tämän taulukon arvot ovat Eurocoden osassa EN 1993-1-1 esitetyt yksinkertaistetut arvot, joita on käytetty tämän käsikirjan laskuesimerkeissä. **Maakohtaiset vaatimukset on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).**

Rakenneteräksistä yleisemmin käytössä ovat standardin mukaiset kuumavalssatut poikkileikkaukset, kuten I-, H- ja putkiprofiilit, sekä muototangot ja levytuotteet. Kylmämuovattujen tuotteiden käyttö rajautuu enimmäkseen sekundäärikannattajiin ja ei-rakenteellisiin rakenneseisiin. (Kaitila 2014, 23-24.)

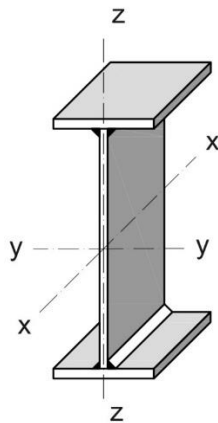
3.2 Hitsatut rakenteet

Hitsatuissa rakenteissa profiilit kootaan normaalisti saman lujuusluokan kuumavalssatuista teräslevyistä, mikä on yleisesti S355. Profiileissa käytetyt levyt ovat nimeltään uuma- ja laippalevyjä, jotka kiinnitetään toisiinsa hitsaamalla kuvan 2 tapaan. (Ongelin ym. 2010, 10–12.)



Kuva 2. Työssä käytetty I-profiili (Ongelin ym. 2010, 11).

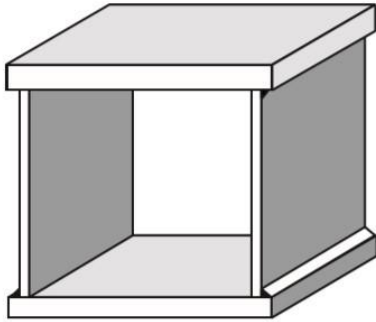
Kuten teräsrakenteilla yleisesti myös hitsatut rakenteet mitoitetaan poikkileikkauksen kestävyden mukaan. Rakenneosalle määritetään poikkileikkausluokka väliltä PL1-PL4, mikä määrittää käytetyn laskentatavan. Poikkileikkausluokan tarkistus tulee aloittaa luokan yksi mukaan ja siirtyä suurempaan jos annetut ehdot eivät täyty. Laskelmissa käytetyt akselistot ovat kuvan 3 mukaiset. Kolmessa ensimmäisessä luokassa koko poikkileikkaus on tehollinen eli silloin koko poikkileikkauksen pinta-ala huomioidaan. Poikkileikkausluokassa 4 otetaan huomioon vain erikseen määritetty tehollinen poikkileikkaus eli silloin profiilista ei saada täyttä hyötyä käytettyä. Poikkileikkauksessa laipat ja uuma eivät aina ole samaa luokkaa, mutta koko profiilissa käytetään aina huonointa eli suurinta poikkileikkausluokkaa. (Ongelin ym. 2010, 77-80.)



Kuva 3. I-profiilin poikkileikkauksen akselisto (Ongelin ym. 2010, 77).

Hitsatuilla rakenteilla pyritään optimoimaan rakenteessa käytettävän teräsprofriilin koko suhteessa kestävyteen, jolloin rakenteista tulee keveitä ja materiaalimenekki on mahdollisimman pientä. Teollisuus- ja talonrakentamisessa kantavien rakenteiden käytetyin

hitsattu palkki on kuvan 2 I-profiili. Palkissa uuman korkeus voidaan muotoilla muuttuvaksi palkin pituussuunnassa, jolloin tarvittava teräs saadaan rungon kuormitetuimpaan osaan. Leveälaippaisena kyseinen profiili soveltuu myös pilariksi. Siirryttäessä raskaammin kuormitetuihin rakenteisiin pilareina toimii kuvan 4 koteloprofiili, sen vääntöjäykkyyden ollessa moninkertainen suhteessa I-profiiliin. Kahta viimeistä profiilia käytetään välipohjarakenteissa palkkeina. (Ongelin ym. 2010, 10-11.)



Kuva 4. Koteloprofiili (Ongelin ym. 2010, 11).

Hitsatut teräsrakenteet ovat valmistusluokaltaan PC2, kun käytössä on S355-lujuusluokan tai sitä suuremman luokan rakenneteräs. Yhdessä seuraamusluokkien CC1-CC3 ja käyttöluokkien SC1-SC2 kanssa suunnittelija määrittää rakenneosalle toteutusluokan EXC1-EXC4 väliltä. Edellä mainittujen luokkien valintaan vaikuttaa kuvan 5 taulukoissa esitetyt kriteerit. Emolehmäpihaton seuraamusluokaksi on valikoitunut tason CC2 mukainen luokka. Jos rakenneosalle ei ole määritetty mitään toteutusluokkaa, tulee käyttää kuitenkin vähintään toteutusluokkaa EXC2, kuten tässä kohteessa. Toteutusluokka määrittää rakenneosalle vaaditun laadun toleranssien, hitseusluokkien, tarkastusmenetelmien ja tarkastuslaajuuksien perusteella. Hitsausluokka määräytyy standardin EN 1090-2 mukaan rakenneosan toteutusluokan perusteella. (Kaitila 2014, 42.)

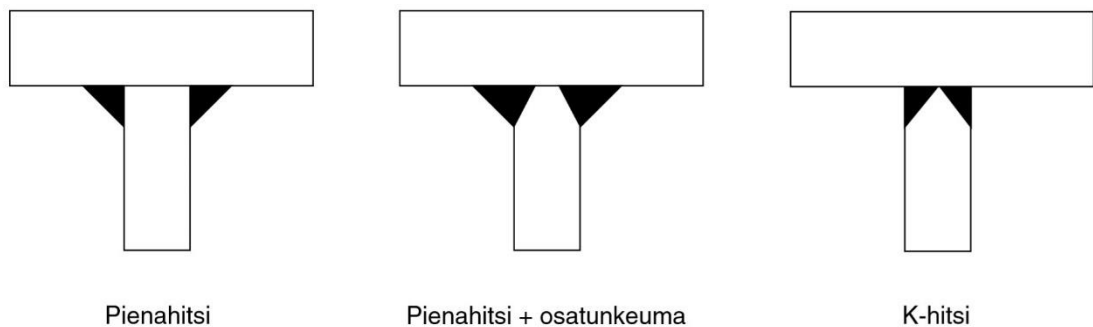
Luokka	Kriteerit
SC1	<ul style="list-style-type: none"> Rakenteet ja rakenneosat, jotka on suunniteltu vain staattisille kuormille
SC2	<ul style="list-style-type: none"> Rakenteet ja rakenneosat, jotka on suunniteltu väsytytkuormille standardin EN 1993 mukaan Rakenneosat, jotka on suunniteltu maanjäristysvoimille standardin EN 1998-1 mukaan.
Luokkaa SC1 käytetään tapauksille, jotka eivät kuulu luokkaan SC2.	

Luokka	Kriteerit
PC1	<ul style="list-style-type: none"> Hitsaamattomat rakenneosat Hitsatut rakenneosat, joissa teräksen lujuusluokka on alempi kuin S355
PC2	<ul style="list-style-type: none"> Hitsatut rakenneosat, joissa teräksen lujuusluokka on S355 tai ylempi.

Seuraamusluokka	CC1		CC2		CC3		
Käyttöluokka	SC1	SC2	SC1	SC2	SC1	SC2	
Valmistusluokka	PC1	EXC1	EXC1	EXC2	EXC3	EXC3 ^{a)}	EXC3 ^{a)}
	PC2	EXC1	EXC2	EXC2	EXC3	EXC3 ^{a)}	EXC4
^{a)} Erikoisrakenteille tai rakenteille, joiden sortumisella on äärimmäiset seuraamukset on kuitenkin valittava toteutusluokka EXC4.							

Kuva 5. Eri luokkien kriteerit (Kaitila 2014, 42).

Hitsatuissa I-profiileissa kaulahitsimuoto vaihtelee materiaalin paksuuden ja käytettävän kaluston mukaan. Normaalisissa tilanteissa käytetään kaksipuolista pienahitsiä, muita hitsausmuotoja ovat pienahitsi + osatunkeuma ja k-hitsiliitos, kuten kuvasta 6 näkyy. Hitsausasennot määräytyvät profiiliin mukaan niin, että I-profiili voidaan hitsata joko vaakatai pystyhitsauslinjalla ja koteloprofiilit hitsataan pystyhitsauslinjalla. (Ongelin ym. 2010, 545, 553.)

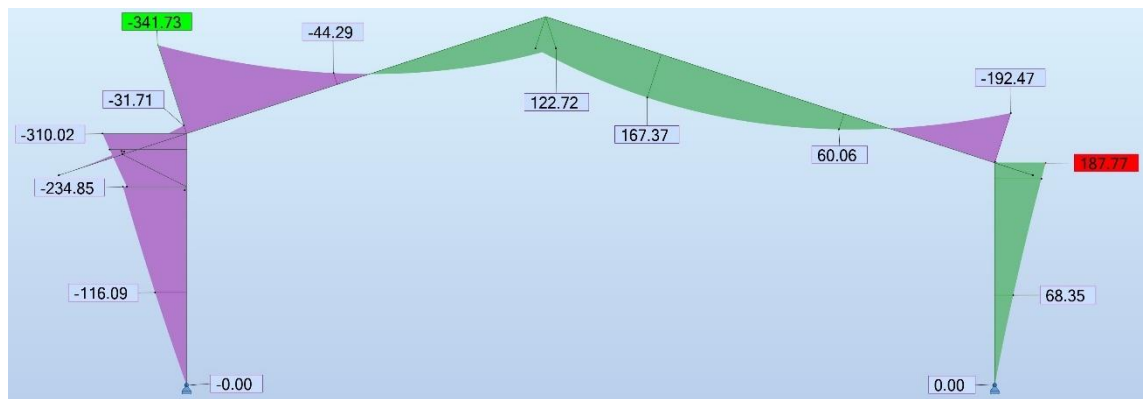


Kuva 6. Vaihtoehtoisia hitsausmuotoja (Ongelin ym. 2010, 551).

3.3 Teräskehät

Kehä on perustusten yläpuolella oleva toisiinsa liitetystä rakenneosista koostuva kokonaisuus, joka on suunniteltu kantamaan sille tulevat kuormat. Kyseinen määritelmä kattaa niin jäykkänurkkaiset kehät kuin ristikkokehät, sekä tasokehät ja kolmidimensionaaliset kehät. Kehän tulee olla tarpeeksi luja kestääkseen siihen kohdistuvat rasitukset, kehältä vaaditaan tiettyä jäykkyyttä ja sitkeyttä, jotta se säilyttää muotonsa ja kehässä on oltava myös tietyn verran varmuutta mahdollisiin siirtymiin, murtumiin ja taipumiin. (SFS-EN 1993-1-1, 11.)

Yksilaivaisten matalien hallien runkojärjestelmiä ovat tyypillisesti kolmi- tai kaksinivelkehät. Kehien nurkat toteutetaan jäykkinä tai osittain jäykkinä liitoksina. Tällöin kehillä pystytään toteuttamaan pilarien suuntainen rungon jäykistys ja tarvitaan vain erillinen pituussuuntainen jäykistejärjestelmä. Kolminivelkehässä lakiliitos on niveellinen, kun taas kaksinivelkehässä lakiliitos on nurkkien tapaan myös jäykkä tai osittain jäykkä. Kehäjäykistyksessä runkoon kohdistuvat suurimmat rasitukset tulevat kehän nurkkiin ja teräsrunko tulee muotoilla kuvan 7 momenttikuviota vastaavaksi. Muotoilu on materiaalien säästön kannalta edullinen vaihtoehto, kun taas nurkissa olevien asennusliitosten laadukas ja vaativa valmistaminen on haasteellista. (Kaitila 2014, 119.)



Kuva 7. Kehän taivutusmomentit kuormitusyhdistelmälle KY7.

Kehän kestävyys, jäykkyyteen, toimintaan ja asennettavuuteen vaikuttaa suuresti kehänurkkien suunnittelu ja toiminnallinen valinta. Nurkat voivat olla toiminnallisesti joko niveellisiä, osittain jäykkiä tai jäykkiä. Jäykän- tai osittain jäykän nurkan etuja nivelelliseen ovat kehän omapaino ja pienempi ainemenekki. Rakenteesta tulee jäykempi ja tai-

pumat ovat pienempiä. Kehässä on lujuusreserviä, jota voidaan hyödyntää plastisuusteorian mukaisessa mitoituksessa poikkileikkausluokan sen salliessa. Lisäksi kehärunko on stabiili ilman lisäjäykisteitä. Haittapuolina voidaan todeta rungon vaikeampi asennus, suuremmat työkustannukset monimutkaisemman rakennelman johdosta, lämpötilan muutokset ja vaativampi suunnittelu. (Kaitila 2014, 119.)

Tärkeitä seikkoja kehänurkkien suunnittelussa ovat, miten voimat siirtyvät palkilta pilareille, palkin laippojen jatkeeksi toimivat pilarin uuman jäykisteet, pilarin uuman leikkausjännitykset, pilarin uuman lommahdusriski ja sen jäykisteet tai vahvikelevyt, puristetun laipan sivuttaistuenta ja kaarevien tai taitteellisten laippojen poikittaiset rasitukset. (Kaitila 2014, 120.)

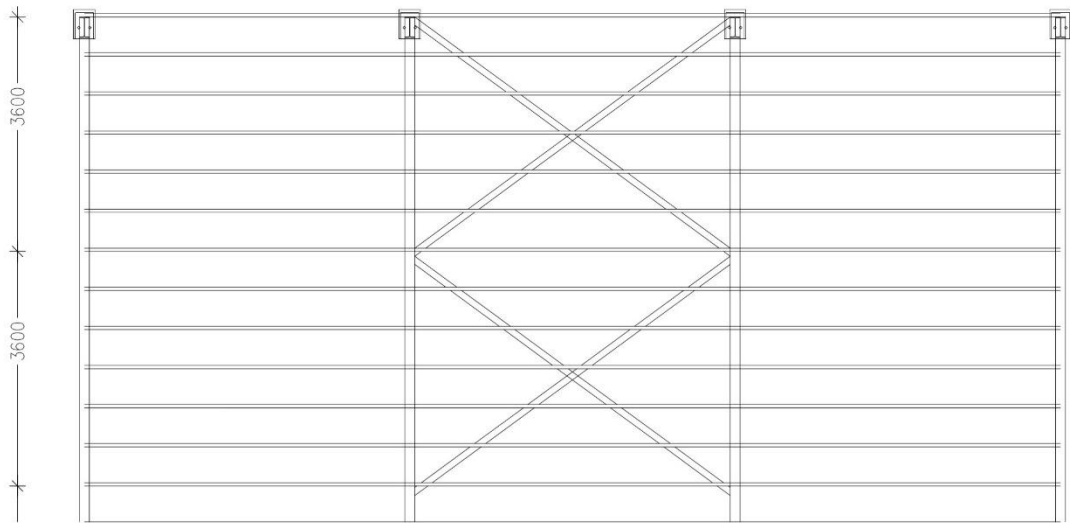
4 TERÄSRUNGON SUUNNITTELU

4.1 Rakennuksen lähtötiedot

Teräskehän suunnittelun pohjana oli pääsuunnittelijalta saadut emolehmäpihaton pääpiirustukset. Lisäksi käytössä olivat kohteen toiminnallisen suunnittelun vastaavalta rakennesuunnittelijalta HKSCANin Kimmo Haapaselta saadut emolehmäpihaton rakentamissuosituksiset. Työn emolehmäpihatorakennuksen ulkomitat ovat 15,6 x 54,2 metriä ja mitoituksessa käytetyt päämitat ovat 15,3 x 54 metriä. Rakennus on korkeudeltaan hie-man suurempi kuin saatu mallipihatto, mutta muuten pihatto on lähes saman kokoinen. Rakennuksen toiminnallisen suunnittelun vaikutuksesta kehäjako on poikkeuksellisesti viimeisessä välissä 4 metriä ja muiden kehien osalta 5 metriä.

4.2 Runkojärjestelmä

Teräsrungoksi valittiin kaksinivelkehä, joita on kaikkiaan 12 kappaletta. Kehä toimii matalissa rakennuksissa ja pitkillä jänneväleillä ilman keskipilareita. Lisäksi valinnassa otettiin huomioon kuinka liitokset on mahdollista toteuttaa käytännössä, sekä sopivan profiilin löytyminen materiaalihukan välttämiseksi. Emolehmäpihaton runkoon kuuluvat pila-reista ja palkeista koostuvan teräskehän lisäksi päätyjen tuulipilarit, räystäään kannatin-palkit ja rakennuksen pituussuuntainen jäykistys. Rungon pituussuuntainen sekundääri-jäykistys tehdään alkuperäisen Z-orren sijaan puuorsilla, joiden kk-jako on 0,6 m. Puu-osien mitoitusta ei ole työhön otettu mukaan. Kehässä kiepahdustukena toimii jäykistys-ristikoiden muodostama tukipituus pääkannattajalla kuvan 8 osoittamalla tavalla. Näin ollen kiepahduspituus l_k on kuusi kertaa orsien välinen etäisyys eli 3,6 metriä.



Kuva 8. Kehäpalkin kiepahduskestävyys l_k .

Rakennus perustetaan pilarianturoiden varaan ja alapohjana on teräsbetoni-laatta. Kehät kiinnittyvät nivelellisesti peruspulteihin pilarianturoihin ja pilarianturoissa käytetään välissä vetotankoja ottamaan mahdolliset vaakavoimat tukien kohdalla vastaan. Pilarianturoiden suunnittelu ei kuulunut opinnäytetyön sisältöön.

Paloteknisen vaatimuksen mukaan kantavien rakenteiden tulee kestää tietyn ajan tulipalossa sortumatta. Rakennusten paloluokituksen määrittämisessä käytetään Ympäristöministeriön asetusta rakennusten paloturvallisuudesta (Ympäristöministeriö 2018). Rakennukset jaetaan paloluokkiin P0, P1, P2 ja P3 ja taulukossa 2 on esitetty käyttötarkoituksen mukaan tuleva paloluokka. Paloluokka määrittää rakennukselle vaatimukset palonkestoajan ja osatointiin. Kestävyteen käytetään joko standardipalomitoitusta, jossa rakentamismääräyksillä ilmoitetaan paloluokka tai toiminnallisen kehityksen kautta oletettua palohkehitystä. Standardipalomitoitus tehdään käyttäen yksinkertaista taulukkomitoitusta tai laskentamenetelmää. Palolaskelmat suoritetaan tietyille rakennesosille erikseen tai koko rakennukselle kerralla. (Kaitila 2014, 125.)

Taulukko 2. Käyttötarkoituksen mukainen paloluokan määrittäminen (Ympäristöministeriö, 10).

Käyttötarkoitus	Rakennuksen paloluokka ja kerroslukumäärä			
	P1	P2 yli 2 krs. ¹⁾	P2 1–2 krs.	P3
KERROKSET				
Asuinrakennukset	huoneistoittain	huoneistoittain	huoneistoittain	huoneistoittain
Majoitustilat ja hoitolaitokset				
- yöpymistilat	800 ² (1 200 * ²)	800 ²	800 ² (1 200 ² *)	400 ² (600 ² *)
- muut tilat	1 600 (3 200 *)	1 200	1 600 (2 400 *)	400 (1 200 *)
Kokoontumis- ja liiketilat sekä työpaikatilat				
- 1-kerroksinen	2 400 (24 000 *)	ei mahd.	2 400 (9 600 *)	400 (1 200 *)
- 2-kerroksinen	2 400 (12 000 *)	ei mahd.	2 400 (4 800 *)	400 (600 *)
- yli 2-kerroksinen, työpaikatilat	2 400 (9 600 *)	2 400	ei mahd.	ei mahd.
- yli 2-kerroksinen, myymälätilat	2 400 (4 800 *)	300	ei mahd.	ei mahd.
- yli 2-kerroksinen, muut tilat	2 400 (4 800 *)	1 200	ei mahd.	ei mahd.
Tuotanto- ja varastotilat, palovaarallisuusluokka 1				
- 1-kerroksinen, yleensä	6 000 ⁵⁾ (60 000 *)	ei mahd.	4 000 ⁵⁾ (36 000 *)	2 000 (12 000 *)
- lämmöneristämätön rakennus	12 000 (60 000 *)	ei mahd.	12 000 (36 000 *)	12 000
- kasvihuone	24 000 ⁵⁾	ei mahd.	24 000 ⁵⁾	24 000 ⁵⁾
- 2-kerroksinen	4 000 ⁵⁾ (24 000 *)	ei mahd.	2 000 ⁵⁾ (12 000 *)	ei sallittu
- yli 2-kerroksinen	3 000 (9 000 *)	ei sallittu	ei mahd.	ei mahd.
Tuotanto- ja varastotilat, palovaarallisuusluokka 2				
- 1-kerroksinen	2 000 ⁵⁾ (12 000 *)	ei mahd.	1 000 ⁵⁾ (6 000 *)	2 000 *
- yli 1-kerroksinen	1 000 (6 000 *)	ei sallittu	ei sallittu	ei sallittu
Autosuojat				
-maan päällä rakennuksen osana	3 000 ^{3) 5)} (24 000 *)	ei mahd.	3 000 (24 000 *)	400 (3 000 *)
-maan päällä erillinen autosuoja	3 000 ^{3) 4) 5)} (24 000 *)	ei mahd.	3 000 ³⁾ (24 000 *)	1 000 (6 000 *)
-maan alla	1 500 ⁵⁾ (10 000 *)	ei mahd.	1 500 ⁵⁾ (10 000 *)	ei sallittu
ULLAKOT	1 600	1 600	1 600	alapuolisten osastojen mukaan
KELLARIKERROKSET	800 (2400 *)	800 (2400 *)	800 (2400 *)	400 (1200 *)

Ullakot ja yläpohjan ontelot jaetaan 400 m² osiin.
Alapohjan ontelot jaetaan 400 m² osiin, jos tilan pinnat eivät vähäisiä osia lukuun ottamatta täytä D-s2, d2 -luokan vaatimuksia.

¹⁾ Rakennus on varustettu tarkoitukseen sopivalla automaattisella sammutuslaitteistolla, lukuun ottamatta 2–4-kerroksista asuinrakennusta, jonka kaikki kerrokset kuuluvat asunnoittain samaan asuinhuoneistoon ja jonka korkeus on enintään 14 m.

²⁾ Palo-osasto on jaettava majoitushuoneittain osiin.

³⁾ Avoimen autosuojaosaston pinta-ala voi olla 50 prosenttia suurempi.

⁴⁾ Enintään viisikerroksisessa avoimessa autosuojassa voidaan enimmäisalaa käyttää kerrosten pinta-aloina, vaikka eri kerrosten väliset ajotiet yhtyvät. Tämä edellyttää kuitenkin, että välipohjien luokka on vähintään REI 60.

⁵⁾ Palo-osaston pinta-alaa voi kasvattaa enintään 50 prosentilla, jos tila varustetaan hätäkeskukseen kytketyllä paloilmoinnilla ja tehokas sammutustyö voidaan aloittaa riittävän aikaisessa vaiheessa.

* Kun rakennus tai tila on varustettu tarkoitukseen sopivalla automaattisella sammutuslaitteistolla.

Kantavat teräsrakenteet mitoitetaan suojattuna tai suojaamattomana rakenneosina. Suojaus toteutetaan koteloimalla tai vaihtoehtoisesti pinnoittamalla teräsosa paloavastaan vaaditun ajan mukaan, tällöin kyseessä on joko P1- tai P2-luokan rakenteet. Rakenteet voidaan jättää suojaamattomaksi P3-luokan vaatimustasolla tai kun laskelmissa pystytään toteamaan maksimilämpötila kriittistä lämpötilaa pienemmäksi vaaditulla palonkestoajalla. Muita vaihtoehtoja suojaamattomiin ratkaisuihin on kantavan rungon si-
 joitus ulkoseinien ulkopuolelle, jolloin seinä toimii palokatkona. (Kaitila 2014, 137.)

Työn rakennukselle on määritetty paloluokaksi P3, joten sen kantavalle rungolle ei vaadita erillistä palonkestoa eikä niitä tarvitse suojata erikseen paloa vastaan. Rakenneteräs on kuitenkin alttiina korroosiolle eli syöpymiselle, mikä estetään pintakäsittelyllä, kuten tässä tapauksessa maalaamalla. Maalaus on keino vähentää korroosiota, mitä ei pystytä teräksillä kokonaan estämään. Pintakäsittely voidaan tehdä eri menetelmillä kohteen sijainnin ja käyttötarkoituksen asettamien vaatimusten perusteella. Eri maalausmenetelminä teräksille käytetään jauhe-, märkä-, kasto- ja vaelumaalausta. Maalauksella saadaan korroosionkestävyyden lisäksi haluttu esteettinen ominaisuus, joita ovat kiilto ja väri. Kyseisten ominaisuuksien pysyvyys on tärkeää niihin kohdistuvien ulkoisten rasitusten vaikutuksesta. Suurimpia ulkoisia rasituksia julkisivuille ja avonaisissa tiloissa oleville rakenteille ovat auringonsäteily ja ilman epäpuhtaudet. (Teräsrakenneyhdistys ry 2010.)

Työssä teräsosat maalattiin ruiskutuksella eli märkämaalauksena. Märkämaalauksessa käytettävät maalit valitaan standardin SFS-EN ISO 12944-5 mukaan. Itse maalausjärjestelmäksi valikoitui C3-ympäristöolosuhteiden perusteella. Kyseinen luokka soveltuu kohtalaiseihin olosuhteisiin, kuten kaupunki- ja teollisuusalueet ja korkealla kosteuspitoisuudella rasitettuihin tuotantolaitoksiin. Tarvittavat huolto- ja paikkamaalauksen aikavälit määritetään standardin SFS-EN ISO 12944-1 mukaisten kestävyysluokkien L, M ja H mukaan. Käyttöikäsuunnittelussa rakenteiden kunnossapito pyritään jaksottamaan niin, että rakenne säilyy käyttötarkoituksen mukaisessa kunnossa ja välttyään ylimääräisiltä korjaustoimenpiteiltä. Viitteellinen käyttöikä jaetaan viiteen eri luokkaan standardin SFS-EN 1990+A1+AC taulukon 3 mukaan. (Teräsrakenneyhdistys ry 2010.)

Taulukko 3. Rakenteiden viitteellinen suunniteltu käyttöikä (Teräsrakenneyhdistys ry).

Suunnitellun käyttöiän luokka	Viitteellinen suunniteltu käyttöikä, vuotta	Rakennusesimerkkejä
1	10	Tilapäisrakenteet ^(*)
2	10 - 25	Vaihdettavissa olevat rakenteen osat
3	15 - 30	Maatalous- ja vastaavat rakennukset
4	50	Talonrakennukset ja muut tavanomaiset rakenteet
5	100	Monumentaaliset rakennukset, sillat ja muut maa- ja vesirakennuskohteet
^(*) Sellaisia rakenteita tai niiden osia, jotka voidaan purkaa uudelleen käytettäväiksi, ei pidetä tilapäisinä.		

5 RAKENNESUUNNITTELU

5.1 Suunnittelun vaatimukset

Rakenteet tulee suunnitella kestäväksi sille tulevat kuormat ja rasitukset sekä vastamaan käyttötarkoituksen mukaisia vaatimuksia. Kohteessa suurimmat rakenteille kohdistuvat kuormat ovat omanpainon lisäksi lumi- ja tuulikuorma. Lisäksi kestävyyttä tulee olla riittävästi mahdollisten onnettomuus- ja palotilanteiden varalta. (RIL 201-1-2017, 25.)

5.2 Kuormat

Kehää rasittavien rakenteiden kuormat ovat laskettu Suomen Rakennusinsinöörien Liiton RIL 201-1-2017 Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat julkaisun mukaan. Kuormien ajallisen keston mukaan ne jaetaan eri kuormaluokkiin, joita ovat pysyvät, muuttuvat ja onnettomuuskuormat. (RIL 201-1-2017, 31.)

5.3 Pysyvät kuormat

Rakenteen pysyvinä kuormina käytetään kehän palkkien ja pilarien, sekä vesikaton profiilipellin ja sekundääräkannattimina toimivien puuorsien yhteenlaskettua painoa. Työssä on käytetty puuorsien laskentaan tilavuuspainon arvoa 5 kN/m^3 ja muille rakenneosille on käytetty valmistajien ja jälleenmyyjien ilmoittamia metri- ja neliöpainoja. (RIL 201-1-2017, 31, 81.)

5.4 Muuttuvat kuormat

Rakenteisiin kohdistuvia muuttuvia kuormia ovat normaalisti hyötykuorma sekä luonnon aiheuttamat lumi- ja tuulikuorma. Tässä kohteessa ei ollut vesikaton lisäksi runkoon kohdistuvia hyötykuormia. Vesikatolla ei oleteta vaikuttavan samaan aikaan lumi- ja tuulikuorman kanssa hyötykuormia. Lisäksi vesikaton hyötykuorman arvo olisi ollut lunta tai tuulta pienempi, joten hyötykuormien osuutta ei huomioitu laskennassa. (RIL 201-1-2017, 31, 64.)

5.4.1 Lumikuorma

Rakennuskohde sijaitsee Loimaalla, jossa lumikuorman ominaisarvo maassa on $s_k = 2,65 \text{ kN/m}^2$. Tuulensuojaisuus ja lämpötila katolla otetaan huomioon kertoimilla C_e ja C_t , joiden arvoina käytetään 1,0. Katon kaltevuuskulma huomioidaan muotokertoimella μ_i , mikä on tässä kohteessa 0,8, kun kyseessä on esteetön harjakatto kaltevuuskulman ollessa $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ välillä. Määritettyjen arvojen avulla saadaan kaavalla 1 katolla olevan lumikuorman arvoksi $2,12 \text{ kN/m}^2$. (RIL 201-1-2017, 98, 100-102.)

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k$$

Kaava 1. Lumikuorma katolla.

5.4.2 Tuulikuorma

Rakennukselle tulee määrittää maastoluokka alueen sijainnin, kasvillisuuden ja viereisten rakennusten perusteella. Tässä tapauksessa maastoluokaksi valittiin II, kun rakennuksen etupuolella on peltoa ja toisella puolen metsää. Rakennuksen korkeutena on käytetty harjan korkeinta arvoa 8,3 m. Tuulikuorma on laskettu rakennuksen pitkälle ja lyhyelle sivulle käyttämällä voimakerronmenetelmää. Pitkälle sivulle tuulikuorman arvoksi saadaan $q_{w.k1} = 0,724 \text{ kN/m}^2$ ja lyhyelle sivulle $q_{w.k2} = 0,524 \text{ kN/m}^2$ (liite 3). Puuskanopeuspaineen ominaisarvo on interpoloitu taulukon 4 arvojen mukaan. (RIL 201-1-2017, 131, 137, 140-142.)

Taulukko 4. Maastoluokkien mukainen puuskanopeuspaineen ominaisarvo (RIL 201-1-2017, 137).

z (m)	Maastoluokka				
	0	I	II	III	IV
0	0,66	0,42	0,39	0,35	0,32
1	0,66	0,42	0,39	0,35	0,32
2	0,78	0,52	0,39	0,35	0,32
5	0,96	0,65	0,53	0,35	0,32
8	1,05	0,73	0,61	0,43	0,32
10	1,09	0,76	0,65	0,47	0,32
15	1,18	0,83	0,72	0,55	0,40
20	1,24	0,88	0,77	0,60	0,45
25	1,29	0,92	0,82	0,65	0,50
30	1,33	0,95	0,85	0,68	0,54
35	1,37	0,98	0,88	0,72	0,57
40	1,40	1,01	0,91	0,74	0,60

5.5 Rakenteiden luokitus ja kuormien yhdistelyt

Rakennus luokitellaan ihmishenkien menetysten sekä taloudellisten, sosiaalisten ja ympäristövahinkojen perusteella seuraamusluokkaan CC2. Tällöin taulukon 5 mukaan luotettavuusluokaksi tulee RC2 ja kuormakertoimeksi $K_{FI} = 1,0$. Valittu luokka vaikuttaa tiettyjä kuormayhdistelmiä laskettaessa kuormien suuruuteen. (RIL 201-1-2017, 26.)

Taulukko 5. Rakennusten seuraamusluokat (RIL 201-1-2017, 26).

Seuraamusluokan (CC) kuvaus	Rakennuksia sekä rakenteita koskevia esimerkkejä	Luotettavuusluokka/ kuormakerroin K_{FI}
CC3 Suuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai hyvin suurten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Rakennuksen kantava runko ¹⁾ jäykistävine rakennusosineen sellaisissa rakennuksissa, joissa usein on suuri joukko ihmisiä, kuten - yli 8-kerroksiset ²⁾ asuin-, konttori- ja liikerakennukset - konserttisalit, teatterit, urheilu- ja näytelyhallit, katsomot - raskaasti kuormitetut tai suuria jännevälejä sisältävät rakennukset. Erikoisrakenteet, kuten esim. korkeat tornit. Luiskat sekä penkereet ja muut rakenteet, jotka sijaitsevat siirtymien haittavaikutuksille herkissä ympäristöissä erityisesti hienorakeisten maalajien alueilla.	RC3 $K_{FI} = 1,1$
CC2 Keskisuuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai merkittävien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia.	Rakennukset ja rakenteet, jotka eivät kuulu luokkiin CC3 tai CC1.	RC2 $K_{FI} = 1,0$
CC1 Vähäiset seuraamukset ihmishenkien menetysten tai pienten tai merkityksettömien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	1- ja 2-kerroksiset ²⁾ rakennukset, joissa vain tilapäisesti oleskelee ihmisiä ³⁾ , kuten esim. pienehköt varastot ja maatalouden tuotantorakennukset, joiden pinta-ala on enintään 300 m ² tai suurin jänneväli enintään 6 metriä. Rakenteet, joiden vaurioitumisesta ei aiheudu merkittävää vaaraa, kuten - matalalla olevat alapohjat, ilman kellaritiloja - ryömintätilaiset vesikatot, kun yläpohja on varsinainen kantava rakenne - sellaiset ulko- ja väliseinät, ikkunat, ovet ja vastaavat, joihin pääasiassa kohdistuu ilman paine-eroista aiheutuva sivuttaiskuormitus ja jotka eivät toimi kantavan tai jäykistävän rungon osana.	RC1 $K_{FI} = 0,9$

Mitoituksessa tarkastellaan eri tilanteissa vallitsevia toimintaolosuhteita, käytettyjä mitoitustilanteita ovat normaalit käyttötilanteet, valmistuksen ja korjauksen aikainen tilapäinen tilanne ja onnettomuustilanteet. (RIL 201-1-2017, 29.)

Kuormassa ei vaikuta samaan aikaan kaikki kuormat täydellä painollaan vaan eri kuormia kerrotaan omilla yhdistelykertoimilla ψ_0 , ψ_1 tai ψ_2 taulukon 6 mukaan. Se, mitä yhdistelykerrointa käytetään, riippuu käytettävästä kuormayhdistelmästä. (RIL 201-1-2017, 38.)

Taulukko 6. Kuormien yhdistelykertoimet (RIL 201-1-2017, 38).

Kuorma	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (SFS-EN 1991-1-1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6 ^{**)}
Luokka G: liikennöitävät tilat, 30 kN < ajoneuvon paino ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3 ^{**)}
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Lumikuorma (katso SFS-EN 1991-1-3) ^{*)} , kun			
$s_k < 2,75$ kN/m ²	0,7	0,4	0,2
$s_k \geq 2,75$ kN/m ²	0,7	0,5	0,2
Jääkuorma ^{***)}	0,7	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat (SFS-EN 1991-1-4)	-0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa) (SFS-EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
Pakkomuodonmuutokset	1,0	1,0	1,0
Tukien painumat	1,0	1,0	1,0

^{*)} Ulkotasoilla ja parvekkeilla $\psi_0 = 0$ luokkien A, B, F ja G yhteydessä.

Huom: Mikäli rakennuksessa on eri kuormaluokkia, joita ei voi erotella omiin selviin ryhmiinsä, käytetään ψ -arvoja, jotka antavat epäedullisimman vaikutuksen.

^{**) Ajokäytävillä $\psi_2 = 0$.}

^{***)} Koskee huurtumisesta, jäätävästä sateesta ja räntäsateesta aiheutuvia jääkuormia.

Rakennus mitoitetaan kuormayhdistelyjen avulla murtorajatilassa ja käyttörajatilassa. Murtorajatilassa rakennus mitoitetaan vastaanottamaan rasitukset tasapainon menetystä ja vaurioitumista vastaan. Käyttörajamitoitus suoritetaan rakenteiden taipumien ja siirtymien selvittämiseksi, koska nämä vaikuttavat rakennuksen normaalikäytön toimin-

taan. Määräväksi kuormayhdistelmäksi laskuissa tulee murtorajatilan kuorma, jossa kehän omanpainon ja täyden lumikuorman lisäksi sivulta puhaltava tuuli tulee pienennettynä. (RIL 201-1-2017, 29-30.)

5.6 Materiaaliominaisuudet

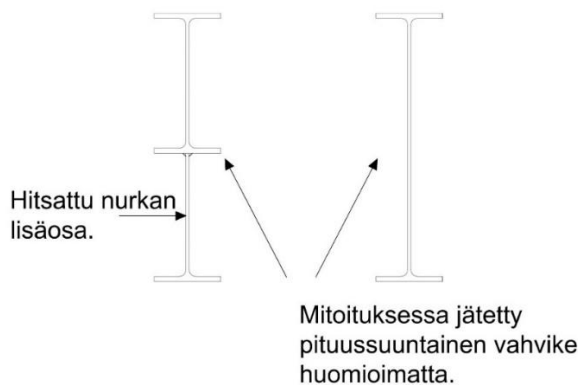
Rungossa käytetty rakenneteräs on lujuudeltaan S355, jolloin teräksen myötörajana on $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$. Rakenneteräksen kimmokerroin $E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$ ja liukukerroin $G = 81\,000 \text{ N/mm}^2$. Laskelmissa käytettyjen osavarmuuslukujen arvot ovat $\gamma_{M0} = 1,0$, $\gamma_{M1} = 1,0$ ja $\gamma_{M2} = 1,25$. Kaavassa 2 on esitetty käytetyn teräksen myötövenymän määrittäminen. (SFS-EN 1993-1-1, 26, 28, 48.)

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_y}} = 0,814$$

Kaava 2. Teräksen myötövenymä.

5.7 Rakenneosien mitoitus

Rakenneosat ovat koottu käyttämällä kuumavalsattua S355J2-luokan I-profiilia, johon nurkkien vahvikkeeksi on hitsattu pituussuuntaan leikattu profiilin osa. Tällöin todellinen poikkileikkaus on kuvassa 9 havainnollistettu vasemman I-profiilin mukainen ja laskelmissa käytetty I-profiili vastaa oikean puolen poikkileikkausta, tämä lisää varmuutta laskelmiin, kun todellisen poikkileikkauksen pinta-ala on laskelmissa käytettyä suurempi. Poikkileikkaukset on mitoitettu käyttämällä hitsattujen profiilien laskentatapaa.



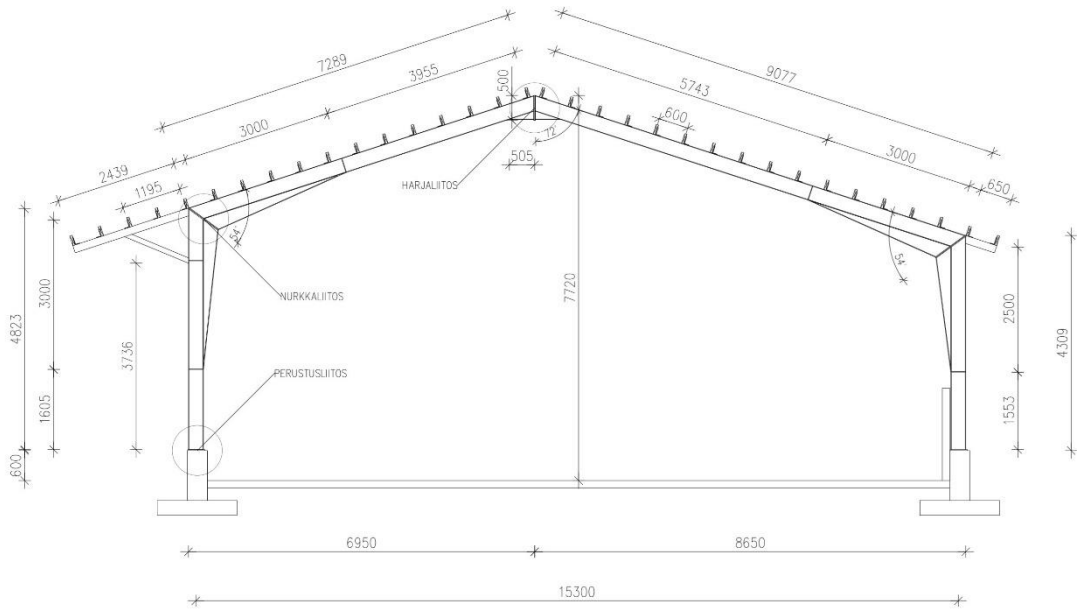
Kuva 9. Todellinen ja mitoituksessa käytetty I-profiilin poikkileikkaus.

Kehän rasituksien selvittämiseen käytettiin Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2019 – ohjelmaa, johon syötettiin käsin lasketut kuorma-arvot. Ohjelmaan mallinnettiin aluksi 3D-runko pihatosta, minkä jälkeen sauvoille määritettiin oikeat profiilit ja materiaalit. Liitokset määritettiin perustuksissa nivelellisiksi ja kehässä jäykiksi. Ruoteiden lisäksi pituussuuntainen jäykistys tehdään runkoon hitsaamalla liitetyllä kahdella jäykistyskentällä, jotka ovat toteutettu ristiin keskenään menevillä rakenneputkilla.

Ohjelmasta saatiin rakenneosille ja liitoksille rasitukset, minkä avulla käsin suoritettiin kunkin osan mitoitukset. Rasitukset on ilmoitettu kunkin rakenneosan laskennan yhteydessä. Tämän lisäksi liitokset laskettiin vertailun vuoksi sekä käsin laskuna, että kyseisellä FEM-ohjelmalla. FEM-ohjelman antamiin laskelmiin ei työssä perehdytä niiden laajuuden vuoksi. Käsin laskenta on suoritettu käyttämällä MathCad-laskentaohjelmistoa. Käsin lasketut tulokset ovat työn liitteinä.

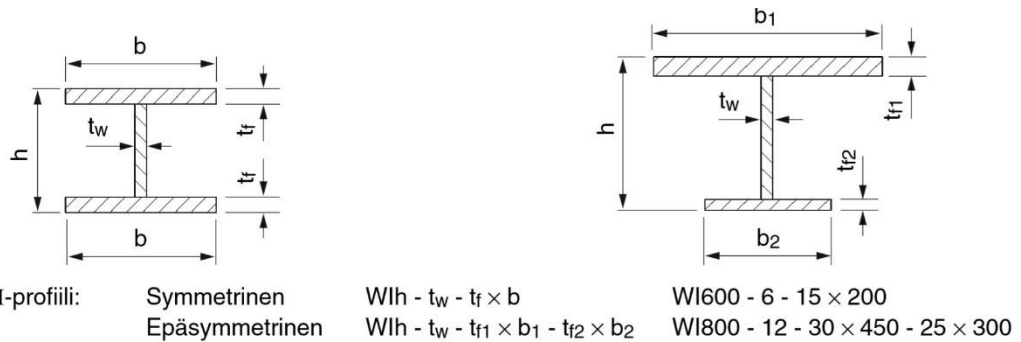
5.7.1 Palkin laskenta

Kehän pääkannattajana toimivan palkin kestävyys on tarkasteltu kahdesta eri kohdasta poikkileikkauksen korkeuden muuttuessa. Suurin rasitus kohdistuu taivutusmomentin kautta kehän nurkkaan ja toinen tarkasteltava alue on 2,3 metrin päästä harjalta profiilin korkeuden ollessa pienimmillään 300 millimetriä. Palkin yläpintaan 600 millimetrin välein kiinnitettävät katto-orret toimivat jäykisteristikoiden etäisyyden mukaan eli 3,6 metrin jaolla kiepahdustukina. Seuraavaksi käydään läpi pääkohdat palkin mitoitukseen liittyen kehän nurkassa, minkä jälkeen on listattu mitoittavan poikkileikkauksen tulokset. Kuvassa 10 näkyy leikkauspiirros kehän rakenneosista ja mitoista.



Kuva 10. Kehän leikkauspiirros.

Poikkileikkaus työn palkilla on kuvan 11 merkintätavan mukaan WI574-7.1-10.7x150, missä W tarkoittaa hitsattua ja I on profiilin tunnus. Esimmäinen numerotunnus on palkin korkeus, seuraavat ovat uuman ja laipan paksuudet ja viimeisenä ilmoitetaan laippojen leveys. (Ongelin ym. 2010, 93.)



Kuva 11. Hitsatun I-profiilin merkintätapa (Ongelin ym. 2010, 12).

Mitoituksen alussa selvitetään rakenneosan taso-osien poikkileikkausluokat. Laipassa käytetään puristetun taso-osan saraketta taulukon 7 mukaan ja uumassa taivutetun taso-osan saraketta taulukosta 8. Käytetty laipan tehollisen leveyden arvo c määräytyy kaavan 3 mukaan ja uuman tehollisen korkeuden arvo b_w kaavan 4 mukaan. (SFS-EN 1993-1-1, 45-46.)

$$c = \frac{b_f - t_w}{2} - \sqrt{2} \cdot a,$$

Kaava 3. Laipan tehollinen leveys.

jossa b_f on laipan levys, t_w on uuman paksuus ja a on kaulahitsin mitta.

$$b_w = h - 2 \cdot (t_f + \sqrt{2} \cdot a),$$

Kaava 4. Uuman tehollinen korkeus.

jossa h on palkin korkeus, t_f on laipan paksuus ja a on kaulahitsin mitta.

Taulukko 7. Puristettujen taso-osien leveys-paksuussuhteet osa 1 (SFS-EN 1993-1-1, 45).

Kahdelta reunalta tuetut puristetut taso-osat						
					Taivutus ko. akselin suhteen	
					Taivutus ko. akselin suhteen	
Poikkileikkauksiluokka	Taivutetut taso-osat	Puristetut taso-osat	Taivutetut ja puristetut taso-osat			
Taso-osan jännitysjakautuma (puristus positiivinen)						
1	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$	$kun \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ $kun \alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$			
2	$c/t \leq 83\epsilon$	$c/t \leq 38\epsilon$	$kun \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ $kun \alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$			
Taso-osan jännitysjakautuma (puristus positiivinen)						
3	$c/t \leq 124\epsilon$ ¹⁾	$c/t \leq 42\epsilon$ ²⁾	$kun \psi > -1: c/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ ³⁾ $kun \psi \leq -1^{3)}: c/t \leq 62\epsilon(1 - \psi)\sqrt{-\psi}$			
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

*) Arvoa $\psi \leq -1$ käytetään, kun joko puristusjännitys $\sigma < f_y$ tai vedetyn puolen venymä $\epsilon_y > f_y/E$

¹⁾ Suomentajan huomautus:

Standardin EN 1993-1-5 mukaan raja-arvoksi saadaan: $c/t \leq 121,43\epsilon$

²⁾ Suomentajan huomautus:

Standardin EN 1993-1-5 mukaan raja-arvoksi saadaan: $c/t \leq 38,25\epsilon$

³⁾ Suomentajan huomautus:

Standardin EN 1995-1-5 mukaan raja-arvo riippuu lommahduskertoimesta k_σ ja jännityssuhteesta ψ .

Taulukko 8. Puristettujen taso-osien leveys-paksuussuhteet osa 2 (SFS-EN 1993-1-1, 46).

Ulokkeelliset laipat						
		Valssatut profiilit		Hitsatut profiilit		
Poikkileikkauksiluokka	Puristetut taso-osat	Puristetut ja taivutetut taso-osat				
		Vapaa reuna on puristettu		Vapaa reuna on vedetty		
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)						
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)						
3	$c/t \leq 14\epsilon$ ⁴⁾	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$ ⁵⁾ k_σ ks. EN 1993-1-5				
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

⁴⁾ Suomentajan huomautus:

Standardin EN 1993-1-5 mukaan raja-arvoksi saadaan: $c/t \leq 13,96\epsilon$

⁵⁾ Suomentajan huomautus:

Standardin EN 1993-1-5 mukaan raja-arvoksi saadaan: $c/t \leq 21,29\epsilon\sqrt{k_\sigma}$

Ensimmäinen kestävyden kannalta tarkasteltava seikka on poikkileikkauksen kestävyys taivutusmomenttia vastaan. Taivutusmomentin tulee olla käyttöasteeltaan jokaisessa luokassa kaavan 5 mukainen. (SFS-EN 1993-1-1, 53.)

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0,$$

Kaava 5. Taivutusmomentin käyttöaste.

jossa M_{Ed} on taivutusmomentin mitoitusarvo ja $M_{c,Rd}$ on taivutuskestävyyden mitoitusarvo.

Poikkileikkauksiluokan ollessa PL3 lasketaan kimmoteorian mukainen taivutusvastus W_{el} kaavalla 6 käyttäen aikaisemmin määriteltyjä poikkileikkauksiarvoja. (Kaitila 2014, 61.)

$$W_{el.y} = \frac{b_f \cdot h^2}{6} - \frac{(b_f - t_w) \cdot \frac{(h - 2 \cdot t_f)^3}{h}}{6}$$

Kaava 6. Kimmoteorian mukainen taivutusvastus.

Näin ollen taivutuskestävyys saadaan ratkaistua kyseiselle profiilille kaavasta 7. (SFS-EN 1993-1-1, 53.)

$$M_{c.Rd} = \frac{W_{el.y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}},$$

Kaava 7. Kimmoteorian mukainen taivutuskestävyys.

jossa f_y on teräksen myötölujuus ja γ_{M0} on käytetty osavarmuusluku.

Palkin tulee kestää sille tuleva leikkausvoima, mikä selvitetään tarkastamalla leikkauskestävyyden käyttöaste kavaan 8 avulla. (SFS-EN 1993-1-1, 54.)

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c.Rd}} \leq 1.0$$

Kaava 8. Leikkauskestävyyden käyttöaste.

Käyttöasteen laskentaan selvitetään leikkauspinta-ala A_v , joka määritetään kaavalla 9 ja poikkileikkauksen plastinen taivutuskestävyys $V_{pl.Rd}$ kaavan 10 avulla. (SFS-EN 1993-1-1, 54.)

$$A_v = h_w \cdot t_w,$$

Kaava 9. Uuman pinta-ala.

jossa h_w on laippojen välinen etäisyys ja t_w on uuman paksuus.

$$V_{pl.Rd} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}}$$

Kaava 10. Plastinen taivutuskestävyys.

Kuorman kasvaessa lommahtanut uuma voi toimia ylikriittisellä alueella ja tätä vasten tulee tarkistaa leikkauslommahduksen vaikutus leikkauskestävyyteen kaavassa 11 esitetyn ehdon mukaan. (Kaitila 2014, 67.)

$$\frac{h_w}{t_w} > \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon,$$

Kaava 11. Ehto leikkauslommahdukselle.

jossa arvo $\eta = 1.2$, kun kyseessä on korkeintaan S460-luja teräs.

Leikkauslommahduskestävyys lasketaan uuman ja laippojen osuuksien summana kaavalla 12. Laskelmassa käytettyn piennennystekijän χ_w valintaan vaikuttavat taulukon 9 mukaan, onko palkissa pääty- ja pituusjäykisteitä, sekä niiden sijainti. (Kaitila 2014, 67.)

$$V_{b.Rd} = V_{bw.Rd} + V_{bf.Rd} \leq \frac{\eta \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\gamma_{M1} \cdot \sqrt{3}},$$

Kaava 12. Leikkauslommahduskestävyys.

jossa $V_{bw.Rd}$ on uuman osuus ja $V_{bf.Rd}$ on laippojen osuus.

Taulukko 9. Piennennystekijä (Kaitila 2014, 67).

Vain tukijäykistys $\bar{\lambda}_w = \frac{h_w / t_w}{86,4\varepsilon}$ Välein a_s jäykistetty uuma $\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4t_w\varepsilon\sqrt{k_\tau}}$	χ_w	
	Jäykkä pääty	Ei-jäykkä pääty
$\bar{\lambda}_w < 0,83 / \eta$	η	η
$0,83 / \eta \leq \bar{\lambda}_w < 1,08$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,08$	$1,37 / (0,7 + \bar{\lambda}_w)$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$

k_τ on pienin leikkauslommahduksen kriittisen jännityksen τ_{cr} kerroin tarkasteltavissa uumakentissä, kun jäykisteiden väli a_s on muuttuva. $\tau_{cr} = k_\tau \sigma_E \approx k_\tau \times 190000 \left(\frac{t_w}{h_w} \right)^2$

$k_\tau = 5,34 + 4(h_w / a_s)^2$, kun $a_s/h_w \geq 1$.

$k_\tau = 4 + 5,34(h_w / a_s)^2$, kun $a_s/h_w < 1$.

Lisäksi kaavan 13 ehdon $\eta_3 \leq 0,5$ täyttyessä ei tarvitse tarkastella leikkausvoiman, taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutusta. Kuitenkin pitää varmistua siitä, että normaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutus ei ylitä kaavan 14 rasituskomponenttien yhteisvaikutusyhtälön mukaista käyttöastetta. (Kaitila 2014, 69, 52.)

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw.Rd}}$$

Kaava 13. Ehto leikkausvoiman, taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutukselle.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y.Ed}}{M_{y.Rd}} + \frac{M_{z.Ed}}{M_{z.Rd}} \leq 1.0$$

Kaava 14. Yhteisvaikutusyhtälö normaalivoimalle ja taivutusmomentille.

Kiepahdus pyritään mahdollisuuksien mukaan estämään rakennejärjestelyillä, jolloin sen tarkastelua ei tarvitse suorittaa. Palkin kiepahduskestävyyteen vaikuttavat profiilin muoto ja koko, kuten onko kyseessä avoin I-profiili vai suljettu koteloprofiili. Kotelo ja putkiprofiileilla on paljon suurempi kyky kestää kiepahdusta, joten niillä tarkastelua ei yleisesti suoriteta. Puristetulta laipaltaan tuetun palkin tulee täyttää kiepahduskestävyydeltään kaavan 15 käyttöasteen ehto. (SFS-EN 1993-1-1, 65.)

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1.0,$$

Kaava 15. Kiepahduskestävyyden käyttöaste.

jossa M_{Ed} on taivutusmomentin mitoitusarvo ja $M_{b,Rd}$ on kiepahduskestävyyden mitoitusarvo.

Kiepahduskestävyyttä laskettaessa varmistetaan muunnetun hoikkuuden λ_{LT} avulla tulee kiepahdus tarkastettavaksi kaavassa 16 esitetyn ehdon mukaan. Kun arvo ylittää annetun arvon 0,2 tulee kiepahdustarkastelu suorittaa.

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} > 0,2,$$

Kaava 16. Muunnettu hoikkuus.

jossa M_{cr} on kimmoteorian mukainen kriittinen momentti.

Laskelmissa tarvittavat kiepahduskäyrän mukaiset epätarkkuustekijät löytyvät taulukosta 10 ja kiepahduskäyrän valinta tapahtuu taulukon 11 mukaan. Epätarkkuustekijöillä pyritään ottamaan huomioon rakenteita mahdollisesti heikentäviä vaikutuksia, joita ei laskelmissa muuten tulisi huomioida, kuten mittapoikkeamat ja vinoudet. (SFS-EN 1993-1-1, 66.)

Taulukko 10. Kiepahduskäyrien epätarkkuustekijät (SFS-EN 1993-1-1, 66).

Kiepahduskäyrä	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Taulukko 11. Kiepahduskäyrän valinta (SFS-EN 1993-1-1, 66).

Poikkileikkaus	Rajat	Kiepahduskäyrä
Valssatut I-profiilit	$h/b \leq 2$	a
	$h/b > 2$	b
Hitsatut I-profiilit	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d
Muut profiilit	-	d

Taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutus $M_{b,Rd}$ tarkastetaan kaavojen 17 ja 18 mukaan, kun kyseessä on poikkileikkausluokat 1-3. Kun kuormien aiheuttama taivutusmomentti vaikuttaa vain vahvemman akselin suhteen supistuu kaavoista loppuosa pois, kun $M_{z,Ed}$ on nolla. Alla olevat kaavat esitetty vain supistetussa muodossaan. (Ongelin ym. 2010, 196.)

$$M_{b,Rd,y} = \frac{N_{Ed}}{\chi_{min} \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{W_{el,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0$$

Kaava 17. Yhteisvaikutus y-akselin suhteen.

$$M_{b,Rd,z} = \frac{N_{Ed}}{\chi_{min} \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{W_{el,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0$$

Kaava 18. Yhteisvaikutus z-akselin suhteen.

Kaavoissa $\chi_{min} = \min[\chi_y, \chi_z]$ ja yhteisvaikutustarkastelussa käytettyjen kaavojen arvot N_{Rk} , $M_{i,Rk}$ ja $\Delta M_{i,Ed}$ määntyvät eri poikkileikkausluokkien mukaan taulukon 12 mukaan. Lisäksi yhteisvaikutustekijät k_{ij} valitaan taulukoiden 13 ja 14 mukaan sen perusteella, ovatko rakenneosat alttiita vääntömuodonmuutoksille. Yhteisvaikutustekijöiden kaavoissa tarvittavan ekvivalentin momentin C_{mi} kertoimet ovat esitetty taulukossa 15. Valinta perustuu rakenneosan tukien välisen momenttipinnan muodon mukaan.

Taulukko 12. Yhteisvaikutustarkastelun suuret (Ongelin ym. 2010, 196).

Suure	PL1	PL2	PL3	PL4
N_{Rk}	$f_y A$	$f_y A$	$f_y A$	$f_y A_{eff}$
$M_{y,Rk}$	$f_y W_{pl,y}$	$f_y W_{pl,y}$	$f_y W_{el,y}$	$f_y W_{eff,y}$
$M_{z,Rk}$	$f_y W_{pl,z}$	$f_y W_{pl,z}$	$f_y W_{el,z}$	$f_y W_{eff,z}$
$\Delta M_{y,Ed}$	0	0	0	$e_{N,y} N_{Ed}$
$\Delta M_{z,Ed}$	0	0	0	$e_{N,z} N_{Ed}$

Taulukko 13. Yhteisvaikutustekijät sauvoille, joissa ei ole vääntömuodonmuutosta (Ongelin ym. 2010, 198).

Yhteisvaikutustekijät	Poikkileikkaustyyppi	Suunnitteluoletukset	
		Kimoteorian mukaiset poikkileikkausominaisuudet, poikkileikkausluokat 3 ja 4	Plastisuusteorian mukaiset poikkileikkausominaisuudet, poikkileikkausluokat 1 ja 2
k_{yy}	I-profiilit ja suorakaideputket	$C_{my} \left[1 + 0,6 \bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ $\leq C_{my} \left[1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$	$C_{my} \left[1 + (0,2 - \bar{\lambda}_y) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ $\leq C_{my} \left[1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$
k_{yz}	I-profiilit ja suorakaideputket	k_{zz}	$0,6 k_{zz}$
k_{zy}	I-profiilit ja suorakaideputket	$0,8 k_{yy}$	$0,6 k_{yy}$
k_{zz}	I-profiilit	$C_{mz} \left[1 + 0,6 \bar{\lambda}_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ $\leq C_{mz} \left[1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$	$C_{mz} \left[1 + (2\bar{\lambda}_z - 0,6) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ $\leq C_{mz} \left[1 + 1,4 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$
	Suorakaideputket		$C_{mz} \left[1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ $\leq C_{mz} \left[1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$


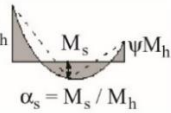
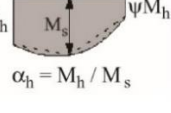
- I-poikkileikkauksille ja suorakaiteen muotoisille rakenneputkille, joihin kohdistuu aksiaalinen puristus ja taivutus $M_{y,Ed}$ yhden akselin suhteen, tekijälle k_{zy} voidaan valita arvo $k_{zy} = 0$.
- Tekijöille k_{ij} taulukossa esitetyt raja-arvot eivät tarkoita voimassaoloehtoa, vaan laskelmissa ao. tekijälle käytettävää raja-arvoa.

Taulukko 14. Yhteisvaikutustekijät sauvoille, kun vääntömuodonmuutos mahdollinen (Ongelin ym. 2010, 199).

Yhteisvaikutustekijät	Suunnitteluoletukset	
	Kimoteorian mukaiset poikkileikkausominaisuudet, poikkileikkausluokat 3 ja 4	Plastisuusteorian mukaiset poikkileikkausominaisuudet, poikkileikkausluokat 1 ja 2
k_{yy}	k_{yy} taulukon 2.22 mukaisesti	k_{yy} taulukon 2.22 mukaisesti
k_{yz}	k_{yz} taulukon 2.22 mukaisesti	k_{yz} taulukon 2.22 mukaisesti
k_{zy}	$\left[I - \frac{0,05\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{MI}} \right]$ $\geq \left[I - \frac{0,05}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{MI}} \right]$	$\left[I - \frac{0,1\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{MI}} \right]$ $\geq \left[I - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{MI}} \right]$ <p>kun $\bar{\lambda}_z < 0,4$:</p> $k_{zy} = 0,6 + \bar{\lambda}_z$ $\leq \left[I - \frac{0,1\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{MI}} \right]$
k_{zz}	k_{zz} taulukon 2.22 mukaisesti	k_{zz} taulukon 2.22 mukaisesti

Tekijöille k_{ij} taulukossa esitetyt raja-arvot eivät tarkoita voimassaoloehtoa, vaan laskelmissa ao. tekijälle käytettävää raja-arvoa.

Taulukko 15. Ekvivalentin momentin kertoimet (Ongelin ym. 2010, 200).

Momenttipinta	Alue	C_{my} ja C_{mz} ja C_{mLT}	
		Tasan jakautunut kuormitus	Pistemäinen kuormitus
	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$	
 $\alpha_s = M_s / M_h$	$0 \leq \alpha_s \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$
	$-1 \leq \alpha_s < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,1 - 0,8\alpha_s \geq 0,4$
		$-1 \leq \psi < 0$	$0,1(1-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$
 $\alpha_h = M_h / M_s$	$0 \leq \alpha_h \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$
	$-1 \leq \alpha_h < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
		$-1 \leq \psi < 0$	$0,95 + 0,05\alpha_h(1+2\psi)$

Sivusiirtävien kehien sauvoille ekvivalentin momentin kertoimiksi valitaan arvot $C_{my} = 0,9$ tai $C_{mz} = 0,9$

Kertoimet C_{my} , C_{mz} ja C_{mLT} valitaan kyseeseen tulevien tukipisteiden välisen taivutusmomenttipinnan mukaan seuraavasti:

Momenttikerroin	Akseli, jonka suhteen taivutus tapahtuu	Taso, jossa tukipisteet ovat sivusiirtymättömiä
C_{my}	y-y	z-z
C_{mz}	z-z	y-y
C_{mLT}	y-y	y-y

a) Lauseke on korjattu lähteen [5] mukaisesti.

Tekijöille C_{mi} taulukossa esitetyt raja-arvot eivät tarkoita voimassaoloehtoa, vaan laskelmissa ao. tekijälle käytettävää raja-arvoa.

5.7.2 Palkin laskennan tulokset

Palkkiin kohdistuu $M_{Ed} = 342 \text{ kNm}$ suuruinen taivutusmomentti, lisäksi leikkausvoima $V_{Ed} = 124 \text{ kN}$ ja normaalivoima $N_{Ed} = 96 \text{ kN}$ rasittavat palkkia. Kehän palkit ovat mitoitettu kuormitusyhdistelmälle KY7, missä rakenteen omapaino on kerrottu 1,15 varmuudella ja määräävä muuttuvakuorma lumi kerrotaan 1,5 varmuudella, sekä tuulikuorma 0,9 varmuuskertoimella. Laipoissa toteutui poikkileikkausluokka 1, mutta uumaan kohdistuu taivutusta ja puristusta jolloin poikkileikkausluokaksi saadaan luokka 3. Koko profiiliin poikkileikkausluokaksi määräytyi heikoimman luokan mukaan 3.

Palkin taivutusvastukestävyyden käyttöasteeksi kehän nurkaan saatiin 0,78. Suurin ja mitoitettava käyttöasteen arvo 0,89 tulee 2,3 metrin päähän harjalta, kun palkki on profiililtaan IPE 300. Leikkauskestävyydelle jää reilusti reserviä käyttöasteen ollessa 0,154 ja leikkauslommahdukselle tulee käyttöasteeksi 0,206. Palkissa ei todettu olevan leikkausvoiman, normaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutusta ja lisäksi yhteisvaikutusyhtälö toteutuu. Palkissa käytetään kiepahduspituutena L_{cr} 3,6 metriä, jolloin kestävyyden käyttöasteeksi tulee 0,89. Momentin ja normaalivoiman aiheuttaman rasituksen käyttöasteeksi saatiin 0,938. Palkin taipuman arvo on 0,517. Taipuma arvo tarkoittaa noin 10 mm lopputaipumaa, kun sallittu taipuma on 19 mm kyseisellä matkalla.

5.7.3 Pilari laskenta

Kehän pilareina ovat muuttuvat I-profiilit kuten palkeissakin, sauvan alapään ollessa WI300-7.1-10.7x150 ja yläpään WI574-7.1-10.7x150. Pilarin kestävyys on tarkasteltu kolmessa eri kohdasta poikkileikkauksen korkeuden muuttuessa yläpäässä ja vahvikkeen loputtua, sekä räystästä tukevan putkipalkin tuen kohdalla. Suurin rasitus kohdistuu myös pilarilla taivutusmomentin kautta kehän nurkkaan. Pilarissa on käytetty nurjahduspituutena koko sauvan pituutta. Seuraavaksi käydään pääkohdat läpi pilarin mitoitusseen käyttäen esimerkkinä pilarin yläpään laskelmaa. Lopussa on listattu rakenneosalle saatuja tuloksia palkin tulosten tapaan.

Pilarin kuten kaikkien muidenkin teräsrakenteina käytettävien sauvojen mitoitus alkaa poikkileikkausluokan määrittämisellä. Poikkileikkauksen määrittäminen on esitetty palkin mitoitusosiossa, joten pilarin mitoitus on aloitettu suoraan kestävyyksien tarkastelusta.

Pilarin kestävyden mitoitus aloitetaan tarkastamalla puristusvoiman kestävyys kaavan 19 mukaan. Kaavassa puristuskestävyyden mitoitussarvon $N_{c,Rd}$ laskentaan vaikuttaa, kuuluuko profiili poikkileikkausluokkaan PL1-3 vai PL4. Poikkileikkausluokassa PL3-laskenta tehdään kaavan 20 mukaan, jos kyseessä PL4 tulee käyttää poikkileikkauksen tehollista pinta-alaa A_{eff} koko pinta-alan A sijaan. (SFS-EN 1993-1-1, 53.)

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0,$$

Kaava 19. Puristuskestävyyden käyttöaste.

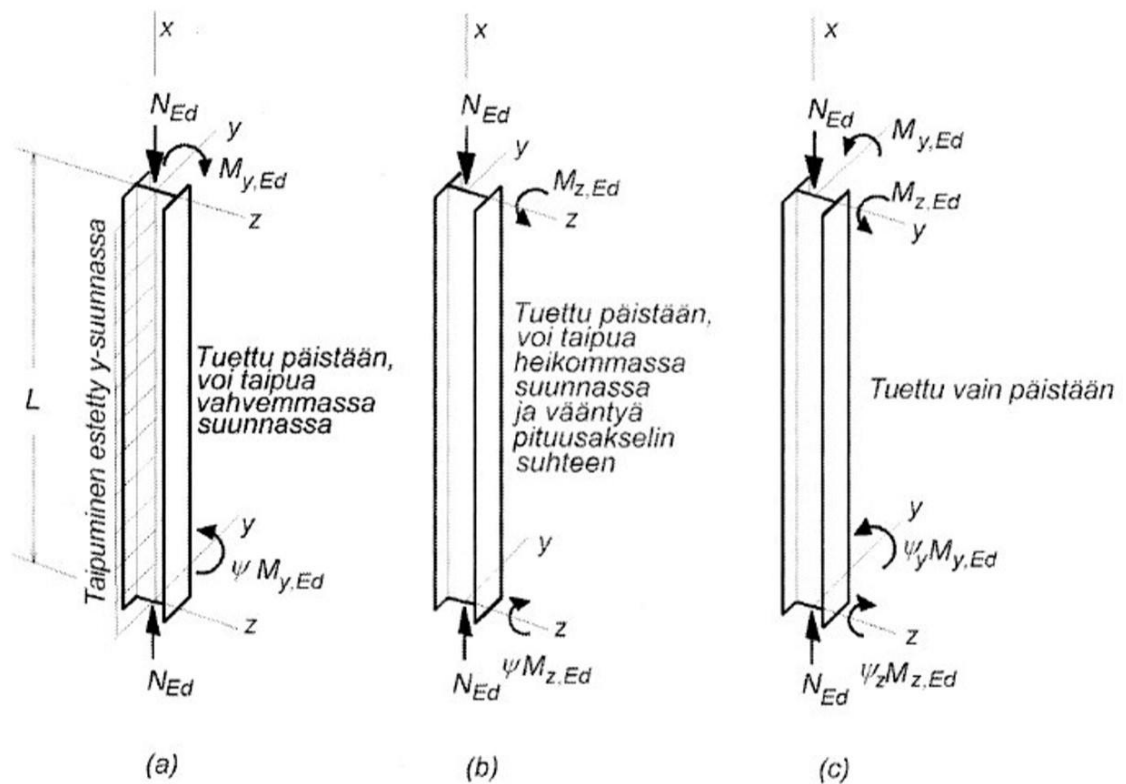
jossa N_{Ed} on puristusvoiman mitoitussarvo.

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

Kaava 20. Puristuskestävyyden mitoitussarvo.

Seuraavaksi laskettava taivutusvoiman kestävyys on käyty läpi palkin mitoitussosiassa ja koska poikkileikkausluokka on sama kuin palkilla pysyy pilarille suoritettava taivutuskestävyyden tarkastelu samanlaisena. Joten taivutuskestävyyden laskenta jätetään tässä kohdassa käymättä uudestaan läpi. Sama koskee pilariin kohdistuvaa leikkausvoiman laskentaa.

Pilariin kohdistuvat rasitukset ja pilarin päiden tuenta vaikuttaa sauvana toimivan pilarin kykyyn säilyttää stabiilius. Pilari voidaan tukea kuten kuvassa 12 on esitetty tyypillisesti ulkoseinillä kohdan a mukaan, jolloin kyseessä on taivutusnurjahdus. Vaihtoehdossa b olevassa pilarissa tapahtuu taivutusvääntönurjahdus heikommassa suunnassa, kun pilari taipuu sen suunnassa ja vääntyy vahvempaan suuntaan. (Kaitila 2014, 74.)



Kuva 12. Pilarin eri tuentatapaukset ja nurjahdusmuodot (Kaitila 2014, 74).

Työn pilariin kohdistuva taivutusnurjahduksen mitoitusarvo $N_{b,Rd}$ on laskettu kaavan 21 mukaisesti käyttämällä kuitenkin heikomman akselin nurjahduskäyrän mukaista epätarkkuustekijää. Tällöin laskennassa on hieman lisää varmuutta. Nurjahduskäyrä valitaan poikkileikkauksen mukaan taulukosta 16 ja epätarkkuustekijä valitaan taulukon 17 mukaan. (SFS-EN 1993-1-1, 61-63.)

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

Kaava 21. Taivutusnurjahduksen mitoitusarvo.

jossa pienennystekijän χ arvo tulee kaavasta 22.

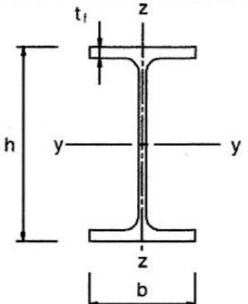
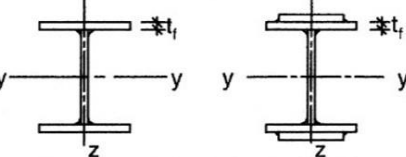

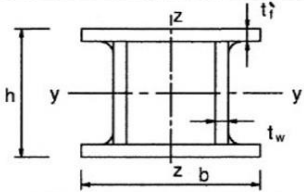
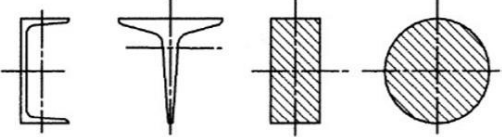
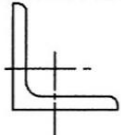
$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} \leq 1,0$$

Kaava 22. Pienennystekijän χ arvo.

Taulukko 16. Nurjahduskäyrien epätarkkuustekijät (SFS-EN 1993-1-1, 62).

Nurjahduskäyrä	a_0	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Taulukko 17. Poikkileikkauksen mukainen nurjahduskäyrän valinta (SFS-EN 1993-1-1, 63).

Poikkileikkaus	Rajat	Nurjahdus ko. akselin suhteen	Nurjahduskäyrä		
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460	
Valssatut profiilit 	$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40$ mm	y-y z-z	a a ₀	a ₀ a ₀
		$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y-y z-z	b c	a a
	$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100$ mm	y-y z-z	b c	a a
		$t_f > 100$ mm	y-y z-z	d d	c c
Hitsatut I-profiilit 	$t_f \leq 40$ mm	y-y z-z	b c	b c	
	$t_f > 40$ mm	y-y z-z	c d	c d	
Rakenneputket 	Kuumamuovattu	Kaikki	a	a ₀	
	Kylmämuovattu	Kaikki	c	c	
Hitsatut kotelo-profiilit 	Yleensä (poikkeus, ks. alla)	Kaikki	b	b	
	Paksut hitsit: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	Kaikki	c	c	
U-, T- ja umpiprofiilit 		Kaikki	c	c	
L-teräkset 		Kaikki	b	b	

Pienennystekijän laskennassa käytetävän Φ arvo saadaan epätarkkuustekijän α ja kaavalla kaavan 23 avulla laskettun muunnetun hoikkuuden avulla kaavasta 24. (SFS-EN 1993-1-1, 61.)

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha \cdot (\lambda - 0,2) + \lambda^2]$$

Kaava 23. Suureen Φ arvo.

$$\lambda = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1}$$

Kaava 24. Muunnettu hoikkuus λ poikkileikkausluokille 1, 2 ja 3.

Kaavassa L_{cr} on tarkasteltavan tason nurjahduspituus, i on bruttopoikkileikkauksen mukaan kyseisen akselin suhteen laskettu hitaussäde ja λ_1 tulee kaavan 25 mukaan. (SFS-EN 1993-1-1, 64.)

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9 \cdot \varepsilon$$

Kaava 25. Suureen λ_1 arvo.

Pilarin vääntönurjahduksen suhde taivutusnurjahdukseen tulee tarkastaa, jotta tiedetään, tapahtuuko sauvassa taivutusnurjahdus, kuten tässä tapauksessa vai taivutusvääntönurjahdus. Tällöin vääntönurjahduksen tulee olla taivutusnurjahduksen arvoa suurempi $N_{T.b.Rd} > N_{b.Rd}$. Vääntönurjahduskestävyyden mitoitusarvo lasketaan kaavan 26 mukaan käyttämällä pienennystekijän laskennassa väännön mukaisia arvoja. (SFS-EN 1993-1-1, 56.)

$$N_{T.b.Rd} = \chi_T \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

Kaava 26. Vääntönurjahduskestävyyden mitoitusarvo.

Pilarin yhdistetty nurjahdus-, taivutus- ja puristuskestävyys on laskettu y-askelin suhteen kaavan 27 mukaan ja heikomman z-akselin suhteen kaavan 28 mukaan. Taivutusmomentti vaikuttaa vain vahvemman akselin suhteen, jolloin kaavoista loppuosa $M_{z.Ed}$ su-pistuu pois sen arvon ollessa nolla. Kaavoissa tarvittavat yhteisvaikutustekijät ja voimien

arvot poimitaan taulukoista ja lasketaan samalla tavalla kuin palkissa. (SFS-EN 1993-1-1, 70.)

$$M_{b.Rd.y} = \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{W_{el.y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0$$

Kaava 27. Taivutusnurjahdus y-akselin suhteen.

$$M_{b.Rd.y} = \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{W_{el.y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0$$

Kaava 28. Taivutusnurjahdus z-akselin suhteen.

5.7.4 Pilarin laskennan tulokset

Pilariin kohdistuu $M_{Ed} = 310 \text{ kNm}$ suuruinen taivutusmomentti, lisäksi leikkausvoima $V_{Ed} = 92 \text{ kN}$ ja normaalivoima $N_{Ed} = 195 \text{ kN}$ rasittavat pilaria. Kehän pilarit ovat myös mitoitettu kuormitusyhdistelmälle KY7, missä rakenteen omapaino on kerrottu 1,15 varmuudella ja määräävä muuttuvakuorma lumi kerrotaan 1,5 varmuudella, sekä tuulikuorma 0,9 varmuuskertoimella. Pilarin poikkileikkausluokka on sama kuin palkillakin eli PL3.

Pilarin poikkileikkauksen puristuskestävyyden käyttöasteeksi saadaan mitoituksessa 0,077 ja taivutusvastukestävyyden käyttöasteeksi pilarin yläpäähän saatiin 0,604. Leikkauskestävyyden käyttöasteen on myös pilarilla vain 0,114 ja nurjahduskestävyydelle tulee käyttöasteeksi 0,116. Pilarissa todettiin nurjahdusmuodon taivutusnurjahdus ja pilarin nurjahduspituutena $L_{cr.T} = L$, eli pilarin koko pituus. Yhdistetyn nurjahdus-, taivutus- ja puristuskestävyyden käyttöasteeksi tuli 0,823.

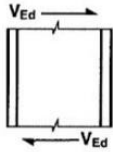
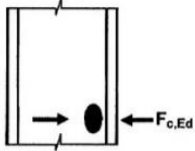
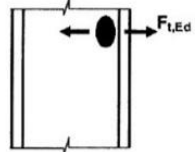
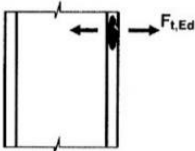
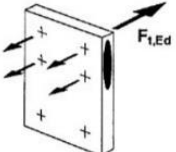
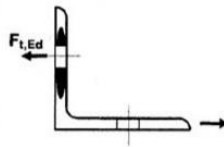
5.8 Liitosten mitoitus

5.8.1 Liitosten laskennan teoria

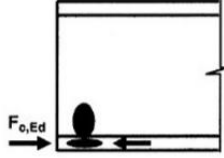
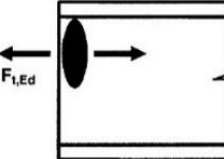
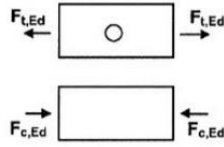
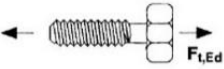

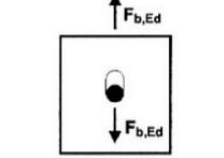
Kehässä harjalla oleva lakiliitos sekä pilarin ja palkin välinen kehän nurkan liitos on mallinnettu jäykiksi päätylevyliitoksiksi. Pilarin alapään liitos perustuksiin on nivelellinen peruspulttiliitos. Tällöin kehän rakennemallina toimii kaksinivelkehä. Liitoksien mitoituksesta on käyty yleisesti läpi työssä olevien liitosten tärkeimpiä laskuja, joiden perään on listattu kunkin liitoksen lähtökohdat ja saadut tulokset. Työn lopussa olevissa liitteissä on lisäksi esitetty liitosten laskelmat.

I-profiileista koostuvien kehien liitokset mallinnetaan peruskomponenttien yhdistelmiksi. Liitoksien mitoituksessa käytetään taivutusmomentin $M_{j,Ed}$ ja liitettävien sauvojen välistä kiertymää ϕ_{Ed} , mitä kuvaa momentti-kiertymäyhteyden mitoitusarvo. Kyseinen laskenta huomioi kolme rakenteellista pääominaisuutta, mitkä ovat taivutuskestävyys $M_{j,Rd}$, kiertymisjäykkyys S_j ja kiertymiskyky ϕ_{Cd} . Peruskomponentit ovat esitetty taulukoissa 18, 19 ja 20. Laskuissa käydään kullekin liitokselle ohjeistetut komponentit läpi, joista heikoimman kestävyuden saanut mitoittaa liitoksen kestävyuden. (SFS-EN 1993-1-8, 64-66.)

Taulukko 18. Liitosten peruskomponentit osa 1 (SFS-EN 1993-1-8, 67).

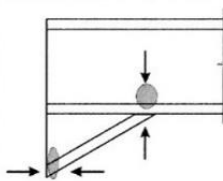
Komponentti			Viittaus soveltamissääntöön		
			Kestävyyden mitoitusarvo	Jäykkyyss- tekijä	Kiertymis- kyky
1	Pilarin uuman leikkaus		6.2.6.1	6.3.2	6.4(4)
2	Pilarin uuman poikittainen puristus		6.2.6.2	6.3.2	6.4(5) ja 6.4(6)
3	Pilarin uuman poikittainen veto		6.2.6.3	6.3.2	6.4(5)
4	Pilarin laipan taivutus		6.2.6.4	6.3.2	6.4(7)
5	Päätylevyn taivutus		6.2.6.5	6.3.2	6.4(7)
6	Laipan kulmateräksen taivutus		6.2.6.6	6.3.2	6.4(7)

Taulukko 19. Liitosten peruskomponentit osa 2 (SFS-EN 1993-1-8, 68).

Komponentti			Viittaus soveltamissääntöön		
			Kestävyyden mitoitusarvo	Jäykkyyss- tekijä	Kiertymis- kyky
7	Palkin tai pilarin laipan ja uuman puristus		6.2.6.7	6.3.2	*)
8	Palkin uuman veto		6.2.6.8	6.3.2	*)
9	Levyn veto tai puristus		Veto: - EN 1993-1-1 Puristus: - EN 1993-1-1	6.3.2	*)
10	Vedetyt ruuvit		Pilarin laippa: - 6.2.6.4 päätylevy: - 6.2.6.5 laipan kulmateräs: - 6.2.6.2	6.3.2	6.4(7)
11	Ruuvien leikkaus		3.6	6.3.2	6.4(2)
12	Ruuvit joihin kohdistuu reunapuristus (palkin laipassa, pilarin laipassa, päätylevyssä tai kulmateräksessä)		3.6	6.3.2	*)

*) Tässä osassa ei esitetä tietoja.

Taulukko 20. Liitosten peruskomponentit osa 3 (SFS-EN 1993-1-8, 69).

Komponentti		Viittaus soveltamissääntöön			
		Kestävyyden mitoitussarvo	Jäykkyys- tekijä	Kiertymis- kyky	
13	Betoni, johon kohdistuu puristus jälkivalu mukaan lukien	6.2.6.9	6.3.2	*)	
14	Puristusvoimasta aiheutuva pohjalevyn taivutus	6.2.6.10	6.3.2	*)	
15	Vetovoimasta aiheutuva pohjalevyn taivutus	6.2.6.11	6.3.2	*)	
16	Perustusruuvit, joihin kohdistuu veto	6.2.6.12	6.3.2	*)	
17	Perustusruuvit, joihin kohdistuu leikkaus	6.2.2	*)	*)	
18	Perustusruuvit, joihin kohdistuu reunapuristus	6.2.2	*)	*)	
19	Hitsit	4	6.3.2	*)	
20	Viisteellinen palkki		6.2.6.7	6.3.2	*)

*) Tässä osassa ei esitetä tietoja.

Harjalla olevassa liitoksessa esiintyy saatujen tulosten lisäksi myös epäkeskisyydestä johtuvaa taivutusmomenttia. Epäkeskisyydestä aiheutuva lisämomentti lasketaan kaavan 29 mukaan, jossa $e = 50\text{mm}$ on epäkeskisyyden.

$$M_{Ed,2} = V_{Ed} \cdot e$$

Kaava 29. Epäkeskisyyden aiheuttama taivutusmomentti.

Liitoksessa olevien pulttien sijainnin päätylevyissä tulee täyttää reunaetäisyyksille määritetyt ehdot taulukon 21 mukaan. Lisäksi pultille tehtävän reiän koon tulee olla taulukossa 22 esitettyjen ehtojen mukaisia. (Kaitila 2014, 90.)

Taulukko 21. Ruuvien keskiöväli, pääty- ja reunaetäisyydet (Kaitila 2014, 90).

Pääty- ja reunaetäisyydet sekä keskiövälit, ks. kuvat 4.15, 4.16 ja 4.17	Minimiarvo	Maksimiarvo ^{1) 2) 3)}		
		Standardien [25], [26], [27], [28] ja [30] mukaisista teräksistä tehdyt rakenteet		Standardin [29] mukaisesta teräksestä tehdyt rakenteet
		Säälle tai muille korroosiorasituksille altis rakenne	Rakenne, joka ei ole altis säälle tai muille korroosiorasituksille	Suojaamaton rakenne
Päätyetäisyys e_1	$1,2 d_0$	$4t + 40$ mm		Suurempi arvoista $8t$ ja 125 mm
Reunaetäisyys e_2	$1,2 d_0$	$4t + 40$ mm		Suurempi arvoista $8t$ ja 125 mm
Etäisyys e_3 pidennetyissä rei'issä	$1,5 d_0$ ⁴⁾			
Etäisyys e_4 pidennetyissä rei'issä	$1,5 d_0$ ⁴⁾			
Keskiöväli p_1	$2,2 d_0$	Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm	Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm	Pienempi arvoista $14t_{\min}$ ja 175 mm
Keskiöväli $p_{1,0}$		Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm		
Keskiöväli $p_{1,i}$		Pienempi arvoista $28t$ ja 400 mm		
Keskiöväli p_2 ⁵⁾	$2,4 d_0$	Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm	Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm	Pienempi arvoista $14t_{\min}$ ja 175 mm
<p>1) Keskiöväleillä sekä pääty- ja reunaetäisyyksillä ei ole ylärajaa paitsi seuraavissa tapauksissa:</p> <ul style="list-style-type: none"> - puristetussa rakenneosissa paikallisen lommahduksen tai globaalien nurjahduksen (sauva+liitoslevyt, globaalien nurjahduksen vaatimusta ei ole esitetty standardissa SFS-EN 1993-1-8: 2005 [2]) ja korroosion välttämiseksi korroosiorasituksen alaisena - korroosiorasitukselle alttiissa vedetyissä rakenneosissa korroosion välttämiseksi. <p>2) Kiinnittimien välisen puristetun levyn paikallinen lommahdus lasketaan standardin SFS-EN 1993-1-1: 2005 [31] mukaan olettamalla levy pilariksi ja käyttämällä nurjahduspituutena arvoa $0,6 p_1$. Kiinnittimien välisen puristetun levyn paikallista lommahdusta ei tarvitse tarkistaa, jos p_1/t on pienempi kuin 9. Reunaetäisyys saa olla enintään ulokkeelliselle puristetulle taso-osalle esitetyn arvon suuruinen paikallisen lommahduksen estämiseksi. Tämä vaatimus ei koske päätyetäisyyttä.</p> <p>3) t on uloimman liitettävän osan pienempi paksuus.</p> <p>4) Pidennettyjen reikien raja-arvot on esitetty standardissa SFS-EN 1090-2: 2008 [10].</p> <p>5) Limitetyille kiinnitinrivoille voidaan käyttää minimiarvoa $p_2 = 1,2 d_0$, jos kahden limityksessä olevan kiinnittimen välinen minimietäisyys $L \geq 2,4 d_0$ ks. tämän kirjan kuva 4.15.</p>				

Taulukko 22. Ruuvien nimellisvälykset (Kaitila 2014, 90).

Ruuvien tai niveltapin nimellishalkaisija (mm)	12	14	16	18	20	22	24	27 ja yli
Normaalit pyöreät reiät ^a	1 ^{b,c}		2				3	
Ylisuuret pyöreät reiät	3		4				6	
Lyhyet pidennetyt reiät (pituudelle) ^d	4		6				8	
Pitkät pidennetyt reiät (pituudelle) ^d	1,5 <i>d</i>							
^a Torneille, mastoille ja vastaaville sovellutuksille normaalien pyöreiden reikien nimellisvälystä pienennetään 0,5 mm ellei toisin esitetä. ^b Pinnoitetuille kiinnittimille 1 mm:n nimellisvälystä voidaan suurentaa kiinnittimen pinnoitteen paksuuden verran. ^c Ruuveille, joiden nimellishalkaisija on 12 tai 14 mm ja uppokantaruuveille voidaan käyttää myös 2 mm:n välystä standardissa SFS-EN 1993-1-8: 2005 [2] esitettyjä ehtoja noudattaen. ^d Pidennetyissä rei'issä ruuvien nimellisvälyksen tulee leveysuunnassa olla sama kuin normaaleilla pyöreillä rei'illä.								

Lujuusluokkien mukaan ruuveille on taulukoitu 23 mukaan valmiiksi myötörajan f_{yb} ja vetomurtolujuuden f_{ub} nimellisarvot. Kyseisiä arvoja käytetään laskelmissa ominaisarvoina. Työssä on käytetty lujuusluokaltaan 8.8 ruuveja taulukon mukaan. (SFS-EN 1993-1-8, 21.)

Taulukko 23. Ruuvien myötörajan ja vetomurtolujuuden nimellisarvot (SFS-EN 1993-1-8, 21).

Ruuvien lujuusluokka	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
f_{yb} (N/mm ²)	240	320	300	400	480	640	900
f_{ub} (N/mm ²)	400	400	500	500	600	800	1000

Varmalla puolella laskettaessa harjalla käytettyihin liitoksen puristettuihin ruuveihin kohdistuu sekä leikkausta että vetoa, jolloin niiden leikkauskestävyys leikettä kohti $F_{v,Rd}$, reunapuristuskestävyys $F_{b,Rd}$ ja vetokestävyys $F_{t,Rd}$ lasketaan taulukossa 24 annettujen kaavojen mukaan. Ruuvien yhdistetty leikkaus- ja vetovoima kestävyydelle saadaan mitoitusarvo kaavan 30 avulla. (SFS-EN 1993-1-8, 28.)

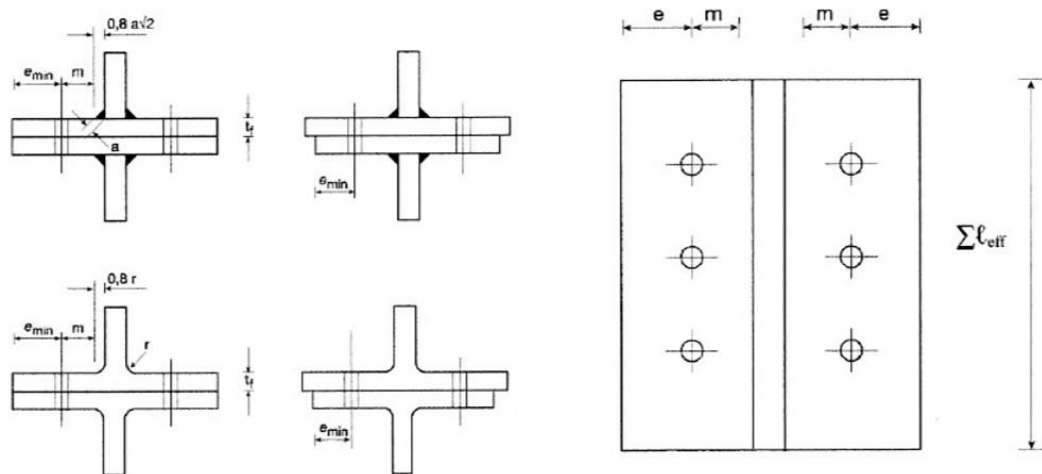
$$\frac{F_{v.Ed}}{F_{v.Rd}} + \frac{F_{t.Ed}}{1,4 \cdot F_{t.Rd}} \leq 1,0$$

Kaava 30. Ruuvien yhdistetty leikkaus- ja vetokestävyys.

Taulukko 24. Yksittäisten kiinnitimien kestävyysmitoitussarvot, kun kyseessä leikkaus ja/tai veto (SFS-EN 1993-1-8, 28).

Murtumismuoto	Ruuvit	Niitit
Leikkauskestävyys leikettä kohti	$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}}$ <p>- kun ruuvien kierteet ovat leikkaustasossa (A on ruuvien jännityspoikkipinta-ala A_s):</p> <ul style="list-style-type: none"> - lujuusluokat 4.6, 5.6 ja 8.8: $\alpha_v = 0,6$ - lujuusluokat 4.8, 5.8, 6.8 ja 10.9: $\alpha_v = 0,5$ <p>- kun ruuvien kierteetön osa on leikkaustasossa (A on ruuvien bruttopoikkileikkauksen pinta-ala):</p> <ul style="list-style-type: none"> - $\alpha_v = 0,6$ 	$F_{v,Rd} = \frac{0,6 f_{ur} A_0}{\gamma_{M2}}$
Reunapuristuskestävyys ^{1), 2), 3)}	$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}}$ <p>missä α_b on pienin arvoista α_d; $\frac{f_{ub}}{f_u}$ ja 1,0;</p> <p>siirrettävän voiman suunnassa:</p> <ul style="list-style-type: none"> - levyn pään ruuveille: $\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0}$; - muille kuin pään ruuveille: $\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$ <p>kohtisuorassa suunnassa siirrettävään voimaan nähden:</p> <ul style="list-style-type: none"> - reunarivin ruuveille : k_1 on pienin arvoista $2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7$ ja 2,5 - muille kuin pään ruuveille: k_1 on pienin arvoista $1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7$ ja 2,5 	
Vetokestävyys ²⁾	$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}}$ <p>Missä $k_2 = 0,63$ uppokantaisille ruuveille, Muissa tapauksissa $k_2 = 0,9$.</p>	$F_{t,Rd} = \frac{0,6 f_{ur} A_0}{\gamma_{M2}}$
Ruuvien ja mutterin lävistymiskestävyys	$B_{p,Rd} = 0,6 \pi d_m t_p f_u / \gamma_{M2}$	Tarkistus tarpeeton
Yhdistetty leikkaus- ja vetovoima	$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 F_{t,Rd}} \leq 1,0$	

Liitoksessa palkkien päissä olevat päätylevyt mitoitetaan taivutukselle vedettyinä ekvivalentin T-osina. T-osien laskennassa käytetään kuvan 13 mukaan arvoja e_{min} , l_{eff} ja m , lisäksi käytetään tehollisena pituutena Σl_{eff} mikä ei välttämättä vastaa todellisuudessa komponentin fysikaalista pituutta. (SFS-EN 1993-1-8, 72.)



Kuva 13. Ekvivalentin T-osan laipan mitat (SFS-EN 1993-1-8, 73).

Ekvivalentille T-osalle lasketaan kestävyden mitoitusarvo $F_{T,Rd}$ alla olevan taulukon 25 mukaan. Laskentaan vaikuttaa, käytetäänkö ruuveissa taustalevyjä ja kumpaa menetelmää käytetään. Lisäksi tarkastellaan ennen kestävyden laskentaa, voiko liitoksessa syntyä vipuvoimia mikä vaikuttaa myös käytettävään mitoitusarvon laskentaan. Peruspulttiliitoksissa vipuvoimia ei oleteta syntyvän joten niissä kaava on aina sama. Taulukossa listatut murtumismallit 1, 2 ja 3 käydään kaikki läpi joista heikoimman tuloksen antanut vaihtoehto valitaan mitoittavaksi arvoksi T-osalle. (SFS-EN 1993-1-8, 74-75.)

Taulukko 25. T-osan kestävyden mitoitusarvo (SFS-EN 1993-1-8, 74).

	Vipuvoimia voi syntyä, jos $L_b \leq L_b^*$		Vipuvoimia ei synny
Murtumismalli 1	Menetelmä 1	Menetelmä 2 (vaihtoehtoinen menetelmä)	
Taustalevyjä ei käytetä	$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m}$	$F_{T,1,Rd} = \frac{(8n - 2e_w)M_{pl,1,Rd}}{2mn - e_w(m+n)}$	$F_{T,1-2,Rd} = \frac{2M_{pl,1,Rd}}{m}$
Käytetään taustalevyjä	$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd} + 2M_{bp,Rd}}{m}$	$F_{T,1,Rd} = \frac{(8n - 2e_w)M_{pl,1,Rd} + 4nM_{bp,Rd}}{2mn - e_w(m+n)}$	
Murtumismalli 2	$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n\sum F_{t,Rd}}{m+n}$		
Murtumismalli 3	$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd}$		
<p>Murtumismalli 1: Täyden mekanismin syntyminen laipassa Murtumismalli 2: Ruuvien murtuminen, kun laippa samalla myötää Murtumismalli 3: Ruuvien murtuminen</p> <p>L_b on - ruuvien venymäpituus, jonka arvoksi valitaan liitospaksuus (liitettävien materiaalien ja aluslaattojen yhteenlaskettu paksuus) lisättyä arvolla, joka on puolet ruuvien kannan ja mutterin yhteenlasketusta paksuudesta tai;</p> <ul style="list-style-type: none"> - perustusruuvien tapauksessa perustusruuvien venymäpituus, jonka arvoksi valitaan kahdeksan kertaa ruuvien nimellishalkaisija + jälkivalun paksuus + pohjalevyn paksuus + aluslaatan paksuus + puolet mutterin korkeudesta. $L_b^* = \frac{8,8m^3 A_s}{\sum \ell_{eff,1} t_f^3}$ <p>$F_{T,Rd}$ on laipan T-osan vetokestävyysmitoitussarvo Q on vipuvoima</p> $M_{pl,1,Rd} = 0,25 \sum \ell_{eff,1} t_f^2 f_y / \gamma_{M0}$ $M_{pl,2,Rd} = 0,25 \sum \ell_{eff,2} t_f^2 f_y / \gamma_{M0}$ $M_{bp,Rd} = 0,25 \sum \ell_{eff,1} t_{bp}^2 f_{y,bp} / \gamma_{M0}$ <p>$n = e_{min}$ mutta $n \leq 1,25m$</p> <p>$F_{t,Rd}$ on ruuvien vetokestävyysmitoitussarvo, ks. taulukko 3.4; $\sum F_{t,Rd}$ on T-osan kaikkien ruuvien vetokestävyysmitoitussarvojen $F_{t,Rd}$ summa;</p> <p>$\sum \ell_{eff,1}$ on $\sum \ell_{eff}$:n arvo murtumismallissa 1; $\sum \ell_{eff,2}$ on $\sum \ell_{eff}$:n arvo murtumismallissa 2; e_{min}, m ja t_f ovat kuvan 6.2 mukaisia suureita; $f_{y,bp}$ on taustalevyjen myötöraja; t_{bp} on taustalevyjen paksuus; $e_w = d_w/4$; d_w on aluslaatan halkaisija, tai ruuvien kannan tai mutterin avainväli tarkasteltavasta tapauksesta riippuen.</p>			

Liitoksessa olevalle palkille tulee tarkastaa puristetulle laipalle ja uuman osalle yhdistetty kestävyys $F_{c.f.Rd}$ kaavan 31 mukaan. Kaavassa $M_{c.Rd}$ on palkin poikkileikkausluokan mukainen taivutuskestävyys ja z on momenttivarsi, joka on laippojen keskipisteen välinen etäisyys. (Ongelin ym. 2010, 383.)

$$F_{c.f.Rd} = \frac{M_{c.Rd}}{z}$$

Kaava 31. Palkin puristetun laipan ja puristetun uuman osan yhdistetty puristuskestävyys.

Palkille lasketaan vedetyn uuman kestävyys aikaisemmin määritettyjen tehollisten leveyksien avulla. Kestävyyden lasketa suoritetaan kaavalla 32 ja kaavassa käytetty arvo $b_{eff.t.w}$ on pienimmän arvon antanut tehollinen leveys Σl_{eff} . (Ongelin ym. 2010, 383.)

$$F_{t.w.Rd} = b_{eff.t.w} \cdot t_w \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

Kaava 32. Vedetyn uuman kestävyys.

Koko liitokselle kestävyudeksi valitaan edellä laskettujen komponenttien kestävyyksistä pienin eli heikoimmoin kestävyuden antanut arvo kaavalla 33. Jotta kyseistä laskentamenetelmää voidaan käyttää, tulee täytyä seuraava ehto $F_{Rd} < 3,8 \cdot F_{t.Rd}$. (Ongelin ym. 2010, 384.)

$$F_{Rd} = \min(F_{T.1.Rd}; F_{T.2.Rd}; F_{T.3.Rd}; F_{c.f.Rd}; F_{t.w.Rd})$$

Kaava 33. Liitoksen kestävyys.

Kun on tiedossa liitoksen heikoin kohta, pystytään laskemaan liitokselle taivutuskestävyys kaavan 34 avulla, jossa z on aikaisemmin käytetty momenttivarsi. (Ongelin ym. 2010, 384.)

$$M_{j.Rd} = F_{Rd} \cdot z$$

Kaava 34. Liitoksen taivutuskestävyys.

Kun kyseessä on ruuvein kiinnitetty päätlevy kohdistuu palkin uumaan vetorasitus jonka mitoitusarvon laskentaan käytetään kaavaa 35. Käytetty ekvivalentti T-osa voidaan määrittää joko ruuviryhmänä tai käyttämällä yksittäistä ruuviriviä. (SFS-EN 1993-1-8, 90.)

$$F_{t.wb.Rd} = b_{eff.wb} \cdot t_w \cdot f_y$$

Kaava 35. Palkin uuman vetokestävyys.

Kehän nurkan laskelmassa ratkaistaan ensiksi liitoslevyyn kohdistuva normaalivoima kaavalla 36, jossa kuvan 14 mukaan α on katon kaltevuuskulma, θ on nurkan kulma vastakkaiseen suuntaan, h_f on palkin tehollinen korkeus ja M_{Ed} on nurkan taivutusmomentti. (Hämeen ammattikorkeakoulu 2008, 92.)

$$F_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{h_f} \cdot \frac{\cos(\alpha)}{\cos(\theta)}$$

Kaava 36. Liitoslevyn normaalivoima.

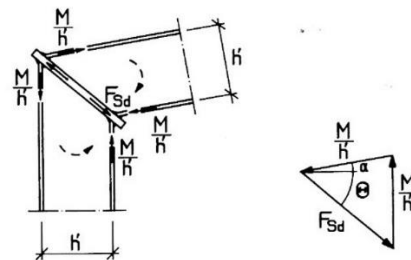
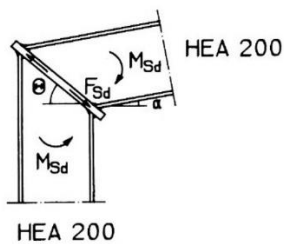
Kehän nurkassa olevan päätylevyn tarvittava paksuus t_p pystytään määrittämään levyyn kohdistuvan puristusvoiman mukaan kaavasta 37.

$$t_p = \sqrt{\frac{F_{Ed} \cdot m}{b_p \cdot f_{u.pl}}}$$

Kaava 37. Päätylevyn vaadittu paksuus.

missä m on ruuvin etäisyys uuman reunasta.

Laske kehän nurkka poikittaislevyn puristusvoima F_{Sd} .
Momentti voidaan korvata laipoihin kohdistuvalla voimaparilla.



$$M_{Sd} = 63 \text{ kNm}$$

$$\alpha = 10^\circ$$

$$\Theta = 40^\circ$$

$$F_{Sd} = \frac{M}{h} \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \Theta} =$$

$$\frac{63}{(0,190 - 0,010)} \frac{\cos 10^\circ}{\cos 40^\circ} = 450 \text{ kN}$$

Kuva 14. Kehän nurkan päätylevyn puristusvoima (Hämeen ammattikorkeakoulu 2008, 92).

Kehän nurkassa olevan liitoksen pilarille tulee tarkastella uumaan kohdistuva leikkauskestävyys kaavalla 38.

$$W_{pl.Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}}$$

Kaava 38. Pilarin uumen leikkauskestävyys.

jossa A_v on poikkileikkauksen uuman pinta-ala.

Palkkien keskinäisissä tai pilarin ja palkin välisissä liitoksissa käytettyjen ruuvien, sekä pilarien liitoksissa perustuksiin käytettyjen peruspulttien tulee kestää niihin kohdituvat veto- ja leikkauskestävyydet. Ruuvien varren suuntainen vetokestävyys $F_{t.Rd}$ lasketaan kaavan 39 mukaan, missä f_{ub} on ruuvien vetomurtolujuus ja kerrointa $k_2 = 0,9$ käytetään ei uppokantaisille ruuveille, sekä termi A_s on ruuvien poikkileikkauksen jännityspoikkipinta-ala kaavan 40 mukaan. (Kaitila 2014, 89, 95-96.)

$$F_{t.Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

Kaava 39. Ruuvien vetokestävyys.

jossa γ_{M2} on materiaaliominaisuuden osavarmuusluku.

$$A_s = 0,78 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4},$$

Kaava 40. Ruuvien jännityspoikkipinta-ala.

jossa d on ruuvien halkaisija.

Ruuville kohdistuva leikkausrasitusta vastaava leikkauskestävyys $F_{v.Rd}$ lasketaan kaavan 41 mukaan. Kaavassa f_{up} on pohjalevyn myötölujuus, mikä tässä tapauksessa on 355 MPa . Ruuvien joihin kohdistuu sekä leikkaus- ja vetovoimaa tulee täyttää kaavan 42 mukainen ehto. (Kaitila 2014, 95-96.)

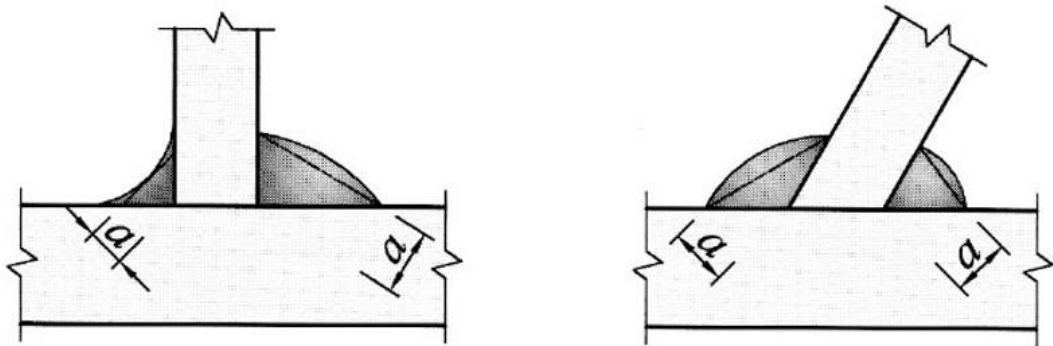
$$F_{v.Rd} = \frac{0,6 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

Kaava 41. Ruuvien leikkauskestävyys.

$$\frac{F_{v.Ed}}{F_{v.Rd}} + \frac{F_{t.Ed}}{1,4 \cdot F_{t.Rd}} \leq 1,0$$

Kaava 42. Yhdistetty leikkaus- ja vetovoima.

Työssä tehdyissä hitsiliitoksissa käytetään pienahitsiä, hitsaamalla tehtyjä liitoksia ovat palkkiin hitsattava kehän kulman vahvikeosa, sekä palkkien ja pilarien päissä olevien päätylevyjien hitsaus kyseisiin rakenneseisiin. Pienahitsiä tarkastellaan kuvan 15 mukaisella a -mitalla, jonka pienin sallittu arvo on 3 mm. Tämän lisäksi pienahitsin käyttöä rajoitetaan yhdistettävien osien keskinäisellä liituskulmalla, mikä saa ilman lisätarkasteluita olla 60–120 asteen välissä. Hitsin a -mitan kokoa voidaan tarkastella taulukon 26 suhdeluvun mukaan pohjalevyn paksuuden t_p avulla. Toinen tapa tarkastaa tarvittava pienahitsin a -mitta on kaava 43. (Kaitila 2014, 95-96.)



Kuva 15. Pienahitsin a -mitta (Kaitila 2014, 106).

Taulukko 26. Taslujen kaksoispienahitsien suhde ja muodonmuutoskyvyn vaatiman minimimitoituksen suhde (Kaitila 2014, 108).

Perusaine	a/t	$(a/t)_{min}$
S 235	0,566	0,336
S 275	0,601	0,349
S 355	0,636	0,403

$$a = \frac{F_{Ed} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2} \cdot \sqrt{2}}{L_w \cdot f_u},$$

Kaava 43. Pienahitsin vaadittu a -mitta.

jossa F_{Ed} on mitoitusarvo pituusyksikköä kohden, β_w on käytettävän standardin ja teräslajin mukainen korrelaatiokerroin, mikä S355 teräksellä on 0,9 ja L_w on hitsin pituus millimetreinä.

Liitoksille tehtävässä luokittelussa käytetään jäykkyyteen tai lujuuteen perustuvaa laskeutapaa. Jäykkuuden mukaisesti liitokset voidaan jakaa nimelellisesti nivelellisiin liitoksiin, jäykkiin liitoksiin ja osittain jäykkiin liitoksiin. Lujuuden mukaan jaottelu tapahtuu nimelellisesti nivelellisten liitosten, täysin lujien liitosten ja osittain lujien liitosten kesken. Nimelellisesti nivelellisiin liitoksiin ei saa välittyä huomattavaa momenttia, mikä heikentää sen kestävyttä. Kyseisen liitoksen jäykkyyden mukainen luokitus toteutuu kiertymisjäykkyyden $S_{j.ini}$ ollessa korkeintaan kaavan 44 suuruinen ja lujuuden mukaisen liitoksen taivutuskestävyyden mitoitusarvo $M_{j.Rd}$ saa olla enintään 25 prosenttia täysin lujan liitoksen arvosta, edellyttäen kuitenkin hyvää kiertymiskykyä. (Ongelin ym. 2010, 302.)

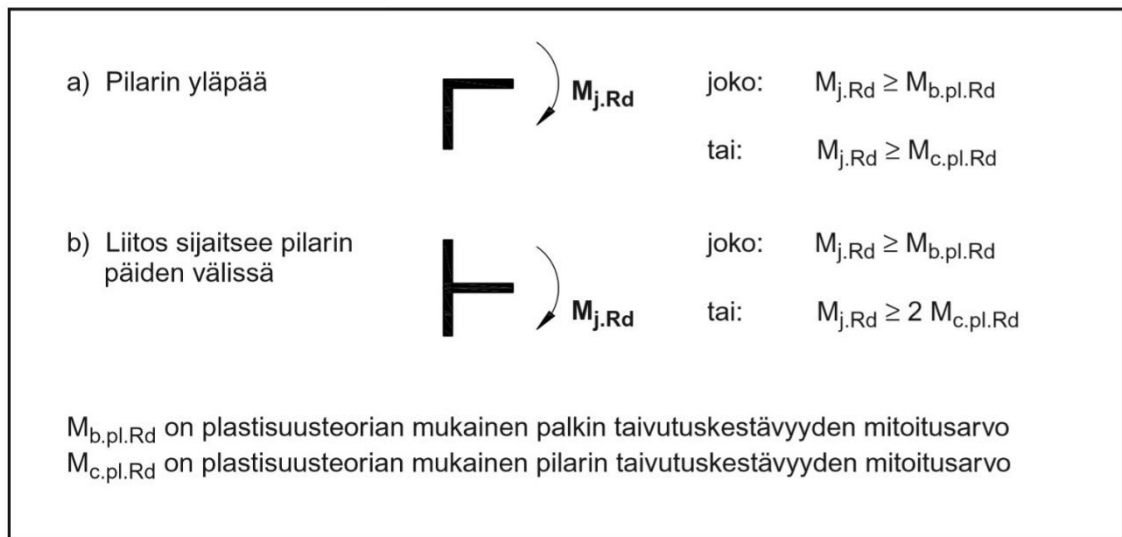
$$S_{j.ini} \leq 0,5 \cdot \frac{E \cdot I_b}{L_b},$$

Kaava 44. Liitoksen kiertymisjäykkyyden alkuarvo.

jossa E on teräksen kimmokerroin, I_b on sauvan neliömomentti ja L_b on sauvan jänneväli.

Kun kyseessä on jäykkä liitos tulee sen kestää myös taivutusmomenttia ja liitoksen jäykkyydestä aiheutuvat muodonmuutokset eivät saa vaikuttaa rakenteen siirtymätilaan tai voimasuureiden jakautumiseen. Osittain jäykässä liitoksessa käytetään momentti-kiertymäyhteyttä eli sauvojen välistä yhteyttä. Liitokset, jotka eivät kuulu jäykkiin tai nimelellisesti nivelellisiin liitoksiin, ovat osittain jäykkiä liitoksia. (Ongelin ym. 2010, 302.).

Täysin lujaksi liitos luokitellaan, kun se täyttää kuvan 16 mukaiset ehdot ja liitoksen taivutuskestävyyden arvo on vähintään liitettävän sauvan kestävyuden suuruinen. Osittain luja liitos ei täytä täysin lujan liitoksen tai nimelellisesti nivelellisen liitoksen ehtoja ja se kantaa sille tulevat voimat. (Ongelin ym. 2010, 302.)



Kuva 16. Täysin lujan liitoksen vaatimukset (Ongelin ym. 2010, 303).

Liitosten kiertymisjäykkyyttä laskettaessa tarvitaan kimmoteorian mukaista yhdistettyä jäykkyystekijää k_i . Yhdistettävät jäykkyystekijät määräytyvät taulukon 27 mukaan riippuen siitä minkälaisesta liitoksesta on kyse. Nämä selvitettyään voidaan kiertymisjäykkyys selvittää kaavan 45 avulla ja saatua arvoa verrataan kuvan 17 raja-arvoihin jäykkyyden mukaisen liitoksen luokituksen selvittämiseksi. (SFS-EN 1993-1-8, 60, 100-102.)

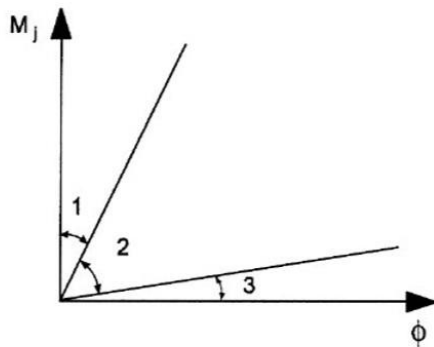
$$S_j = \frac{E \cdot z^2}{\mu \cdot \sum \frac{1}{k_i}}$$

Kaava 45. Liitoksen kiertymisjäykkyys (SFS-EN 1993-1-8).

jossa z on momenttivarsi, μ on jäykkyyssuhde ja k_i on liitoksen peruskomponentin jäykkyystekijä.

Taulukko 27. Liitoksen jäykkyystekijöiden valinta ruuvi kiinnityksille (SFS-EN 1993-1-8, 102).

Palkki-pilariliitokset, joissa käytetään ruuveilla kiinnitettyjä päätylevyjä	Vedettyjen ruuvirivien lukumäärä	Huomioon otettavat jäykkyystekijät k_i
Yksipuoliset liitokset	Yksi	$k_1; k_2; k_3; k_4; k_5; k_{10}$
	Vähintään kaksi	$k_1; k_2; k_{eq}$
Kaksipuoliset liitokset – Momentit ovat yhtä suuret ja vastakkaismerkkiset	Yksi	$k_2; k_3; k_4; k_5; k_{10}$
	Vähintään kaksi	$k_2; k_{eq}$
Kaksipuoliset liitokset – Momentit ovat eri suuria	Yksi	$k_1; k_2; k_3; k_4; k_5; k_{10}$
	Vähintään kaksi	$k_1; k_2; k_{eq}$
Palkkien jatkos, jossa käytetään ruuveilla kiinnitettyjä päätylevyjä	Vedettyjen ruuvirivien lukumäärä	Huomioon otettavat jäykkyystekijät k_i
Kaksipuoliset liitokset – Momentit ovat yhtä suuret ja vastakkaismerkkiset	Yksi	k_5 [vasen puoli]; k_5 [oikea puoli]; k_{10}
	Vähintään kaksi	k_{eq}
Pilarin pohjalevyjen kiinnitykset	Vedettyjen ruuvirivien lukumäärä	Huomioon otettavat jäykkyystekijät k_i
Pilarin pohjalevyjen kiinnitykset	Yksi	$k_{13}; k_{15}; k_{16}$
	Vähintään kaksi	$k_{13}; k_{15}$ ja k_{16} kullekin ruuviriville



Alue 1: jäykkä, jos $S_{j,ini} \geq k_b EI_b / L_b$

Missä:

$k_b = 8$ kehät, joissa jäykistysjärjestelmä pienentää vaakasuuntaisia siirtymiä vähintään 80 %:lla

$k_b = 25$ muut kehät olettaen, että jokaisessa kerroksessa on voimassa $K_b/K_c \geq 0,1$ *)

Alue 2: osittain jäykkä:

Kaikki alueelle 2 kuuluvat liitokset luokitellaan osittain jäykiksi. Alueilla 1 tai 3 olevat liitokset voidaan vaihtoehtoisesti käsitellä myös osittain jäykinä.

Alue 3: nimellinen nivel, jos $S_{j,ini} \leq 0,5 EI_b / L_b$

*) Kehien, joille $K_b/K_c < 0,1$, liitokset luokitellaan osittain jäykiksi.

Merkinnät:

K_b on tarkasteltavan kerroksen yläpäässä olevien kaikkien palkkien I/L_b - arvojen keskiarvo;

K_c on tarkasteltavassa kerroksessa olevien kaikkien pilarien I/L_c - arvojen keskiarvo;

I_b on palkin hitausmomentti;

I_c on pilarin hitausmomentti;

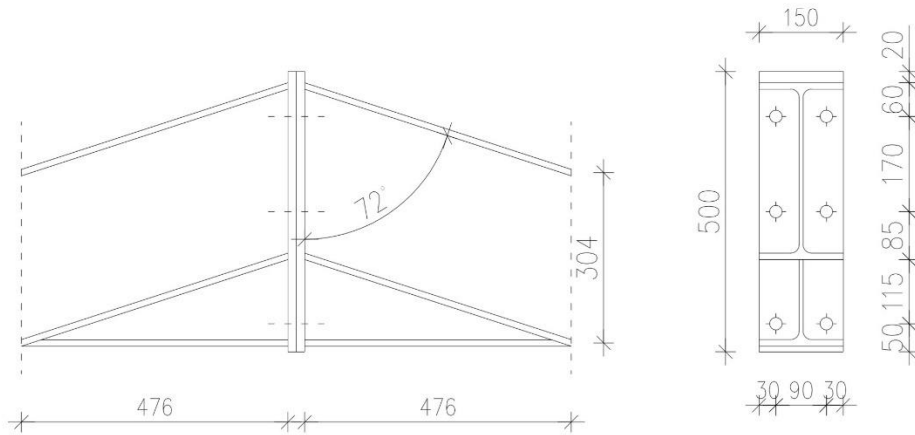
L_b on palkin jänneväli (pilarien keskiöiden välinen etäisyys);

L_c on pilarin kerroskorkeus.

Kuva 17. Jäykkyyden mukainen liitosluokitus (SFS-EN 1993-1-8, 60).

5.8.2 Harjaliitoksen laskelmien tulokset

Harjalla liitokseen kohdistuu taivutusmomentin $M_{Ed} = 123 \text{ kNm}$, normaalivoiman $N_{Ed} = 57 \text{ kN}$ ja leikkausvoiman $V_{Ed} = 39 \text{ kN}$ aiheuttamat rasitukset. Epäkeskisyydestä aiheutuva lisämomentti suurentaa taivutusmomenttia arvoon $M_{Ed} = 125 \text{ kNm}$. Kuvassa 18 on käytetyn liitoksen geometriatiedot esitettyinä.

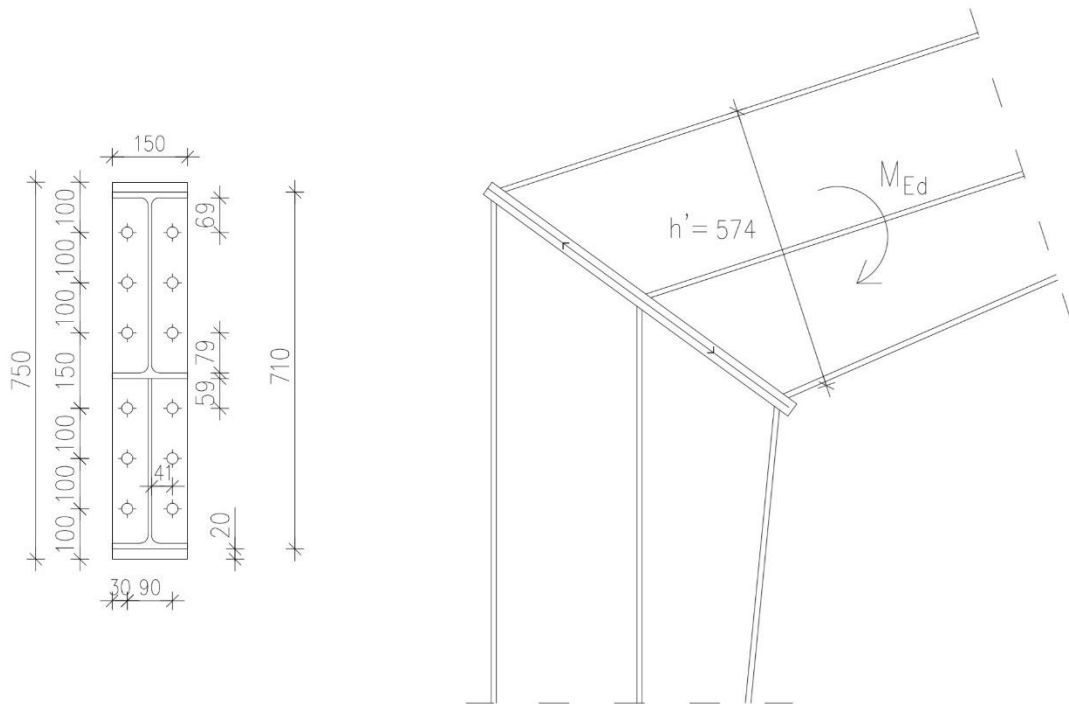


Kuva 18. Harjaliitoksen geometria.

Liitoksen ruuveina ovat M20 koon pultit, joiden kestävyys on laskettu yhdistettynä leikkaus- ja vetokestävyytensä, jolloin käyttöasteeksi on saatu 0,703. Päätylevyä on tarkasteltu T-osana, jolloin levyille tulee murtumismallin 2 kautta heikoin kestävyys, ja koko liitoksen taivutuskestävyys on näin ollen 0,97. Palkin uuman vedolle ja liitoslevyn leikkauskestävyydelle jää reilusti reserviä, jolloin ne eivät ole mitoittavana osana. Hitsin a-mitaksi liitoslevyn ja palkin saumaan valitaan laskelmien perusteella 7 mm.

5.8.3 Nurkan pilari-palkki liitoksen tulokset

Kehän pilari-palkki liitokseen kohdistuu taivutusmomentin $M_{Ed} = 342 \text{ kNm}$, normaalivoiman $N_{Ed} = 95 \text{ kN}$ ja leikkausvoiman $V_{Ed} = 124 \text{ kN}$ aiheuttamat rasitukset. Tulosten mukaan laskettu liitoksen päätylevyä rasittava normaalivoima on $N_{Ed} = 695 \text{ kN}$. Kuvaan 19 on koottu kehän nurkan liitoksen lähtötiedot.

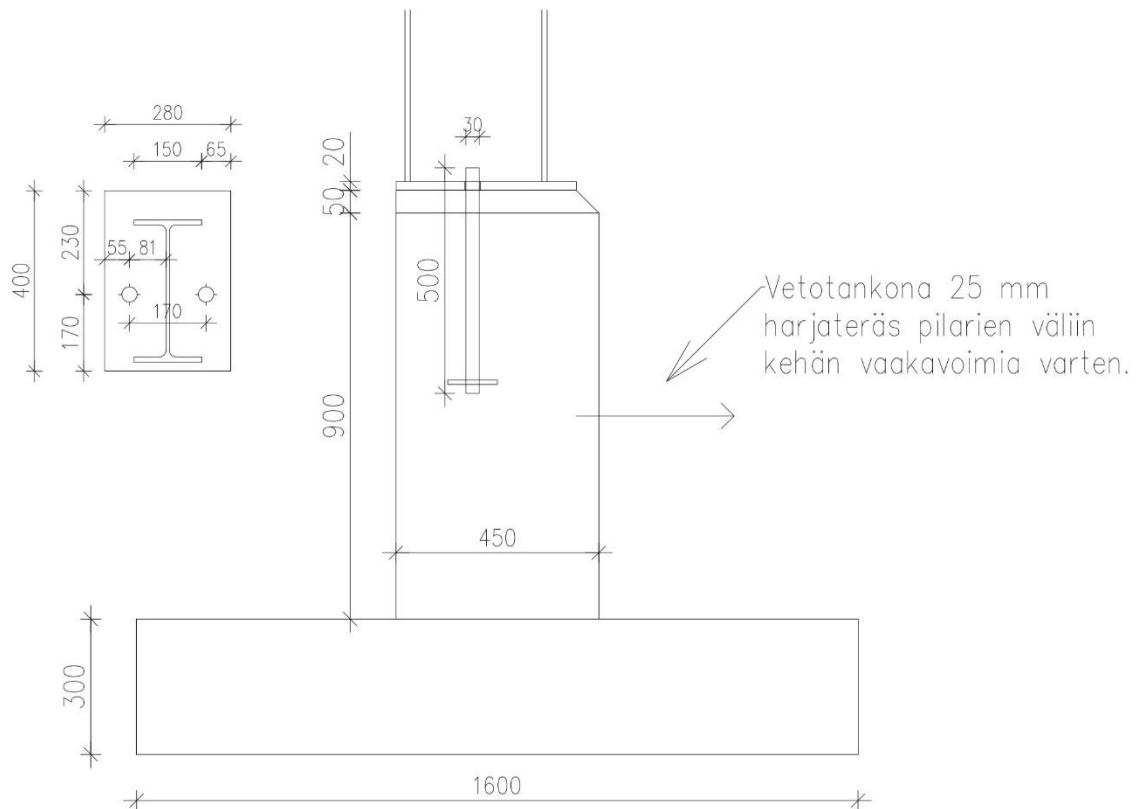


Kuva 19. Kehän pilari-palkkiliitos.

Päätylevyyn kohdistuvan normaalivoiman perusteella laskettiin päätylevyjen vaadituksi paksuudeksi 17,4 mm, joten valittiin 20 mm levy. Liitoksessa on käytetty samoja pultteja kuin harjaliitoksessa ja niiden käyttöasteeksi on saatu 0,43. Päätylevyssä on käytetty myös T-osan laskentamallia, josta käyttöasteeksi tuli 0,70. Rajoittavaksi tekijäksi liitokselle tulee palkin puristetun laipan ja uuman osan yhdistetyn kestävyuden käyttöaste 0,89. Hitsin a-mitaksi on valittu laskelmien mukaan sama 7 mm kuin harjaliitoksessa.

5.8.4 Peruspulttiliitoksen tulokset

Kehän pilari liittyy perustuksiin nivelellisesti joten liitos ei välitä laisinkaan momenttia. Liitokseen tulevat rasitukset koostuvat puristusta aiheuttavasta normaalivoimasta $N_{Ed} = 195 \text{ kN}$ ja peruspulteille kohdistuvasta leikkausvoimasta $V_{Ed} = 70 \text{ kN}$. Kuvassa 20 on kuvattu kehän liittyminen pilarianturoihin.



Kuva 20. Peruspulttiliitos.

Liitoksessa on kaksi M30 peruspulttia, missä yhden pultin vetokestävyys käyttöaste on 0,60. Pultille kohdistuvan leikkauskestävyyden käyttöasteeksi saadaan myös 0,62. Peruspulttiliitokselle laskettu pienin puristuskestävyyden arvo on 341,3 kN, jolloin käyttöasteeksi jää vielä 0,57. Liitoksen mitoittavaksi käyttöasteeksi tulee pohjalevyn T-osan vetokestävyys. Pilarin ja pohjalevyn välisenä pienahitsin a-mittana riittää 5 mm hitsiliitos.

6 POHDINTA

Työssä lähtökohtana oli suunnitella Loimaalle rakennettavan emolehmäpihaton teräsrunko. Tämän vuoksi työssä pyrittiin perehtymään pihaton käyttötarkoituksen asettamiin vaatimuksiin rungon toteutusta ja suunnittelua varten. Työn pääpaino oli teräskehän mitoitus, joten kyseisen tiedon esitys oli tarkoitus pitää suppeana, mikä työssä on onnistunut. Tietoa on kuitenkin niin, että sen perusteella kyseinen runko on mahdollista suunnitella.

Päätavoitteena työssä oli rungon kaksinivelkehän rakennesuunnittelu, tässä tapauksessa jätettiin työn laajuuden takia kehän rakenneosien palkkien ja pilarien sekä näiden liitosten mitoitukseen. Rakennesuunnittelua varten työssä on perehdytty teräksen ominaisuuksiin rakennusmateriaalina ja sen rajoituksia, kuten palonkesto. Työssä on tuotu esiin teräksen käytön syy rakentamisessa, eli sillä päästään kevyisiin ja muuntojoustaviin suuriin rakenteisiin sen korkean lujuuden ja sitkeyden takia.

Kehän suunnittelussa on huomioitu sen hyvät ja huonot puolet, kuten suunnittelun yksinkertaistuminen käytettäessä nivelellistä liitosta. Tämä luo mahdollisia materiaalisäästöjä perustuksissa, mutta toisaalta niitä voidaan joutua tukemaan vaakasuunnassa vetotangoilla, kuten tässä kohteessa. Lisäksi jäykkäliitos luo kehään vakautta ja parantaa rakenteellista suorituskykyä. Vaikka kehään syntyisi lämmön vaikutuksesta rasituksia, on siinä riittävästi lujuusreservä.

Rakenneosien ja liitosten mitoituksessa on käyty läpi rakennukselle tulevat kuormat ja niiden vaikutus. Tämän jälkeen on esitetty palkin ja pilarin mitoituksessa huomioitavia tärkeimpiä laskujen kannalta huomioitavia seikkoja kattavasti. Työ on tässä kohdassa onnistunut, kun vastaavissa tapauksissa kyseisten osien mitoitus on mahdollista tehdä esitetyillä ohjeilla. Liitosten teoria on tarkoituksella tiivistetty pääkohtiin laskelmien laajuuden vuoksi. Toisena haastavana asiana on monien taulukoiden käyttö liitoksien mitoituksessa. Näiden seikkojen takia liitosten mitoitusta varten tulee perehtyä työssä annettuihin lähdemateriaaleihin, jotta tarpeen tullen kyseisten liitosten mitoitus on tehtävissä.

Liitokset kehän nurkassa ja harjalla poikkesivat tavanomaisista pilari-palkki- tai palkki-palkki-liitoksista ja teräsrakenteiden mitoituksen kirjallisuudesta ei suoraan löytynyt niihin

ohjeistusta. Tämä toi omat haasteensa yhdessä vähäiseen kokemukseen teräsrakenteiden mitoituksessa. Liitosten mitoituksessa pyrittiin soveltamaan kuitenkin kirjallisuuden laskentaesimerkkejä ja -ehtoja sekä vertailemaan niitä käytössä olleen FEM-ohjelman tuloksiin. Ohjelmalla saadut tulokset ovat käyttöasteeltaan parempia, mikä selittyy osin käsinlaskelmissa tehdyillä yksinkertaistuksilla. Tämä tuo rakenteeseen varmuutta, mutta toisaalta se voi aiheuttaa turhan suuria rakenteita. Tästä päätellen tietokoneohjelman tuloksilla runkona olisi voinut toimia astetta pienempi I-profiili, mikä taas parantaa investoinnin taloudellisuutta.

LÄHTEET

Atria Oy 2019a. Emotila. AtriaNauta. Viitattu 31.5.2019. <https://www.atriatuottajat.fi/at-rianauta/emotila/Sivut/default.aspx>.

Atria Oy 2019b. Naudanlihan tuotanto Suomessa. AtriaNauta. Viitattu 31.5.2019. <https://www.atriatuottajat.fi/atrianauta/lihanautatila/Sivut/default.aspx>.

Haapanen, K. 2017. Emolehmäpihatto 60 kpl ja 15 hiehoa, rakentamissuosituksset. Forssa: HKSCAN FINLAND OY.

Hellstedt, M. 2014. Erilaiset naudanlihan tuotanto rakennukset ja niiden kustannukset. Jokioinen: MTT.

Hämeen ammattikorkeakoulu 2008. Teräsrakentaminen. Hämeenlinna: Hämeen ammattikorkeakoulu.

Jantunen, J. 2018. Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta. Helsinki: Ympäristöministeriö.

Kaitila, O. 2014. Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus Eurocode 3 -oppikirja. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry.

Ongelin, P. & V. 2010. HITSATUT PROFIIILIT EN 1993-käsikirja. Hämeenlinna: Rautaruukki Oyj.

SFS-EN 1990 + A1 + AC. 2006. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 1993-1-1. 2005. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

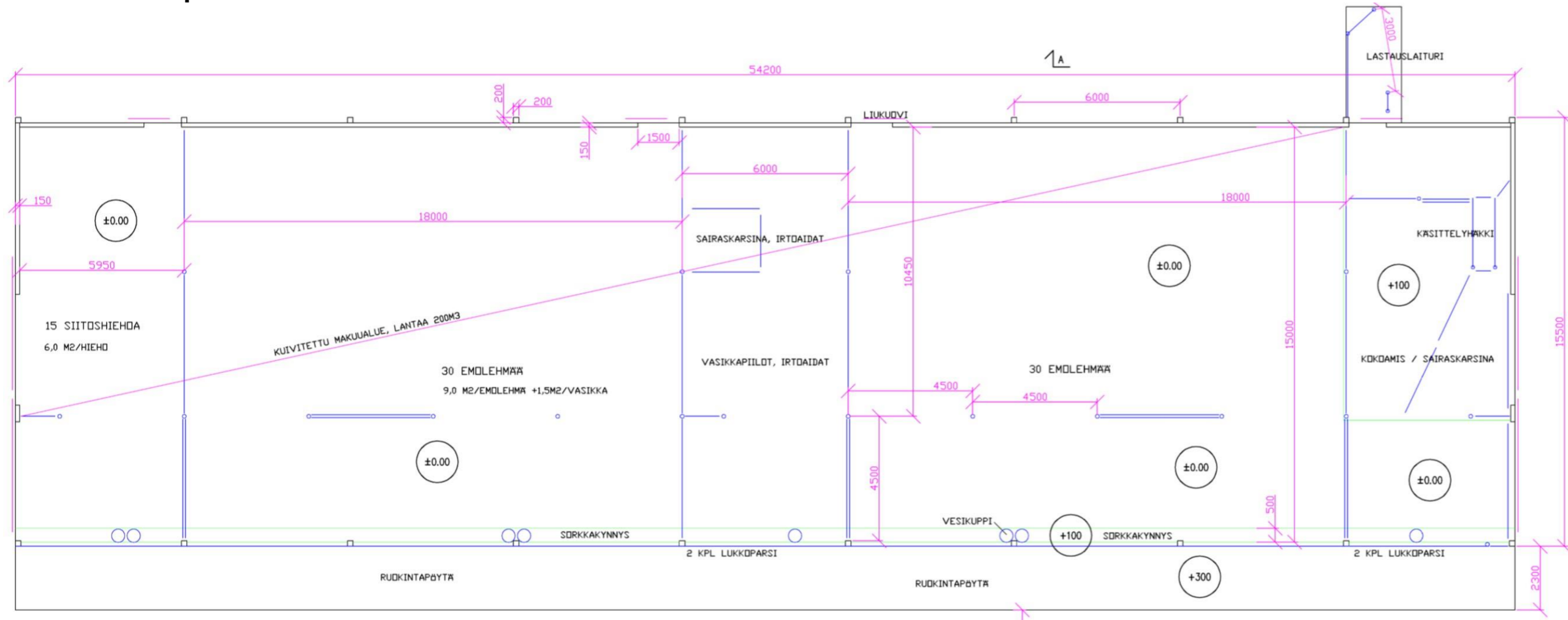
SFS-EN 1993-1-8. 2005. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten mitoitus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Sipilä, R. 2014. Teräsrakenteiden pinnoitteet ja käyttöikäsuunnittelu. Hämeenlinna: Teräsrakenneyhdistys ry.

RIL ry 2017. RIL 201-1-2017. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

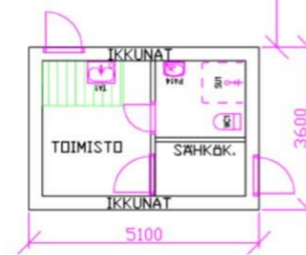
Väisänen, P. 2007. Teräs. Vammala: Rautaruukki Oyj.

HKSCAN-mallipihatto



PINTA-ALA, 840M²+ 18M²

ELÄINMÄÄRÄ:		LANTAVARASTOTARVE:	
EMOLEHMÄ	60 KPL	816M ³	
HIEHD,	15 KPL	134M ³	
		YHTEENSÄ	950M ³
		LANTAA MAKUUALUEELLA	200M ³
		KUIVALANTALA	750M ³



EMOLEHMÄPIHATTO 60 +15KPL
POHJA LUONNOS

HKSCAN MALLI

HKSCAN

20.09.2017 Kimmo Haapanen
010 570150, kimmo.haapanen@hkscan.com

Palkin mitoitus

Kehän vasemman palkin mitoitus:

Tarkastellaan pääkannattajan kestävyys kehän nurkassa, missä suurin taivutusmomentti. Profiilin korkeus otettu kohtisuoralta etäisyydeltä sisäkulmasta palkin päälle. $h=574\text{mm}$

Mitoitus kuormitusyhdistelmän KY7 kuormitukselle.

Lähtötiedot: $L := 7.3\text{ m}$ $k := 5\text{ m}$

Materiaalitiedot

Teräksen myötölujuus $f_y := 355\text{ MPa}$

Kimmoerotoin: $E := 210\text{ GPa}$

Liukerotoin: $G := 81\text{ GPa}$

Myötövenymä: $\varepsilon := \sqrt{\frac{235\text{ MPa}}{f_y}} = 0.814$

Osavarmuusluvut: $\gamma_{M0} := 1.0$ $\gamma_{M1} := 1.0$ $\gamma_{M2} := 1.25$

Kuormat:

$M_{Ed} := 342.0\text{ kN}\cdot\text{m}$ Taivutusmomentti

$V_{Ed} := 124.0\text{ kN}$ Leikkausvoima

$N_{Ed} := 96\text{ kN}$ Normaaliavoima

Poikkileikkaus: WI574-7.1-10.7x150

$h := 574\text{ mm}$ Korkeus nurkan pystysuoralta kohdalta (kuvassa)

$b_f := 150\text{ mm}$ Leveys

$t_f := 10.7\text{ mm}$ Laipan paksuus

$t_w := 7.1\text{ mm}$ Uuman paksuus

$a := 4\text{ mm}$ Kaulahitsin mitta

$h_f := h - t_f = 563.3\text{ mm}$ Laippojen painopisteiden välinen etäisyys

$c := \frac{b_f - t_w}{2} - \sqrt{2} \cdot a = 65.793\text{ mm}$ Laipan tehollinen leveys

$b_w := h - 2 \cdot (t_f + \sqrt{2} \cdot a) = 541.286\text{ mm}$ Uuman tehollinen korkeus

$$h_w := h - 2 \cdot t_f = 552.6 \text{ mm} \quad \text{Laippojen välinen etäisyys}$$

$$A_f := t_f \cdot b_f = 1605 \text{ mm}^2 \quad \text{Puristetun laipan ala}$$

$$A_w := t_w \cdot h_w = 3923.46 \text{ mm}^2 \quad \text{Puristetun uuman ala}$$

$$A := 2 \cdot A_f + A_w = 7133.46 \text{ mm}^2 \quad \text{Poikkileikkauksen ala}$$

$$I_y := \frac{b_f \cdot h^3}{12} - \frac{(b_f - t_w) \cdot (h - 2 \cdot t_f)^3}{12} = 354510594.3 \text{ mm}^4 \quad \text{Neliömomentti y-akselin suhteen}$$

Poikkileikkausluokka:

Laippa:

$$\frac{c}{t_f} = 6.149 < 9 \cdot \varepsilon = 7.323 \quad \text{Poikkileikkausluokka 1 toteutuu}$$

Uuma: (taivutettu ja puristettu)

$$\sigma_N := \frac{N_{Ed}}{A} = 13.458 \text{ MPa} \quad \text{Puristuksen aiheuttama jännitys}$$

$$e := \frac{\sigma_N \cdot I_y}{M_{Ed}} = 13.95 \text{ mm} \quad \text{Momentin aiheuttama jännitys, jonka nollakohta voidaan selvittää kyseisellä kaavalla:}$$

$$\alpha := 0.5 \cdot \frac{h_w + e}{h_w} = 0.513$$

$$\frac{h_w}{t_w} = 77.831 > \frac{456 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1} = 65.502 \quad \text{Poikkileikkausluokka 2 ei toteudu}$$

$$\psi := \frac{2 \cdot I_y \cdot N_{Ed} - A \cdot M_{Ed} \cdot h_w}{2 \cdot I_y \cdot N_{Ed} + A \cdot M_{Ed} \cdot h_w} = -0.904 > -1 \quad \text{Jännityssuhde}$$

$$\frac{h_w}{t_w} = 77.831 < \frac{42 \cdot \varepsilon}{0.67 + 0.33 \cdot \psi} = 91.929 \quad \text{Poikkileikkausluokka 3 toteutuu}$$

Profiili kuuluu poikkileikkausluokkaan 3 => kimmoteoria**Taivutuskestävyys:**

$$e_y := \frac{h}{2} = 287 \text{ mm} \quad \text{PL:n neutraaliakselin ja laipan uloimman reunan etäisyys}$$

$$W_{el,y} := \frac{I_y}{e_y} = 1235228.6 \text{ mm}^3$$

$$W_{el,y} := \frac{b_f \cdot h^2}{6} - \frac{(b_f - t_w) \cdot \frac{(h - 2 \cdot t_f)^3}{h}}{6} = 1235228.6 \text{ mm}^3 \quad \text{Kimmoinen taivutusvastus y-akselin suhteen (kaksi eri tapaa laskea, sama tulos!)}$$

$$M_{c.Rd} := \frac{W_{el,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 438.506 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Taivutuskestävyyden käyttöaste:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c.Rd}} = 0.78 \leq 1.0 \quad \text{Taivutuskestävyys OK!}$$

Leikkauskestävyys:

$$A_v := h_w \cdot t_w = 3923.46 \text{ mm}^2$$

$$V_{pl.Rd} := \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = 804.15 \text{ kN} \quad \text{Plastinen taivutuskestävyys (käytetään myöhemmin)}$$

Leikkauskestävyyden käyttöaste:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl.Rd}} = 0.154 \leq 1.0 \quad \text{Leikkauskestävyys OK!}$$

Leikkauslommahduskestävyyden tarkastus jäykistämättömälle uumalle:

$$\eta := 1.2 \quad \text{Kun materiaali S235-S460}$$

$$\frac{h_w}{t_w} = 77.831 > \frac{72 \cdot \epsilon}{\eta} = 48.817 \quad \Rightarrow \text{leikkauslommahdus tulee tarkastaa!}$$

Leikkauslommahduskestävyyden tarkastus poikittaisjäykistetyille uumalle:

Uuman osuus:

$$a_1 := 0 \text{ mm} \quad \text{Päätyjäykisteiden sijainti palkin päästä levyn keskipisteeseen}$$

$$a := L - 2 \cdot a_1 = 7300 \text{ mm} \quad \text{Päätyjäykisteiden välinen etäisyys}$$

$$k_{TS1} := 0 \quad \text{Ei pituusjäykisteitä (varmalla puolella)}$$

$$\frac{a}{h_w} = 13.21 \geq 1.0$$

$$k_r := 5.34 + 4 \cdot \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 + k_{TS1} = 5.363$$

$$\epsilon = 0.814 \quad f_{yw} := 355 \text{ MPa} \quad f_{yf} := 355 \text{ MPa}$$

$$\lambda_w := \frac{h_w}{86.4 \cdot t_w \cdot \epsilon} = 1.107 \geq 1.08$$

$$X_w := \frac{0.83}{\lambda_w} = 0.75 \quad \text{Pienennystekijä, kun valitaan ei-jäykkä päätyjäykiste}$$

$$V_{bw.Rd} := \frac{X_w \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} = 602.832 \text{ kN}$$

Laippojen osuus:

$$b_f = 150 \text{ mm} \leq b_{f,max} := 2 \cdot 15 \cdot \varepsilon \cdot t_f + t_w = 268.271 \text{ mm}$$

$$c := a \cdot \left(0.25 + \frac{1.6 \cdot b_f \cdot t_f^2 \cdot f_{yf}}{t_w \cdot h_w^2 \cdot f_{yw}} \right) = 1917.517 \text{ mm}$$

Laipat saman kokoisia ja samaa materiaalia:

$$A_{f1,eff} := b_f \cdot t_f = 1605 \text{ mm}^2 \quad A_{f2,eff} := b_f \cdot t_f = 1605 \text{ mm}^2$$

$$f_{yf1} := f_y = 355 \text{ MPa} \quad f_{yf2} := f_y = 355 \text{ MPa}$$

Poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyys tehollisille laipoille:

$$M_{f,Rd} := \min \left(h_f \cdot A_{f1,eff} \cdot \frac{f_{yf1}}{Y_{M0}}, h_f \cdot A_{f2,eff} \cdot \frac{f_{yf2}}{Y_{M0}} \right) = 320.954 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$V_{bf,Rd} := \frac{b_f \cdot t_f^2 \cdot f_{yf}}{c \cdot Y_{M1}} \cdot \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right) = -0.431 \text{ kN}$$

Leikkauslommahduskestävyyden käyttöaste:

$$V_{b,Rd} := V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} = 602.401 \text{ kN} \leq \frac{\eta \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \cdot Y_{M1}} = 964.98 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = 0.206 \leq 1.0 \quad \text{Leikkauslommahduskestävyys OK!}$$

Koska plastinen taivutuskestävyys suurempi, niin leikkauslommahdus pienentää leikkauskestävyyttä:

$$V_{b,Rd} = 602.401 \text{ kN} \leq V_{pl,Rd} = 804.15 \text{ kN}$$

Taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutus tarkastetaan EN 1993-1-5 mukaan:

$$\eta_3 := \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} = 0.206 < 0.5 \quad \text{OK!}$$

Ehtoja 1 ja 2 ei tarvitse tarkistaa: (käyty läpi kuitenkin)

$$\text{Ehto 1.} \quad f_{ywd} := f_y \quad f_{yfd} := f_y$$

$$M_{pl,Rd} := 2 \cdot \left(\frac{f_{ywd}}{Y_{M0}} \cdot \frac{h_w}{4} \cdot \frac{h_w}{2} \cdot t_w + \frac{f_{yfd}}{Y_{M0}} \cdot \left(\frac{h_w}{2} + \frac{t_f}{2} \right) \cdot b_f \cdot t_f \right) = 513.373 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{Kun: } \eta_1 := \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = 0.666 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} = 0.625$$

Käytetään seuraavaa ehtoa:

$$\eta_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \right) \cdot (2 \cdot \eta_3 - 1)^2 = 0.796 \leq 1.0 \quad \text{OK!}$$

Ehto 2.

$$\frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = 0.206 \leq 1.0 \quad \text{OK!}$$

Kiepahduskestävyys:

$$L_k := 0.6 \text{ m} \cdot 6 = 3.6 \text{ m}$$

$$E := 210000 \text{ MPa} \quad G := 81 \text{ GPa}$$

Kiepahdustueta, käytetään jäykisteiden väliä. Jäykisteet tukeutuvat kuudennen orren kohdalle.

$$I_z := 2 \cdot \frac{t_f \cdot b_f^3}{12} + \frac{(h - 2 \cdot t_f) \cdot t_w^3}{12} = 6035231.802 \text{ mm}^4$$

$$k := 0.5 \quad k_w := 0.5$$

Symmetrinen poikkileikkaus:

$$z_s := 0 \text{ mm} \quad z_j := 0 \text{ mm}$$

$$z_a := \frac{h}{2} = 287 \text{ mm}$$

$$z_g := z_a - z_s = 287 \text{ mm}$$

$$h_f := h - t_f = 563.3 \text{ mm}$$

$$I_w := 0.25 \cdot h_f^2 \cdot I_z = 478755158344.7 \text{ mm}^6 \quad \text{Käyräjäykkyyden momentti}$$

$$I_t := \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot b_f \cdot t_f^3 + h_w \cdot t_w^3) = 188431.506 \text{ mm}^4 \quad \text{Vääntöneliömomentti}$$

$$C_1 := 1.285 \quad C_2 := 1.562 \quad C_3 := 0.753$$

$$M_{cr} := C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k \cdot L_k)^2} \left(\sqrt{\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \cdot L_k)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_j)^2} - (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_j) \right) = 420.966 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$W_y := W_{el,y}$$

$$\lambda_{LT} := \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = 1.021 > 0.2 \quad \text{Joten kiepahdus tarvitsee tarkastaa}$$

$$\frac{h}{b_f} = 3.827 \quad \text{Valitaan kiepahduskäyrä d:} \quad \alpha_{LT} := 0.76 \quad \text{Hitsatut profiilit s. 142}$$

$$\phi_{LT} := 0.5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot (\lambda_{LT} - 0.2) + \lambda_{LT}^2) = 1.333$$

$$\chi_{LT} := \frac{1}{\phi_{LT} \cdot \sqrt{(\phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2)}} = 0.87565 \leq 1.0$$

$$M_{b,Rd} := W_y \cdot \frac{X_{LT} \cdot f_y}{Y_{M1}} = 383.977 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Kiepahduskestävyyden käyttöaste:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = 0.891 \leq 1.0 \quad \text{Kiepahduskestävyys OK!}$$

Normaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutusehto:

$$N_{pl,Rd} := \frac{A_v \cdot f_y}{Y_{M0}} = 1392.828 \text{ kN}$$

$$0.25 \cdot N_{pl,Rd} = 348.207 \text{ kN} \geq N_{Ed} = 96 \text{ kN} \quad \text{OK!}$$

$$0.5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot \frac{f_y}{Y_{M0}} = 696.414 \text{ kN} \geq N_{Ed} = 96 \text{ kN} \quad \text{OK!}$$

=> ei yhteisvaikutusta

Taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutus:

$$i_y := \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 222.928 \text{ mm} \quad \text{Poikkileikkauksen jäyhyyssäde y-akselin suhteen}$$

$$i_z := \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 29.087 \text{ mm} \quad \text{Poikkileikkauksen jäyhyyssäde z-akselin suhteen}$$

$$h_s := h_f = 563.3 \text{ mm}$$

$$I_w := \left(\frac{h_s}{2}\right)^2 \cdot I_z = (4.788 \cdot 10^{11}) \text{ mm}^6$$

$$L_{cr} := L_k = 3600 \text{ mm} \quad \text{Nurjahduspituus}$$

$$\lambda_1 := 93.9 \cdot \varepsilon = 76.399$$

$$\lambda := \frac{L_{cr}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = 1.62 \quad \text{Muunnettu hoikkuus}$$

$$I_T := 165.42 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 \quad \text{Vääntöneliömomentti}$$

$$\text{Kun: } t_f = 10.7 \text{ mm} \leq 40 \text{ mm} \quad \text{EN 1993-1-1, Taulukko 6.2}$$

$$\text{y-y akselin nurjahduskäyrä: } \mathbf{b} \Rightarrow \text{Epätarkkuustekijä: } \alpha_y := 0.34$$

$$\text{z-z akselin nurjahduskäyrä: } \mathbf{c} \Rightarrow \text{Epätarkkuustekijä: } \alpha_z := 0.49$$

Kaksoissymmetrinen profiili, jolloin:

$$N_{cr,z} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr}^2} = 965.179 \text{ kN} \quad N_{cr,y} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr}^2} = 56694.804 \text{ kN}$$

Yhteisvaikutustekijät: PLL 3

$$C_{my} := 0.6 + 0.4 \cdot \Psi = 0.238 \leq 0.4$$

Ekvivaletti momentin kerroin
Taulukko 2.24 Hitsatut profiilit s.200

$$\Rightarrow C_{my} := 0.4$$

y-akseli:

$$\lambda_y := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = 0.211$$

$$\phi_y := 0.5 \cdot (1 + \alpha_y \cdot (\lambda_y - 0.2) + \lambda_y^2) = 0.524$$

$$\chi_y := \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \lambda_y^2}} = 0.996$$

z-akseli:

$$\lambda_z := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} = 1.62$$

$$\phi_z := 0.5 \cdot (1 + \alpha_z \cdot (\lambda_z - 0.2) + \lambda_z^2) = 2.16$$

$$\chi_z := \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \lambda_z^2}} = 0.279$$

Kiepahdus vahvemman akselin suhteen: (y-akseli)

$$\Delta M_{y,Ed} := 0 \quad \text{PLL 3}$$

$$M_{y,Ed} := M_{Ed} = 342 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Kansainvälisesti valittavia parametreja, Suomessa:
Hitsatut kaksoissymmetriset I-profiilit
Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus s. 58

$$\lambda_{LT,0} := 0.2 \quad \beta := 1.0$$

$$\frac{h}{b_f} = 3.827 > 2 \quad \text{Hitsattu I-profiili} \Rightarrow \text{Kiepahduskäyrä: d}$$

$$\Rightarrow \text{Epätarkkuustekijä: } \alpha_{LT} := 0.76$$

$$W_y := \frac{b_f \cdot h^2}{4} - \frac{(b_f - t_w) \cdot (h - 2 \cdot t_f)^2}{4} = (1.446 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

$$k_z := 1 \quad k_w := 1$$

Käytetään arvoja joissa oletetaan kiertymien ja käyristymien mahdollisuus.

$$\Rightarrow C_1 := 1.132 \quad C_2 := 0.459 \quad C_3 := 0.525$$

$$z_g := \frac{h}{2} = 287 \text{ mm}$$

$$z_j := 0$$

Kaksoissymmetrinen profiili

$\Rightarrow C_3$ arvosta tulee 0, joten on jätetty pois kiepahdusmomentin kaavasta.

Kiepahdusmomentti:

$$M_{cr} := C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr}^2} \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{L_{cr}^2}{\pi^2} \cdot \frac{G \cdot I_T}{E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g)^2} - (C_2 \cdot z_g) \right) = 386.288 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\lambda_{LT} := \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = 1.153$$

$$\Phi_{LT} := 0.5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot (\lambda_{LT} - \lambda_{LT,0}) + \beta \cdot \lambda_{LT}^2) = 1.527$$

$$X_{LT} := \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \cdot \lambda_{LT}^2}} = 0.396$$

$$W_{el,y} := \frac{b_f \cdot h^2}{6} - \frac{(b_f - t_w) \cdot \left(\frac{(h - 2 \cdot t_f)^3}{h} \right)}{6} = (1.235 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

$$X_{min} := \min(X_y, X_z, X_{LT}) = 0.279$$

$$N_{Rk} := A \cdot f_y = 2532.378 \text{ kN}$$

Hitsatut profiilit taulukko 2.21
s. 196

$$k_{yy} := C_{my} \cdot \left(1 + 0.6 \cdot \lambda_y \cdot \frac{N_{Ed}}{X_{min} \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right) = 0.407 \leq C_{my} \cdot \left(1 + 0.6 \cdot \frac{N_{Ed}}{X_{min} \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right) = 0.433$$

Kuormien aiheuttama taivutusmomentti vahvemman akselin suhteen, joten $M_{z,Ed} := 0$

$$M_{b,Rd,y} := \frac{N_{Ed}}{X_{min} \cdot \frac{A \cdot f_y}{Y_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{X_{LT} \cdot \frac{W_{el,y} \cdot f_y}{Y_{M1}}} = 0.938 \leq 1.0 \quad \text{Taivutusnurjahdus y-suuntaan OK!}$$

Heikomman akselin suhteen: (z-akseli)

$$k_{zy} := 0.8 \cdot k_{yy} = 0.326$$

$$M_{b,Rd,z} := \frac{N_{Ed}}{X_{min} \cdot \frac{A \cdot f_y}{Y_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{X_{LT} \cdot \frac{W_{el,y} \cdot f_y}{Y_{M1}}} = 0.778 \leq 1.0 \quad \text{Taivutusnurjahdus z-suuntaan OK!}$$

YHTEENVETO:

$M_{c,Rd} = 438.506 \text{ kN}\cdot\text{m}$	>	$M_{Ed} = 342 \text{ kN}\cdot\text{m}$	Taivutuskestävyys OK!
$V_{pl,Rd} = 804.15 \text{ kN}$	>	$V_{Ed} = 124 \text{ kN}$	Leikkauskestävyys OK!
$V_{b,Rd} = 602.401 \text{ kN}$	>	$V_{Ed} = 124 \text{ kN}$	Leikkauslommahduskestävyys OK!
$M_{b,Rd} = 383.977 \text{ kN}\cdot\text{m}$	>	$M_{Ed} = 342 \text{ kN}\cdot\text{m}$	Kiepahduskestävyys OK!
$N_{pl,Rd} = 1392.828 \text{ kN}$	>	$N_{Ed} = 96 \text{ kN}$	Nurjahduskestävyys OK!

Normaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutus OK!

Pilarin mitoitus

Kehän vasemman pilarin mitoitus:

Tarkastellaan kehän vasemman pilarin kestävyys ylänurkassa, missä suurin taivutusmomentti. Profiilin korkeus otettu kohtisuoralta etäisyydeltä sisäkulmasta palkin päälle. $h=574\text{mm}$

Mitoitus kuormitusyhdistelmän KY7 kuormitukselle.

Lähtötiedot:

$$L := 4.753 \text{ m} \quad k := 5 \text{ m}$$

Materiaalitiedot

Teräksen myötölujuus

$$f_y := 355 \text{ MPa}$$

Kimmokerroin:

$$E := 210 \text{ GPa}$$

Liukkerroin:

$$G := 81 \text{ GPa}$$

Myötövenymä:

$$\varepsilon := \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_y}} = 0.814$$

Osavarmuusluvut:

$$Y_{M0} := 1.0 \quad Y_{M1} := 1.0 \quad Y_{M2} := 1.25$$

Kuormat:

$$M_{Ed} := 310 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$N_{Ed} := 195 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} := 92 \text{ kN}$$

Poikkileikkaus: WI574-7.1-10.7x150

$$h := 574 \text{ mm}$$

Korkeus, vähennettynä vahvikeosan toinen laippa

$$b_f := 150 \text{ mm}$$

Leveys

$$t_f := 10.7 \text{ mm}$$

Laipan paksuus

$$t_w := 7.1 \text{ mm}$$

Uuman paksuus

$$a := 4 \text{ mm}$$

Kaulahitsin mitta

$$h_w := h - 2 \cdot t_f = 552.6 \text{ mm}$$

Laippojen välinen etäisyys

$$h_f := h - t_f = 563.3 \text{ mm}$$

Laippojen painopisteiden välinen etäisyys

$$c_f := \frac{b_f - t_w}{2} - \sqrt{2} \cdot a = 65.793 \text{ mm} \quad \text{Laipan tehollinen leveys}$$

$$b_w := h - 2 \cdot (t_f + \sqrt{2} \cdot a) = 541.286 \text{ mm} \quad \text{Uuman tehollinen korkeus}$$

$$I_y := \frac{b_f \cdot h^3}{12} - \frac{(b_f - t_w) \cdot (h - 2 \cdot t_f)^3}{12} = 354510594.3 \text{ mm}^4 \quad \text{Neliömomentti y-akselin suhteen}$$

$$I_z := \frac{h \cdot b_f^3}{12} - \frac{(h - t_f) \cdot (b_f - 2 \cdot t_w)^3}{12} = 43877977.1 \text{ mm}^4 \quad \text{Neliömomentti z-akselin suhteen}$$

$$A_f := t_f \cdot b_f = 1605 \text{ mm}^2 \quad \text{Puristetun laipan ala}$$

$$A_w := t_w \cdot h_w = 3923.46 \text{ mm}^2 \quad \text{Puristetun uuman ala}$$

$$A := 2 \cdot A_f + A_w = 7133.46 \text{ mm}^2 \quad \text{Poikkileikkauksen ala}$$

Poikkileikkausluokka:Laippa:

$$\frac{c_f}{t_f} = 6.149 < 9 \cdot \varepsilon = 7.323 \quad \text{Poikkileikkausluokka 1 toteutuu}$$

Uuma: (taivutettu ja puristettu)

$$\sigma_N := \frac{N_{Ed}}{A} = 27.336 \text{ MPa} \quad \text{Puristuksen aiheuttama jännitys}$$

$$e := \frac{\sigma_N \cdot I_y}{M_{Ed}} = 31.261 \text{ mm} \quad \text{Momentin aiheuttama jännitys, jonka nollakohta voidaan selvittää kyseisellä kaavalla:}$$

$$\alpha := 0.5 \cdot \frac{h_w + e}{h_w} = 0.528$$

$$\frac{h_w}{t_w} = 77.831 > \frac{456 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1} = 63.229 \quad \text{Poikkileikkausluokka 2 ei toteudu}$$

$$\psi := \frac{2 \cdot I_y \cdot N_{Ed} - A \cdot M_{Ed} \cdot h_w}{2 \cdot I_y \cdot N_{Ed} + A \cdot M_{Ed} \cdot h_w} = -0.797 > -1 \quad \text{Jännityssuhde}$$

$$\frac{h_w}{t_w} = 77.831 < \frac{42 \cdot \varepsilon}{0.67 + 0.33 \cdot \psi} = 83.943 \quad \text{Poikkileikkausluokka 3 toteutuu}$$

Pilarin poikkileikkausluokka sama kuin palkilla, eli 3**Pilarin puristuskestävyys:** (Yläraja)

$$N_{c,Rd} := \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 2532.378 \text{ kN}$$

Poikkileikkauksen puristuskestävyys

Puristuskestävyyden käyttöaste:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = 0.077 \leq 1.0 \quad \text{Puristuskestävyys OK!}$$

Poikkileikkauksen taivutuskestävyys:

$$W_{pl,y} := \frac{(b_f \cdot h^2)}{4} - \frac{(b_f - t_w) \cdot (h - 2 \cdot t_f)^2}{4} = (1.446 \cdot 10^6) \text{ mm}^3 \quad \text{Plastisuusteorian mukainen taivutusvastus}$$

$$M_{c,Rd} := W_{pl,y} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 513.373 \text{ kN} \cdot \text{m} > M_{Ed} = 310 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \text{OK!}$$

Taivutuskestävyyden käyttöaste:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = 0.604 \leq 1.0 \quad \text{Taivutuskestävyys OK!}$$

Pilarin nurjahduskestävyys:

$$L_{cr} := L = 4753 \text{ mm} \quad \text{Käytetään nurjahduspituutena } 1.0 \times L$$

$$\lambda_1 := 93.9 \cdot \varepsilon = 76.399$$

$$i_y := \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 222.928 \text{ mm} \quad \text{Poikkileikkauksen jäyhyyssäde y-akselin suhteen}$$

$$i_z := \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 78.428 \text{ mm} \quad \text{Poikkileikkauksen jäyhyyssäde z-akselin suhteen}$$

$$r_0 := \sqrt{i_y^2 + i_z^2} = 236.322 \text{ mm}$$

$$i := i_y^2 + i_z^2 + r_0^2 = (1.117 \cdot 10^5) \text{ mm}^2 \quad \text{Hitaus-/vääntöjäyhyysäde}$$

$$\lambda := \frac{L_{cr}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = 0.793 \quad \text{Muunnettu hoikkuus}$$

$$\text{Kun: } t_f = 10.7 \text{ mm} \leq 40 \text{ mm} \quad \text{EN 1993-1-1, Taulukko 6.2}$$

$$\text{y-y akselin nurjahduskäyrä: } \mathbf{b} \Rightarrow \text{Epätarkkuustekijä: } \alpha_y := 0.34$$

$$\text{z-z akselin nurjahduskäyrä: } \mathbf{c} \Rightarrow \text{Epätarkkuustekijä: } \alpha_z := 0.49 \quad \leq \text{ käytetään}$$

$$\Phi := 0.5 \cdot (1 + \alpha_z \cdot (\lambda - 0.2) + \lambda^2) = 0.96$$

$$\text{kun } \lambda > 0.2$$

$$\chi := \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = 0.666 \quad \text{kuitenkin aina } \leq 1$$

Taivutusnurjahdus heikomman z-z akselin suhteen:

$$N_{b,Rd} := \chi \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 1687.566 \text{ kN} \quad \text{Nurjahduskestävyyden mitoitusarvo}$$

Pilarin nurjahduskestävyys: (Taivutusvääntönurjahdus)

$$L_{cr,T} := L = 4753 \text{ mm} \quad \text{Nurjahduspituus}$$

$$i_y := \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 222.928 \text{ mm} \quad \text{Poikkileikkauksen jäyhyyssäde y-akselin suhteen}$$

$$i_z := \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 78.428 \text{ mm} \quad \text{Poikkileikkauksen jäyhyyssäde z-akselin suhteen}$$

$$r_0 := \sqrt{i_y^2 + i_z^2} = 236.322 \text{ mm}$$

$$i := i_y^2 + i_z^2 + r_0^2 = (1.117 \cdot 10^5) \text{ mm}^2 \quad \text{Hitaus-/vääntöjäyhyysäde}$$

$$\lambda_1 := 93.9 \cdot \varepsilon = 76.399$$

$$\lambda := \frac{L_{cr}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = 0.793 \quad \text{Muunnettu hoikkuus}$$

$$\text{Kun: } t_f = 10.7 \text{ mm} \leq 40 \text{ mm} \quad \text{EN 1993-1-1, Taulukko 6.2}$$

$$\text{y-y akselin nurjahduskäyrä: } \mathbf{b} \Rightarrow \text{Epätarkkuustekijä: } \alpha_y := 0.34$$

$$\text{z-z akselin nurjahduskäyrä: } \mathbf{c} \Rightarrow \text{Epätarkkuustekijä: } \alpha_z := 0.49$$

$$\phi := 0.5 \cdot (1 + \alpha_z \cdot (\lambda - 0.2) + \lambda^2) = 0.96$$

kun $\lambda > 0.2$

$$\chi := \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = 0.666 \quad \text{kuitenkin aina } \leq 1$$

Vääntönurjahdustarkastelu:

$$h_s := h_f = 563.3 \text{ mm}$$

$$I_w := \left(\frac{h_s}{2}\right)^2 \cdot I_z = (3.481 \cdot 10^{12}) \text{ mm}^6$$

$$I_T := 165.42 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$N_{cr,T} := \frac{1}{i_z^2 + i_y^2} \cdot \left(G \cdot I_T + \left(\frac{\pi}{L_{cr,T}}\right)^2 \cdot E \cdot I_w \right) = 8117.183 \text{ kN}$$

Kaksoissymmetrinen profiili, jolloin:

$$N_{cr,z} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr}^2} = 4025.594 \text{ kN} \quad N_{cr,y} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr}^2} = 32524.65 \text{ kN}$$

$$\lambda_T := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} = 0.793$$

$$N_{cr,TF} := N_{cr,z} = 4025.594 \text{ kN} \quad \text{Kuitenkin aina} \quad N_{cr,TF} < N_{cr,T}$$

$$\Phi_T := 0.5 \cdot (1 + \alpha_z \cdot (\lambda_T - 0.2) + \lambda_T^2) = 0.96$$

kun $\lambda > 0.2$

$$\chi_T := \frac{1}{\Phi_T + \sqrt{\Phi_T^2 - \lambda_T^2}} = 0.666 \quad \text{kuitenkin aina} \leq 1$$

$$N_{T,b,Rd} := \chi_T \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 1687.74 \text{ kN}$$

Vääntönurjahduskestävyyden mitoitusarvo

$$N_{T,b,Rd} = 1687.74 \text{ kN} > N_{b,Rd} = 1687.566 \text{ kN}$$

=> taivutusnurjahtaa, ei taivutusvääntönurjahda

Yhteisvaikutustekijät: PLL 3

$$C_{my} := 0.6 + 0.4 \cdot \psi = 0.281 \leq 0.4$$

Ekvivaletti momentin kerroin
Taulukko 2.24 Hitsatut profiilit s.200

$$\Rightarrow C_{my} := 0.4$$

$$\lambda_y := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = 0.279$$

$$\Phi_y := 0.5 \cdot (1 + \alpha_y \cdot (\lambda_y - 0.2) + \lambda_y^2) = 0.552$$

$$\chi_y := \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \lambda_y^2}} = 0.972$$

$$N_{Rk} := A \cdot f_y = 2532.378 \text{ kN}$$

$$k_{yy} := C_{my} \cdot \left(1 + 0.6 \cdot \lambda_y \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0.405 \leq C_{my} \cdot \left(1 + 0.6 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0.419$$

Vahvemman akselin suhteen: (y-akseli)

$$\Delta M_{y,Ed} := 0 \quad \text{PLL 3}$$

$$M_{y,Ed} := M_{Ed} = 310 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$\lambda_{LT,0} := 0.2$ $\beta := 1.0$ Kansainvälisesti valittavia parametreja, Suomessa:
Hitsatut kaksoisymmetriset I-profiilit
Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus s. 58

$$\frac{h}{b_f} = 3.827 > 2 \quad \text{Hitsattu I-profiili} \Rightarrow \text{Kiepahduskäyrä: d}$$

\Rightarrow Epätarkkuustekijä: $\alpha_{LT} := 0.76$

$$W_y := \frac{b_f \cdot h^2}{4} - \frac{(b_f - t_w) \cdot (h - 2 \cdot t_f)^2}{4} = (1.446 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

$k_z := 1$ $k_w := 1$ Käytetään arvoja joissa oletetaan kiertymien ja käyristymien mahdollisuus.

$$\Rightarrow C_1 := 1.132 \quad C_2 := 0.459 \quad C_3 := 0.525$$

$$z_g := \frac{h}{2} = 287 \text{ mm}$$

$z_{LT} := 0$ Kaksoisymmetrinen profiili

$\Rightarrow C_3$ arvosta tulee 0, joten on jätetty pois kiepahdusmomentin kaavasta.

Kiepahdusmomentti:

$$M_{cr} := C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr}^2} \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{L_{cr}^2}{\pi^2} \cdot \frac{G \cdot I_T}{E \cdot I_z}} + (C_2 \cdot z_g)^2 - (C_2 \cdot z_g) \right) = 1042.514 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\lambda_{LT} := \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = 0.702$$

$$\Phi_{LT} := 0.5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot (\lambda_{LT} - \lambda_{LT,0}) + \beta \cdot \lambda_{LT}^2) = 0.937$$

$$X_{LT} := \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \cdot \lambda_{LT}^2}} = 0.642$$

$$W_{el,y} := \frac{b_f \cdot h^2}{6} - \frac{(b_f - t_w) \cdot \left(\frac{(h - 2 \cdot t_f)^3}{h} \right)}{6} = (1.235 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

$$M_{b,Rd,y} := \frac{N_{Ed}}{X_y \cdot \frac{A \cdot f_y}{Y_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{X_{LT} \cdot \frac{W_{el,y} \cdot f_y}{Y_{M1}}} = 0.526 \leq 1.0 \quad \text{Taivutusnurjahdus y-suuntaan OK!}$$

Heikomman akselin suhteen: (z-akseli)

$$k_{zy} := 0.8 \cdot k_{yy} = 0.324$$

$$M_{b,Rd,z} := \frac{N_{Ed}}{X_y \cdot \frac{A \cdot f_y}{Y_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{X_{LT} \cdot \frac{W_{el,y} \cdot f_y}{Y_{M1}}} = 0.436 \leq 1.0 \quad \text{Taivutusnurjahdus z-suuntaan OK!}$$

Leikkauskestävyys:

$$A_v := A_w = 3923.46 \text{ mm}^2$$

Vain uuma huomioitu

$$V_{pl,Rd} := A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}} = 804.15 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} = 0.114 \leq 1.0$$

Leikkauskestävyys OK!**Nurjahduskestävyyden käyttöaste:**

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = 0.116 \leq 1.0$$

Nurjahduskestävyys OK!**YHTEENVETO:**

$$N_{c,Rd} = 2532.378 \text{ kN} > N_{Ed} = 195 \text{ kN} \quad \text{Puristuskestävyys OK!}$$

$$M_{c,Rd} = 513.373 \text{ kN} \cdot \text{m} > M_{y,Ed} = 310 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \text{Taivutuskestävyys OK!}$$

$$N_{b,Rd} = 1687.566 \text{ kN} > N_{Ed} = 195 \text{ kN} \quad \text{Nurjahduskestävyys OK!}$$

$$V_{pl,Rd} = 804.15 \text{ kN} > V_{Ed} = 92 \text{ kN} \quad \text{Leikkauskestävyys OK!}$$

Yhdistetty kiepahdus-, taivutus- ja puristuskestävyys OK!

$$M_{b,Rd,y} = 0.526 < 1.0$$

Harjaliitoksen mitoitus

Kehän harjaliitoksen mitoitus:

Jäykkä palkki-palkki liitos

Lähtötiedot:

Ruuvit M 20, 8.8

6 kpl

$d := 20 \text{ mm}$

$d_0 := d + 2 \text{ mm} = 22 \text{ mm}$

$f_{ub} := 800 \text{ MPa}$

$f_{yb} := 640 \text{ MPa}$

$Y_{M0} := 1.0$ $Y_{M2} := 1.25$

$f_y := 355 \text{ MPa}$

IPE:n myötölujuus

$f_{y,pl} := 355 \text{ MPa}$

Levyn myötölujuus

$f_u := 510 \text{ MPa}$

IPE:n vetomurtolujuus

$f_{u,pl} := 510 \text{ MPa}$

Levyn vetomurtolujuus

$t_w := 7.1 \text{ mm}$

IPE:n uuman paksuus

$t_p := 15 \text{ mm}$

Levyn uuman paksuus

Profiili:

$h := 300 \text{ mm}$

Korkeus

$b_f := 150 \text{ mm}$

Leveys

$t_f := 10.7 \text{ mm}$

Laipan paksuus

$t_w := 7.1 \text{ mm}$

Uuman paksuus

$a := 4 \text{ mm}$

Kaulahitsin mitta

$h_f := h - t_f = 289.3 \text{ mm}$

Laippojen painopisteiden
välinen etäisyys

$c := \frac{b_f - t_w}{2} - \sqrt{2} \cdot a = 65.793 \text{ mm}$

Laipan tehollinen leveys

$b_w := h - 2 \cdot (t_f + \sqrt{2} \cdot a) = 267.286 \text{ mm}$

Uuman tehollinen leveys

$\varepsilon := \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_y}} = 0.814$

$A := 5188.06 \text{ mm}^2$

Profiilin tehollinen pinta-ala

$W_{el,y} := \frac{b_f \cdot h^2}{6} - \frac{(b_f - t_w) \cdot \frac{(h - 2 \cdot t_f)^3}{h}}{6} = 533265.796 \text{ mm}^3$

Kimmoinen taivutusvastus y-
akselin suhteen

Päätylevyn mitat ja liitoksen geometria:

$b_p := 500 \text{ mm}$	Päätylevyn korkeus
$t_p := 15 \text{ mm}$	Levyn paksuus
$h_w := 261 \text{ mm}$	Uuman tehollinen korkeus
$a_f := a = 4 \text{ mm}$	Pienahitsin paksuus
$e_x := 50 \text{ mm}$	Reiän etäisyys alareunasta
$e := 30 \text{ mm}$	Reiän etäisyys sivulta
$e_{min} := e = 30 \text{ mm}$	Pienin reiän etäisyys
$w := 90 \text{ mm}$	Reikien väli
$s := w = 90 \text{ mm}$	Reikien väli

Reunaetäisyyksien tarkastus:

$e_1 := 30 \text{ mm}$	\geq	$1.2 \cdot d_0 = 26.4 \text{ mm}$	$E := 210 \text{ GPa}$
$e_2 := 90 \text{ mm}$	\geq	$1.2 \cdot d_0 = 26.4 \text{ mm}$	$I := 8356 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$
$p_1 := 80 \text{ mm}$	\geq	$2.2 \cdot d_0 = 48.4 \text{ mm}$	$L := 15300 \text{ mm}$
$p_2 := 170 \text{ mm}$	\geq	$2.4 \cdot d_0 = 52.8 \text{ mm}$	

Rasitukset:

$M_{Ed} := 123 \text{ kN} \cdot \text{m}$	Taivutusmomentti
$N_{Ed} := 57 \text{ kN}$	Normaalivoima
$V_{Ed} := 39 \text{ kN}$	Leikkausvoima
$e_e := 50 \text{ mm}$	Epäkeskisyyys
$M_{Ed,2} := V_{Ed} \cdot e_e = 1.95 \text{ kN} \cdot \text{m}$	Epäkeskisyydestä johtuva lisämomentti
$M_{Ed,tot} := M_{Ed} + M_{Ed,2} = 124.95 \text{ kN} \cdot \text{m}$	Liitoksen taivutusmomentti

Ruuvit: M20 8.8

$$d := 20 \text{ mm} \quad d_0 := d + 2 \text{ mm} = 22 \text{ mm}$$

$$f_{ub} := 800 \text{ MPa} \quad f_{yb} := 640 \text{ MPa}$$

$$k_2 := 0.9$$

Ei uppokantaisia ruuveja

$$\alpha_v := 0.6$$

Lujuusluokka 8.8

$$A_s := \frac{0.78 \cdot \pi \cdot d^2}{4} = 245.044 \text{ mm}^2$$

Leikkauspinta ruuvin kierteellisellä osalla: 0,78-kerroin

$$F_{v,Rd} := \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{Y_{M2}} = 94.097 \text{ kN}$$

Leikkauskestävyys leikettä kohti

$$F_{t,Rd} := \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{Y_{M2}} = 141.145 \text{ kN}$$

Yhden ruuvin vetokestävyys

$$F_{v,Ed} := V_{Ed} = 39 \text{ kN}$$

Ruuvien leikkausvoiman mitoitussarvo murtorajatilassa

$$F_{t,Ed} := N_{Ed} = 57 \text{ kN}$$

Ruuvien vetovoiman mitoitussarvo murtorajatilassa

$$k_1 := \min \left(2.8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1.7, 1.4 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1.7, 2.5 \right) = 2.5$$

Apumuuttuja kohtisuoriin voimiin

$$\alpha_b := \min \left(\frac{f_{ub}}{f_u}, 1.0 \right) = 1$$

Apumuuttuja siirrettävän voiman suuntaan

$$F_{b,Rd} := \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t_p}{Y_{M2}} = 306 \text{ kN}$$

Reunapuristuskestävyys

$$F_{v,Rd} := \min(F_{v,Rd}, F_{b,Rd}) = 94.097 \text{ kN}$$

Ruuvien määräävä leikkauskapasiteetti

Ruuvien yhdistetty leikkaus- ja vetokestävyys:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4 \cdot F_{t,Rd}} = 0.703 \leq 1.0 \quad \text{OK!}$$

Päätylevy:

$$t_p := 15 \text{ mm}$$

Valittu paksuus päätylevylle

$$p := 250 \text{ mm}$$

Ylemmän vedetyn ruuvirivin etäisyys levyn alareunasta

$u := 200 \text{ mm}$	Levyn alareunan etäisyys palkin laipasta
$a := 5 \text{ mm}$	Hitsin a-mitta
$w = 90 \text{ mm}$	Päätylevy ja palkki yhtä leveitä
$m := \frac{w - t_w}{2} - 0.8 \cdot \sqrt{2} \cdot a = 35.793 \text{ mm}$	
$e_p := \frac{b_p - w}{2} = 205 \text{ mm}$	Päätylevy ja palkki yhtä leveitä
$m_p := p - u - t_w - 0.8 \cdot \sqrt{2} \cdot a = 37.243 \text{ mm}$	
$e_p := \frac{b_p - w}{2} = 205 \text{ mm}$	Päätylevy ja palkki yhtä leveitä
$\lambda_{1,p} := \frac{m}{m + e_p} = 0.149$	
$\lambda_{2,p} := \frac{m_p}{m + e_p} = 0.155$	$\Rightarrow \alpha := 4.45$ EN 1993-1-8 Kuva 6.11 s.88
$e_x = 50 \text{ mm}$	Palkin päätylevyn reunan etäisyys alimman reiän keskeltä
$m_x := u - e_x - 0.8 \cdot \sqrt{2} \cdot a = 144.343 \text{ mm}$	Palkin päätylevyn osalle käytetty mitta laipasta reiän keskelle
$n := e_{min} = 30 \text{ mm}$	

Päätylevyn T-osan vetokestävyys:

s.161, jrc_steel-kirja

Teholliset leveydet ruuviriville 1 ja 3: (Ylin ja alin ruuvirivi)

Pyöreät myötöviivakuviot

$$l_{eff1,cp} := 2 \cdot \pi \cdot m = 224.895 \text{ mm}$$

Muut myötöviivakuviot

$$l_{eff1,nc} := 4 \cdot m + 1.25 \cdot e_x = 205.673 \text{ mm}$$

Teholliset leveydet ruuviriville 2: (Keskimmäinen ruuvirivi)

Pyöreät myötöviivakuviot

$$l_{eff2,cp} := 2 \cdot \pi \cdot m = 224.895 \text{ mm}$$

Muut myötöviivakuviot

$$l_{eff2.nc} := 4 \cdot m + 1.25 \cdot e_x = 205.673 \text{ mm}$$

$$l_{eff.1} := \min(l_{eff1.nc}, l_{eff1.cp}, l_{eff2.nc}, l_{eff2.cp}) = 205.673 \text{ mm}$$

$$l_{eff.2} := \min(l_{eff1.nc}, l_{eff2.nc}) = 205.673 \text{ mm}$$

Tarkastus syntyykö päätylevyn ruuvikiinnityksiin vipuvoimia:

$$n := e_{min} = 30 \text{ mm} \leq 1.25 \cdot m_p = 46.554 \text{ mm} \quad \text{OK!}$$

$$t_{bp} := 0.2 \cdot d = 4 \text{ mm}$$

Aluslaatan paksuus, likiarvo
Hitsatut profiilit s.311

$$h_{ruuvi} := 0.63 \cdot d = 12.6 \text{ mm}$$

Ruuvien kannan paksuus, likiarvo
Hitsatut profiilit s.311

$$h_{mutteri} := 0.63 \cdot d = 12.6 \text{ mm}$$

Mutterin paksuus, likiarvo
Hitsatut profiilit s.311

$$F_{t.Rd} = 141.145 \text{ kN}$$

Yhden ruuvien vetokestävyys

$$t_p = 15 \text{ mm} \geq 6.1 \text{ mm}$$

Lävistymiskestävyys ei määräävä
Hitsatut profiilit, Taulukko 3.18 s.337

$$L_b^a := \frac{8.8 \cdot m_p^3 \cdot A_s}{l_{eff.1} \cdot t_p^3} = 160.478 \text{ mm}$$

$$L_b := 2 \cdot t_p + h_{ruuvi} + h_{mutteri} + 2 \cdot t_{bp} = 63.2 \text{ mm}$$

Ruuvien venymäpituus

$$k_{10} := \frac{1.6 \cdot A_s}{L_b} = 6.204 \text{ mm}$$

Liitosluokituksen tarkistukseen

$$L_b = 63.2 \text{ mm} < L_b^a = 160.478 \text{ mm}$$

=> vipuvoimia voi syntyä.

Ekvivalentti T-osan murtumismuodot, vipuvoimia varten:

$$f_{y.bp} := f_{y.pl} = 355 \text{ MPa}$$

$$M_{pl.1.Rd} := 0.25 \cdot l_{eff.1} \cdot t_p^2 \cdot \frac{f_{y.pl}}{Y_{M0}} = 4.107 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{bp.Rd} := 0.25 \cdot l_{eff.1} \cdot t_{bp}^2 \cdot \frac{f_{y.bp}}{Y_{M0}} = 0.292 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$F_{T.1.Rd} := \frac{4 \cdot M_{pl.1.Rd} + 2 \cdot M_{bp.Rd}}{m} = 475.292 \text{ kN}$$

Murtumismalli 1, kun käytetään taustalevyjä

$$M_{pl.2.Rd} := 0.25 \cdot l_{eff.2} \cdot t_p^2 \cdot \frac{f_{y.pl}}{Y_{M0}} = 4.107 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$F_{T,2,Rd} := \frac{2 \cdot M_{pl,1,Rd} + n \cdot 2 \cdot F_{t,Rd}}{m + n} = 253.564 \text{ kN}$$

Murtumismalli 2

$$F_{T,3,Rd} := 2 \cdot F_{t,Rd} = 282.291 \text{ kN}$$

Murtumismalli 3

$$F_{t,ep,Rd} := \min(F_{T,1,Rd}, F_{T,2,Rd}, F_{T,3,Rd}) = 253.564 \text{ kN}$$

Taivutetun päätylevyn jäykkyys:

$$k_s := \frac{0.9 \cdot I_{eff,1} \cdot t_p^3}{m^3} = 13.6236 \text{ mm}$$

Liitosluokituksen tarkistukseen

Palkin puristetun laipan ja puristetun uuman osan yhdistetty kestävyys:

Palkin poikkileikkausluokka 2

$$M_{c,Rd} := 189 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Palkin PL-luokan mukainen taivutuskestävyys

$$z := 500 \text{ mm}$$

Momenttivarsi

$$F_{c,f,Rd} := \frac{M_{c,Rd}}{z} = 378 \text{ kN}$$

Palkin puristetun laipan ja puristetun uuman osan yhdistetty puristuskestävyys

$$b_{eff,t,w} := I_{eff,1} = 205.673 \text{ mm}$$

$$F_{t,w,Rd} := b_{eff,t,w} \cdot t_w \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 518.398 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} := \min(F_{T,1,Rd}, F_{T,2,Rd}, F_{T,3,Rd}, F_{c,f,Rd}, F_{t,w,Rd}) = 253.564 \text{ kN}$$

Ehto laskentamenetelmän käyttöille:

$$F_{Rd} = 253.564 \text{ kN} < 3.8 \cdot F_{t,Rd} = 536.353 \text{ kN} \quad \text{OK!}$$

Liitoksen taivutuskestävyys:

$$M_{j,Rd} := F_{Rd} \cdot z = 126.782 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{j,Rd}} = 0.97 < 1.0 \quad \text{OK!}$$

Liitoksen käyttöaste

$$416 \text{ mm} \cdot 241.17 \text{ kN} = 100.327 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$286 \text{ mm} \cdot 213.47 \text{ kN} = 61.052 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$100.327 \text{ kN} \cdot \text{m} + 61.052 \text{ kN} \cdot \text{m} + 18.358 \text{ kN} \cdot \text{m} = 179.737 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$86 \text{ mm} \cdot 213.47 \text{ kN} = 18.358 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Palkin uuman veto:

$$b_{eff.t.wb} := \min(l_{eff.1}, l_{eff.2}) = 205.673 \text{ mm}$$

$$F_{t.wb.Rd} := b_{eff.t.wb} \cdot t_w \cdot f_y = 518.398 \text{ kN}$$

Liitoslevyn leikkauskestävyys:

$$A_v := t_p \cdot b_p = 7500 \text{ mm}^2$$

Päätylevyn poikkileikkauksen
pinta-ala

$$V_{pl.Rd} := \frac{A_v \cdot f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = 1537.195 \text{ kN}$$

Plastinen kestävyys

$$V_{el.Rd} := V_{pl.Rd} \cdot \frac{2}{3} = 1024.797 \text{ kN}$$

Kimmainen kestävyys

Liitoslevyn hitsaus palkkiin:

$$\beta_w := 0.9$$

Kun teräs S355

$$L_w := 2 \cdot h = 600 \text{ mm}$$

Kaksoispienahitsi, huomioitu
vain palkin korkeudelta hitsi.
Olisi voinut ottaa alapuolen
lisälevyn mitan mukaan.

$$a_w := \frac{F_{Rd} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2} \cdot \sqrt{2}}{L_w \cdot f_u} = 1.318 \text{ mm}$$

Vaadittu hitsin a-mitta

$$a_{w.min} := 0.403 \cdot t_p = 6.045 \text{ mm}$$

Taulukon minimi-
suhdeluvun mukainen
minimi a-mitta

$$\Rightarrow \text{valitaan } a_w := 7 \text{ mm}$$

Liitosluokitus:

Palkkien jatkos, joissa käytetään ruuveilla kiinnitettyjä päätylevyjä.
Vedettyjen ruuvirivien määrä vähintään kaksi.

Huomioon otettavat tekijät:

k_i

$$l_{\text{eff.c}} := l_{\text{eff.1}} = 205.673 \text{ mm}$$

T-osan tehollinen leveys

$$I_y := 8356 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Jäyhyysmomentti

$$k_1 := \infty$$

Uuman leikkaus, jäykistetty

$$k_2 := \infty$$

Uuman puristus, jäykistetty

$$k_3 := \infty$$

Uuman veto, jäykistetty
hitsauskiinnitys

$$k_4 := 0.9 \cdot \frac{l_{\text{eff.c}} \cdot t_p^3}{m^3} = 13.624 \text{ mm}$$

Laipan taivutus

$$k_5 = 13.624 \text{ mm}$$

Päätylevyn taivutus (laskettu
aiemmin)

$$k_{10} = 6.204 \text{ mm}$$

Ruuvin veto (laskettu aiemmin)

$$k_{\text{eff.1}} := \frac{1}{\frac{1}{k_4} + \frac{1}{k_5} + \frac{1}{k_{10}}} = 3.247 \text{ mm}$$

Ruuvirivin 1 tehollinen
jäykkyystekijä

$$k_{\text{eff.2}} := \frac{1}{\frac{1}{k_4} + \frac{1}{k_5} + \frac{1}{k_{10}}} = 3.247 \text{ mm}$$

Ruuvirivin 2 tehollinen
jäykkyystekijä

$$k_{\text{eff.3}} := \frac{1}{\frac{1}{k_4} + \frac{1}{k_5} + \frac{1}{k_{10}}} = 3.247 \text{ mm}$$

Ruuvirivin 3 tehollinen
jäykkyystekijä

$$h_r := \frac{z}{2} = 250 \text{ mm}$$

$$z_{\text{eq}} := \frac{k_{\text{eff.1}} \cdot h_r^2 + k_{\text{eff.2}} \cdot h_r^2 + k_{\text{eff.3}} \cdot h_r^2}{k_{\text{eff.1}} \cdot h_r + k_{\text{eff.2}} \cdot h_r + k_{\text{eff.3}} \cdot h_r} = 250 \text{ mm}$$

Momenttivarsi (yksinkertaistettu)

$$k_{\text{eq}} := \frac{k_{\text{eff.1}} \cdot h_r + k_{\text{eff.2}} \cdot h_r + k_{\text{eff.3}} \cdot h_r}{z_{\text{eq}}} = 9.74 \text{ mm}$$

Ekvivalentti jäykkyystekijä

$$\mu := 1.0$$

Jäykkyyssuhde

$$S_{j.\text{ini}} := \frac{E \cdot z_{\text{eq}}^2}{\mu \cdot \frac{1}{k_{\text{eq}}}} = 127841.299 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

Kiertymisjäykkyyden alkuarvo

Luokitus:

$$k_b := 8$$

Sivusiirtymätön rakenne

$$I_b := I_y = 83560000 \text{ mm}^4$$

Palkin neliömomentti

$$L_b := 15300 \text{ mm}$$

Palkin pituus

Jäykän liitoksen raja-arvo:

$$S_{j,ini} = 127841.299 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

>

$$k_b \cdot \frac{E \cdot I_b}{L_b} = 9175.216 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

Liitoksen kiertymisjäykkyys suurempi, kuin raja-arvo => liitos luokitellaan jäykäksi

Täysin lujan liitoksen ehto:

$$M_{j,Rd} = 126.782 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

<

$$M_{b,pl,Rd} := M_{c,Rd} = 189 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pilari-palkkiliitoksen mitoitus

Kehän nurkan pilari-palkkiliitoksen mitoitus:

Jäykkä palkki-pilari liitos

Lähtötiedot:

Ruuvit M 20, 8.8 12 kpl

$d := 20 \text{ mm}$ $d_o := d + 2 \text{ mm} = 22 \text{ mm}$

$f_{ub} := 800 \text{ MPa}$ $f_{yb} := 640 \text{ MPa}$

$\gamma_{M0} := 1.0$ $\gamma_{M1} := 1.0$ $\gamma_{M2} := 1.25$

$f_y := 355 \text{ MPa}$ IPE:n myötölujuus $f_{y,pl} := 355 \text{ MPa}$ Levyn myötölujuus

$f_u := 510 \text{ MPa}$ IPE:n vetomurtolujuus $f_{u,pl} := 510 \text{ MPa}$ Levyn vetomurtolujuus

$t_w := 7.1 \text{ mm}$ IPE:n uuman paksuus $t_p := 15 \text{ mm}$ Levyn uuman paksuus

Profiili: (Pilari ja palkki samat) WI600-7.1-10.7x150

$h := 600 \text{ mm} - 10.7 \text{ mm} = 589.3 \text{ mm}$ Palkin korkeus, vähennetty vahvikkeen toinen laippa

$b_f := 150 \text{ mm}$ Palkin leveys

$t_f := 10.7 \text{ mm}$ Palkin laipan paksuus

$t_w := 7.1 \text{ mm}$ Palkin uuman paksuus

$a := 4 \text{ mm}$ Hitsin a-mitta

$h_f := h - t_f = 578.6 \text{ mm}$ IPE-palkin tehollinen korkeus

$c := \frac{b_f - t_w}{2} - \sqrt{2} \cdot a = 65.793 \text{ mm}$ Laipan tehollinen leveys

$b_w := h - 2 \cdot (t_f + \sqrt{2} \cdot a) = 556.586 \text{ mm}$ Uuman tehollinen korkeus

$\varepsilon := \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_y}} = 0.814$

$A := 5188.06 \text{ mm}^2$ Profiilin tehollinen pinta-ala

$W_{el,y} := \frac{b_f \cdot h^2}{6} - \frac{(b_f - t_w) \cdot \frac{(h - 2 \cdot t_f)^3}{h}}{6} = 1279673.7 \text{ mm}^3$ PLL:n mukainen kimmainen taivutusvastus y-akselin suhteen

Päätylevyn mitat ja liitoksen geometria:

$b_p := 150 \text{ mm}$	Levyn leveys
$t_p := 20 \text{ mm}$	Levyn paksuus
$h_w := h - 2 \cdot t_f = 567.9 \text{ mm}$	Uuman tehollinen korkeus
$a_f := 6 \text{ mm}$	Pienahitsin paksuus
$e_x := 100 \text{ mm}$	Reiän etäisyys alareunasta
$e := 30 \text{ mm}$	Reiän etäisyys sivulta
$e_{min} := e = 30 \text{ mm}$	Pienin reiän etäisyys
$w := 90 \text{ mm}$	Ruuvien väli laipan suunnassa
$m := \frac{w}{2} - t_w - (0.8 \cdot \sqrt{2} \cdot a) = 33.375 \text{ mm}$	Ruuvien etäisyys palkin uuman reunasta
$m_2 := 100 \text{ mm} - t_p - (0.8 \cdot \sqrt{2} \cdot a) = 75.475 \text{ mm}$	Ruuvien etäisyys laipan reunasta
$p := 90 \text{ mm}$	Ruuvien väli laipan suunnassa
$p_1 := 100 \text{ mm}$	Ruuvien väli uuman suunnassa
$p_2 := 150 \text{ mm}$	Keskimmäisten ruuvien väli uuman suunnassa
$\lambda_1 := \frac{m}{m + e} = 0.527$	
$\lambda_2 := \frac{m_2}{m + e} = 1.191$	$\Rightarrow \alpha := 5.2$
	EN 1993-1-8 Kuva 6.11 s.88

Reunaetäisyyksien tarkastus:

$$\begin{array}{llll}
 e_1 := 30 \text{ mm} & \geq & 1.2 \cdot d_0 = 26.4 \text{ mm} & E := 210 \text{ GPa} \\
 e_2 := 90 \text{ mm} & \geq & 1.2 \cdot d_0 = 26.4 \text{ mm} & I := 8356 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 \\
 p_1 := 100 \text{ mm} & \geq & 2.2 \cdot d_0 = 48.4 \text{ mm} & L := 15300 \text{ mm} \\
 p_2 := 150 \text{ mm} & \geq & 2.4 \cdot d_0 = 52.8 \text{ mm} &
 \end{array}$$

Rasitukset:

$$\begin{array}{ll}
 M_{Ed} := 342 \text{ kN} \cdot \text{m} & \text{Taivutusmomentti} \\
 N_{Ed} := 95 \text{ kN} & \text{Normaalivoima} \\
 V_{Ed} := 124 \text{ kN} & \text{Leikkausvoima}
 \end{array}$$

Kehän nurkan poikittaislevyn puristusvoima:

Teräsrakentaminen kirja s.92, esimerkki 8.2

$$\begin{array}{ll}
 M_{Ed} := 342 \text{ kN} \cdot \text{m} & \text{Nurkkaa rasittava taivutusmomentti} \\
 \alpha := 18^\circ & \text{Katon kaltevuuskulma} \\
 \Theta := 36^\circ & \text{Nurkan kulma toiseen suuntaan} \\
 F_{Ed} := \frac{M_{Ed} \cdot \cos(\alpha)}{h_f \cdot \cos(\Theta)} = 694.858 \text{ kN} & \text{Liitoslevyihin kohdistuva} \\
 & \text{normaalivoima} \\
 t_p := \sqrt{\frac{F_{Ed} \cdot m}{b_p \cdot f_{u,pl}}} = 17.411 \text{ mm} & \text{Päätylevyn vaadittu paksuus}
 \end{array}$$

Ruuvit: M20 8.8

$$d := 20 \text{ mm} \quad d_0 := d + 2 \text{ mm} = 22 \text{ mm}$$

$$f_{ub} := 800 \text{ MPa} \quad f_{yb} := 640 \text{ MPa}$$

$$k_2 := 0.9 \quad \text{Ei uppokantaisia ruuveja}$$

$$\alpha_v := 0.6 \quad \text{Lujuusluokka 8.8}$$

$$A_s := \frac{0.78 \cdot \pi \cdot d^2}{4} = 245.044 \text{ mm}^2 \quad \text{Leikkauspinta ruuvin kierteellisellä osalla: 0,78-kerroin}$$

$$F_{v,Rd} := \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{Y_{M2}} = 94.097 \text{ kN}$$

Leikkauskestävyys leikettä kohti

$$F_{v,Rd} := F_{v,Rd} \cdot 6 = 564.582 \text{ kN}$$

Leikkausvoima, kun puoliin ruuveista kohdistuu leikkaus

$$F_{t,Rd} := \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{Y_{M2}} = 141.145 \text{ kN}$$

Yhden ruuvin vetokestävyys

$$F_{t,Rd} := F_{t,Rd} \cdot 6 = 846.873 \text{ kN}$$

Vetokestävyys kun puolet ruuveista ottaa vedon vastaan

$$F_{v,Ed} := V_{Ed} = 124 \text{ kN}$$

Yhden ruuvin leikkausvoiman mitoitusarvo murtorajatilassa

$$F_{t,Ed} := N_{Ed} = 95 \text{ kN}$$

Yhden ruuvin vetovoiman mitoitusarvo murtorajatilassa

$$k_1 := \min \left(2.8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1.7, 1.4 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1.7, 2.5 \right) = 2.5$$

Apumuuttuja kohtisuoriin voimiin

$$\alpha_b := \min \left(\frac{f_{ub}}{f_u}, 1.0 \right) = 1$$

Apumuuttuja siirrettävän voiman suuntaan

$$F_{b,Rd} := \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t_p}{Y_{M2}} = 355.185 \text{ kN}$$

Reunapuristuskestävyys

$$F_{v,Rd} := \min (F_{v,Rd}, F_{b,Rd}) = 355.185 \text{ kN}$$

Ruuvien määräävä leikkaukspakiteetti

Ruuvien yhdistetty leikkaus- ja vetokestävyys:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4 \cdot F_{t,Rd}} = 0.429 \leq 1.0 \quad \text{OK!}$$

Päätylevyn T-osan vetokestävyys:

s.161, jrc_steel-kirja

Teholliset leveydet ruuviriville 1 ja 6: (Ylin ja alin ruuvirivi)

Pyöreät myötöviivakuviot

$$l_{eff1,cp} := 2 \cdot \pi \cdot m_2 = 474.22 \text{ mm}$$

Muut myötöviivakuviot

$$l_{eff1,nc} := 4 \cdot m_2 + 1.25 \cdot e = 339.398 \text{ mm}$$

Teholliset leveydet ruuviriville 2-5: (Keskimäinen ruuvirivi)

Pyöreät myötöviivakuviot

$$l_{eff2,cp} := 2 \cdot \pi \cdot m_2 = 474.22 \text{ mm}$$

Muut myötöviivakuviot

$$l_{eff2.nc} := 4 \cdot m_2 + 1.25 \cdot e = 339.398 \text{ mm}$$

$$l_{eff.1} := \min(l_{eff1.nc}, l_{eff1.cp}, l_{eff2.nc}, l_{eff2.cp}) = 339.398 \text{ mm}$$

$$l_{eff.2} := \min(l_{eff1.nc}, l_{eff2.nc}) = 339.398 \text{ mm}$$

Tarkastus syntyykö päätylevyn ruuvikiinnityksiin vipuvoimia:

$$n := e_{min} = 30 \text{ mm} \leq 1.25 \cdot m = 41.718 \text{ mm} \quad \text{OK!}$$

$$t_{bp} := 0.2 \cdot d = 4 \text{ mm}$$

Aluslaatan paksuus, likiarvo
Hitsatut profiilit s.311

$$h_{ruuvi} := 0.63 \cdot d = 12.6 \text{ mm}$$

Ruuvin kannan paksuus, likiarvo
Hitsatut profiilit s.311

$$h_{mutteri} := 0.63 \cdot d = 12.6 \text{ mm}$$

Mutterin paksuus, likiarvo
Hitsatut profiilit s.311

$$F_{t.Rd} = 846.873 \text{ kN}$$

Yhden ruuvin vetokestävyys

$$t_p = 17.411 \text{ mm} \geq 6.1 \text{ mm}$$

Lävistymiskestävyys ei määräävä
Hitsatut profiilit, Taulukko 3.18 s.337

$$L_b := \frac{8.8 \cdot m_2^3 \cdot A_s}{l_{eff.1} \cdot t_p^3} = 517.54 \text{ mm}$$

$$L_b := 2 \cdot t_p + h_{ruuvi} + h_{mutteri} + 2 \cdot t_{bp} = 68.022 \text{ mm}$$

Ruuvien venymäpituus

$$k_{10} := \frac{1.6 \cdot A_s}{L_b} = 5.764 \text{ mm}$$

Liitosluokituksen tarkistukseen

$$L_b = 68.022 \text{ mm} < L_b = 517.54 \text{ mm}$$

=> vipuvoimia voi syntyä

Ekvivalentti T-osan murtumismuodot, vipuvoimia varten:

$$f_{y.bp} := f_{y.pl} = 355 \text{ MPa}$$

$$M_{pl.1.Rd} := 0.25 \cdot l_{eff.1} \cdot t_p^2 \cdot \frac{f_{y.pl}}{Y_{MO}} = 9.131 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{bp.Rd} := 0.25 \cdot l_{eff.1} \cdot t_{bp}^2 \cdot \frac{f_{y.bp}}{Y_{MO}} = 0.482 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$F_{T.1.Rd} := \frac{4 \cdot M_{pl.1.Rd} + 2 \cdot M_{bp.Rd}}{m} = 1123.272 \text{ kN}$$

Murtumismalli 1, kun käytetään
taustalevyjä

$$M_{pl.2.Rd} := 0.25 \cdot l_{eff.2} \cdot t_p^2 \cdot \frac{f_{y.pl}}{Y_{MO}} = 9.131 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$F_{T.2.Rd} := \frac{2 \cdot M_{pl.1.Rd} + n \cdot 2 \cdot F_{t.Rd}}{m + n} = 1089.945 \text{ kN}$$

Murtumismalli 2

$$F_{T.3.Rd} := 2 \cdot F_{t.Rd} = 1693.746 \text{ kN}$$

Murtumismalli 3

$$F_{t.ep.Rd} := \min(F_{T.1.Rd}, F_{T.2.Rd}, F_{T.3.Rd}) = 1089.945 \text{ kN}$$

Taivutetun päätylevyn jäykkyys:

$$K_S := \frac{0.9 \cdot I_{eff.1} \cdot t_p^3}{m^3} = 43.3692 \text{ mm}$$

Liitosluokituksen tarkistukseen

Palkin puristetun laipan ja puristetun uuman osan yhdistetty kestävyys:

Palkin poikkileikkausluokka 3

$$M_{c.Rd} := 454 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Palkin PL-luokan mukainen taivutuskestävyys

$$z := 500 \text{ mm} - 2 \cdot 20 \text{ mm} - t_f = 449.3 \text{ mm}$$

Momenttivarsi

$$F_{c.f.Rd} := \frac{M_{c.Rd}}{z} = 1010.461 \text{ kN}$$

Palkin puristetun laipan ja puristetun uuman osan yhdistetty puristuskestävyys

$$b_{eff.t.w} := l_{eff.1} = 339.398 \text{ mm}$$

$$F_{t.w.Rd} := b_{eff.t.w} \cdot t_w \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 855.453 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} := \min(F_{T.1.Rd}, F_{T.2.Rd}, F_{T.3.Rd}, F_{c.f.Rd}, F_{t.w.Rd}) = 855.453 \text{ kN}$$

Ehto laskentamenetelmän käyttöille:

$$F_{Rd} = 855.453 \text{ kN} < 3.8 \cdot F_{t.Rd} = 3218.117 \text{ kN} \quad \text{OK!}$$

Liitoksen taivutuskestävyys:

$$M_{j.Rd} := F_{Rd} \cdot z = 384.355 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{j.Rd}} = 0.89 < 1.0 \quad \text{OK!}$$

Liitoksen käyttöaste

Palkin uuman veto:

$$b_{eff.t.wb} := \min(l_{eff.1}, l_{eff.2}) = 339.398 \text{ mm}$$

$$F_{t.wb.Rd} := b_{eff.t.wb} \cdot t_w \cdot f_y = 855.453 \text{ kN}$$

Liitoslevyn leikkauskestävyys:

$$A_v := t_p \cdot b_p = 2611.657 \text{ mm}^2$$

Päätylevyn poikkileikkauksen pinta-ala

$$V_{pl,Rd} := \frac{A_v \cdot f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = 535.284 \text{ kN}$$

Plastinen kestävyys

$$V_{el,Rd} := V_{pl,Rd} \cdot \frac{2}{3} = 356.856 \text{ kN}$$

Kimmainen kestävyys

Liitoslevyn hitsaus palkkiin:

$$\beta_w := 0.9$$

Kun teräs S355

$$L_w := 2 \cdot h = 1178.6 \text{ mm}$$

Kaksoispienahitsi, huomioitu vain palkin korkeudelta hitsi. Olisi voinut ottaa alapuolen lisälevyn mitan mukaan.

$$a_w := \frac{F_{Rd} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2} \cdot \sqrt{2}}{L_w \cdot f_u} = 2.264 \text{ mm}$$

Vaadittu hitsin a-mitta

$$a_{w,min} := 0.403 \cdot t_p = 7 \text{ mm}$$

Taulukon minimiäityksen suhdeluvun mukainen minimi a-mitta

$$\Rightarrow \text{valitaan } a_w := 7 \text{ mm}$$

Pilarin uuman leikkaus:

$$r_c := 15 \text{ mm}$$

Pyörityssäde

$$\eta := 1.0$$

$$A_v := A - 2 \cdot t_f \cdot b_p + (t_w + 2 \cdot r_c) \cdot t_f = 2375.03 \text{ mm}^2$$

$$W_{pl,Rd} := \frac{A_v \cdot f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = 486.785 \text{ kN}$$

$$\frac{d}{t_w} = 2.817$$

$$69 \cdot \varepsilon = 56.14$$

Pilarin uuman poikittainen puristus:

$$a_p := 4 \text{ mm}$$

Hitsin a-mitta

$$s_p := t_p = 17.411 \text{ mm}$$

Pituus vähintään

$$s := r_c = 15 \text{ mm}$$

I ja H profiilit

$$b_{\text{eff.c.wc}} := t_f + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_p + 5 \cdot (t_f + s) + s_p = 167.925 \text{ mm}$$

$$\omega := \frac{1}{\sqrt{1 + 1.3 \cdot \left(b_{\text{eff.c.wc}} \cdot \frac{t_w}{A_v} \right)^2}} = 0.868 \quad \text{kun} \quad \beta := 1$$

$$k_{\text{wc}} := 1$$

$$d_{\text{wc}} := h_w - 2 \cdot (t_f + r_c) = 516.5 \text{ mm}$$

$$\lambda_p := 0.932 \cdot \sqrt{\frac{b_{\text{eff.c.wc}} \cdot d_{\text{wc}} \cdot f_y}{E \cdot t_w^2}} = 1.589 \quad \text{Levyn hoikkuus}$$

$$\rho := \frac{\lambda_p - 0.2}{\lambda_p^2} = 0.55 \quad \text{Lommauksen huomioiva kerroin}$$

$$F_{\text{v.wc.Rd}} := \frac{\omega \cdot k_{\text{wc}} \cdot \rho \cdot b_{\text{eff.c.wc}} \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 202.027 \text{ kN}$$

Liitosluokitus:

Palkki-pilariliitokset, joissa käytetään ruuveilla kiinnitettyjä päätälevyjä. Vedettyjen ruuvirivien määrä vähintään kaksi.

Huomioon otettavat tekijät:

 k_i

$$l_{\text{eff.c}} := l_{\text{eff.1}} = 339.398 \text{ mm} \quad \text{T-osan tehollinen leveys}$$

$$I_y := 377055855.6 \text{ mm}^4 \quad \text{Jäyhyysmomentti}$$

$$k_1 := \infty \quad \text{Uuman leikkaus, jäykistetty}$$

$$k_2 := \infty \quad \text{Uuman puristus, jäykistetty}$$

$$k_3 := \infty \quad \text{Uuman veto, jäykistetty hitsauskiinnitys}$$

$$k_4 := 0.9 \cdot \frac{l_{\text{eff.c}} \cdot t_p^3}{m^3} = 43.369 \text{ mm} \quad \text{Laipan taivutus}$$

$$k_5 = 43.369 \text{ mm} \quad \text{Päätälevyn taivutus (laskettu aiemmin)}$$

$$k_{10} = 5.764 \text{ mm} \quad \text{Ruuvin veto (laskettu aiemmin)}$$

$$k_{\text{eff},1} := \frac{1}{\frac{1}{k_4} + \frac{1}{k_5} + \frac{1}{k_{10}}} = 4.554 \text{ mm}$$

Ruuvirivin 1 tehollinen jäykkyystekijä

$$k_{\text{eff},2} := \frac{1}{\frac{1}{k_4} + \frac{1}{k_5} + \frac{1}{k_{10}}} = 4.554 \text{ mm}$$

Ruuvirivin 2 tehollinen jäykkyystekijä

$$k_{\text{eff},3} := \frac{1}{\frac{1}{k_4} + \frac{1}{k_5} + \frac{1}{k_{10}}} = 4.554 \text{ mm}$$

Ruuvirivin 3 tehollinen jäykkyystekijä

$$h_r := \frac{z}{2} = 224.65 \text{ mm}$$

$$z_{\text{eq}} := \frac{k_{\text{eff},1} \cdot h_r^2 + k_{\text{eff},2} \cdot h_r^2 + k_{\text{eff},3} \cdot h_r^2}{k_{\text{eff},1} \cdot h_r + k_{\text{eff},2} \cdot h_r + k_{\text{eff},3} \cdot h_r} = 224.65 \text{ mm} \quad \text{Momenttivarsi (yksinkertaistettu)}$$

$$k_{\text{eq}} := \frac{k_{\text{eff},1} \cdot h_r + k_{\text{eff},2} \cdot h_r + k_{\text{eff},3} \cdot h_r}{z_{\text{eq}}} = 13.661 \text{ mm}$$

Ekvivalentti jäykkyystekijä

$$\mu := 1.0$$

Jäykkyysuhde

$$S_{j,\text{ini}} := \frac{E \cdot z_{\text{eq}}^2}{\mu \cdot \frac{1}{k_{\text{eq}}}} = 144777.516 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

Kiertymisjäykkyyden alkuarvo

Luokitus:

$$k_b := 25$$

Sivusiirtyvä rakenne

$$I_b := I_y = 377055855.6 \text{ mm}^4$$

Palkin neliömomentti

$$L_b := 15300 \text{ mm}$$

Kehän jänneväli

Jäykän liitoksen raja-arvo:

$$S_{j,\text{ini}} = 144777.516 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{rad}} > k_b \cdot \frac{E \cdot I_b}{L_b} = 129381.911 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

Liitoksen kiertymisjäykkyys suurempi, kuin raja-arvo => liitos luokitellaan jäykäksi

Täysin lujan liitoksen ehto:

$$M_{j,Rd} = 384.355 \text{ kN} \cdot \text{m} < M_{b,\text{pl},Rd} := M_{c,Rd} = 454 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Peruspulttiliitoksen mitoitus

Peruspulttiliitoksen mitoitus:

Osavarmuusluvut:

$$\gamma_{M0} := 1.0 \quad \gamma_{M2} := 1.25 \quad \gamma_c := 1.5$$

Lähtötiedot ja materiaalit:

Pilari IPE 300:

$b_c := 150 \text{ mm}$	Profiilin leveys
$h_c := 300 \text{ mm}$	Profiilin korkeus
$t_{fc} := 10.7 \text{ mm}$	Laipan paksuus
$t_{wc} := 7.1 \text{ mm}$	Uuman paksuus
$r_c := 15 \text{ mm}$	Nurkan pyöristyssäde
$A := 5381 \text{ mm}^2$	Poikkileikkauksen pinta-ala
$f_{yc} := 355 \text{ MPa}$	Teräksen myötörajan lujuus
$I_y := 8356 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$	Jäyhysmomentti
$W_{el,y} := 557 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$	Taivutusvastus

Pohjalevy:

$t_p := 20 \text{ mm}$	Pohjalevyn paksuus
$f_{yp} := 355 \text{ MPa}$	Levyn myötölujuus
$f_u := 490 \text{ MPa}$	Levyn vetomurtolujuus
$b_p := 280 \text{ mm}$	Levyn leveys
$h_p := 400 \text{ mm}$	Levyn pituus
$E := 210 \text{ GPa}$	

Betoniperustus: C25/30

$f_{ck} := 25 \text{ MPa}$	$E_{cm} := 31 \text{ GPa}$	Kimmokerroin
$\alpha_{cc} := 0.85$	$E_c := 1.05 \cdot E_{cm} = 32.55 \text{ GPa}$	Tangettimoduuli
$f_{cd} := \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 14.167 \text{ MPa}$		

Kuormat:

$N_{Ed} := -195 \text{ kN}$	Puristusta (-)
$V_{Ed} := 70 \text{ kN}$	Pulteille

Peruspulttien kestävyys:

M30, 8.8 2kpl

 $d := 30 \text{ mm}$ $d_0 := d + 3 \text{ mm} = 33 \text{ mm}$ $f_{ub} := 800 \text{ MPa}$

$$A_s := 0.78 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 551.35 \text{ mm}^2$$

 $k_2 := 0.9$

$$F_{t,Rd} := \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = 317.577 \text{ kN}$$

Yhden pultin vetokestävyys

$$F_{t,Rd} = 317.577 \text{ kN} > N_{Ed} = -195 \text{ kN} \quad \text{OK!}$$

$$\frac{N_{Ed}}{F_{t,Rd}} = -0.614$$

Yhden pultin leikkauskestävyys:

$$V_{pl,Rd} := A_s \cdot \frac{f_{yp}}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = 113.004 \text{ kN}$$

Yhden pultin leikkauskestävyys

$$V_{pl,Rd} = 113.004 \text{ kN} > V_{Ed} := 70 \text{ kN} \quad \text{OK!}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} = 0.619$$

Pohjalevyn ja perustusruuvien mitoitus: $e := 60 \text{ mm}$

Pultin etäisyys pohjalevyn sivulta

 $a_f := 5 \text{ mm}$

Hitsin a-mitta

$$m := \frac{b_p}{2} - e - 0.8 \cdot \sqrt{2} \cdot a_f = 74.343 \text{ mm}$$

Reiän etäisyys pilarin uumasta

$$m_2 := 170 \text{ mm} - 20 \text{ mm} - t_{fc} - 0.8 \cdot \sqrt{2} \cdot a_f = 133.643 \text{ mm}$$

Reiän etäisyys pilarin laipasta

$$\lambda_1 := \frac{m}{m + e} = 0.553$$

$$\Rightarrow \alpha := 5$$

Hitsatut Profiilit
Kuva 6.11, s.88

$$\lambda_2 := \frac{m_2}{m + e} = 0.995$$

$$l_1 := 2 \cdot \alpha \cdot m - (4 \cdot m + 1.25 \cdot e) = 371.059 \text{ mm}$$

Eurocodes: Background &
Applications Desing of Steel
Buildnigs. s. 123

$$l_2 := 4 \cdot \pi \cdot m = 934.224 \text{ mm}$$

$$l_{eff,1} := \min(l_1, l_2) = 371.059 \text{ mm}$$

T-osan tehollinen leveys

$$l_{eff,2} := l_1 = 371.059 \text{ mm}$$

Puristuskestävyyden mitoitusarvo:

$$\beta_j := 1$$

Käytetään varmalla puolella olevaa arvoa 2/3-arvon sijaan

$$k_j := 1$$

Keskittymistekijän varmalla puolella oleva oletus

$$f_{jd} := \beta_j \cdot k_j \cdot \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 14.167 \text{ MPa}$$

Betonin pintapaineen mitoituslujuus

$$c := t_p \cdot \sqrt{\frac{f_{yp} \cdot \gamma_{MO}}{3 \cdot f_{jd}}} = 57.803 \text{ mm}$$

Pohjalevyn alapuolen puristettu alue (kantava pinta)

$$s := h_p - h_c - 20 \text{ mm} - c = 22.197 \text{ mm}$$

Pohjalevyn ulottuma pilarin laipan ulkopuolelle

$$b_{eff} := \min((s + t_{fc} + c), (c + t_{fc} + c)) = 90.7 \text{ mm}$$

T-osan teholliset pituudet

$$l_{eff} := b_c + 2 \cdot c = 265.606 \text{ mm}$$

$$M_{p,Ed} := \frac{l_{eff} \cdot s^2 \cdot f_{jd}}{2} = 0.927 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pintapaineen aiheuttama taivutus pohjalevyn

$$t_{p,min} := \sqrt{\frac{6 \cdot M_{p,Ed}}{l_{eff} \cdot \frac{f_{yp}}{\gamma_{MO}}}} = 7.68 \text{ mm}$$

Pintapaineen määräävä minimi pohjalevyn paksuus

$$t_p = 20 \text{ mm} > t_{p,min} = 7.68 \text{ mm}$$

OK!

Pilarin laipan ja uuman puristus:

$$h := h_c = 300 \text{ mm}$$

Pilarin profiilin korkeus

$$t_{fb} := t_{fc} = 10.7 \text{ mm}$$

Liittyvän pilarin laipan paksuus

$$M_{el,Rd} := \frac{W_{el,y} \cdot f_{yc}}{\gamma_{MO}} = 197.735 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pilarin PL-luokan mukainen taivutuskestävyys

$$M_{c,Rd} := M_{el,Rd} = 197.735 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Puristetun T-osan kestävyys:

$$z := h - t_{fb} = 289.3 \text{ mm}$$

Momenttivarsi

$$F_{c,fc,Rd} := \frac{M_{c,Rd}}{z} = 683.495 \text{ kN}$$

Pilarin puristetun laipan ja uuman yhdistetyn puristuskestävyys

$$F_{C,Rd} := f_{jd} \cdot b_{eff} \cdot l_{eff} = 341.281 \text{ kN}$$

$$F_{c,pl,Rd} := F_{C,Rd} = 341.281 \text{ kN}$$

Puristetun T-osan kestävyys

Puristuskestävyyden mitoitusarvo pienin lasketuista:

$$F_{C,r,Rd} := \min(F_{c,pl,Rd}, F_{c,fc,Rd}) = 341.281 \text{ kN}$$

$$\frac{-N_{Ed}}{F_{C,r,Rd}} = 0.571 < 1,0 \quad \text{OK!}$$

Vetokestävyyden mitoitusarvo:

Pilarin vedetty uuma

$$t_{fb} := 0 \quad (\text{Liitoksessa ei palkkia, näin ollen palkin laipan paksuus on 0})$$

$$a_f := 5 \text{ mm} \quad \text{Hitsin a-mitta pilarin ja pohjalevyn välillä}$$

$$r_c := 15 \text{ mm} \quad \text{Pyöristyssäde}$$

$$s := r_c \quad \text{Valssattu profiili}$$

$$b_{\text{eff},t,wc} := t_{fb} + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_f + 5 \cdot (t_{fc} + s) = 142.642 \text{ mm}$$

$$A_{vc} := A - 2 \cdot b_c \cdot t_{fc} + (t_{wc} + 2 \cdot r_c) \cdot t_{fc} = 2567.97 \text{ mm}^2$$

$$\omega := \frac{1}{\sqrt{1 + 1.3 \cdot \left(b_{\text{eff},t,wc} \cdot \frac{t_{wc}}{A_{vc}} \right)^2}} = 0.912$$

$$F_{t,wc,Rd} := \frac{\omega \cdot b_{\text{eff},t,wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{yc}}{Y_{MO}} = 327.904 \text{ kN}$$

Pohjalevyn taivutus:

$$e := 60 \text{ mm} \quad \text{Pultin etäisyys pohjalevyn sivulta}$$

$$m := \frac{b_p}{2} - e - 0.8 \cdot \sqrt{2} \cdot a_f = 74.343 \text{ mm} \quad \text{Reiän etäisyys pilarin uumasta}$$

$$m_p := 170 \text{ mm} - 20 \text{ mm} - t_{fc} - 0.8 \cdot \sqrt{2} \cdot a_f = 133.643 \text{ mm} \quad \text{Reiän etäisyys pilarin laipasta}$$

$$\lambda_1 := \frac{m}{m+e} = 0.553 \quad \Rightarrow \quad \alpha := 5$$

$$\lambda_2 := \frac{m_p}{m+e} = 0.995 \quad \text{Hitsatut Profilit Kuva 6.11, s.88}$$

$$w := 170 \text{ mm}$$

Ruuvit laippojen sisäpuolella:

$$l_{eff,cp} := 2 \cdot \alpha \cdot m - (4 \cdot m + 1.25 \cdot e) = 371.059 \text{ mm}$$

Eurocodes: Background &
Applications Desing of Steel
Buildnigs. s. 123

$$l_{eff,nc} := 4 \cdot \pi \cdot m = 934.224 \text{ mm}$$

$$l_{eff,1} := \min(l_{eff,cp}, l_{eff,nc}) = 371.059 \text{ mm}$$

T-osan tehollinen leveys

$$l_{eff,2} := l_{eff,cp} = 371.059 \text{ mm}$$

Ei vipuvoimia

$$M_{pl,1,Rd} := 0.25 \cdot l_{eff,1} \cdot t_p^2 \cdot \frac{f_{yp}}{Y_{M0}} = 13.173 \text{ kN} \cdot m$$

$$F_{T,1,2,Rd,p} := \frac{2 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m} = 354.373 \text{ kN}$$

Murtumismalli 1 ja 2

$$n := 2$$

$$F_{T,3,Rd} := n \cdot F_{t,Rd} = 635.155 \text{ kN}$$

Murtumismalli 3

$$F_{t,pl,Rd} := \min(F_{T,1,2,Rd,p}, F_{T,3,Rd}) = 354.373 \text{ kN}$$

Vetokestävyys pienempi lasketuista arvoista:

$$F_{T,I,Rd} := \min(F_{t,wc,Rd}, F_{t,pl,Rd}) = 327.904 \text{ kN}$$

$$\frac{-N_{Ed}}{F_{T,I,Rd}} = 0.595 < 1,0 \quad \text{OK!}$$

Hitsien mitoitus:**Laipan hitsit:**

$$t_f := 10.7 \text{ mm}$$

$$\sigma_{x,1} := 0.8 \cdot \frac{355 \text{ N}}{1 \text{ mm}^2} = 284 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Vetojännitys laipan keskilinjalla

$$a_f := \frac{0.9 \cdot 1.25 \cdot \sigma_{x,1}}{\sqrt{2} \cdot 510 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} \cdot t_f = 4.74 \text{ mm}$$

Vaadittu laipan hitsin a-mitta muodonmuutoskyvyn perusteella

$$\Rightarrow \text{valitaan } a_f := 5 \text{ mm}$$

t = paksumpi liitettävistä levyistä (tässä pohjalevy)

Uuman hitsit:

$$\sigma_{x,2} := \frac{M_{p,Ed}}{I_y} \cdot \frac{h_c - t_{fc}}{2} - \frac{N_{Ed}}{A} = 37.843 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{yx} := \frac{V_{Ed}}{t_{wc} \cdot (h_c - (2 \cdot (t_{fc} + r_c)))} = 39.659 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$a_w := \frac{0.9 \cdot 1.25 \cdot t_{wc}}{2 \cdot 510 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} \cdot \sqrt{2 \cdot \sigma_{x,2}^2 + 3 \cdot \tau_{yx}^2} = 0.682 \text{ mm}$$

Vaadittu uuman hitsin a-mitta muodonmuutoskyvyn perusteella

$$a_{w,min} := 0.403 \cdot t_{fc} = 4.312 \text{ mm}$$

Taulukon minimimitoituksen suhdeluvun mukainen minimi a-mitta

$$\Rightarrow \text{valitaan } a_w := 5 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \text{valitaan a-mitaksi:}$$

$$a := 5 \text{ mm}$$

Liitosluokitus:

Pilarin pohjalevyn kiinnitykset
Vedettyjen ruuvirivien määrä 1

Huomioon otettavat tekijät: k_{13} k_{15} k_{16}

$$b_{eff} = 90.7 \text{ mm}$$

$$l_{eff} = 265.606 \text{ mm}$$

T-osan teholliset leveydet

$$k_{13} := \frac{E_c \cdot \sqrt{b_{eff} \cdot I_{eff}}}{1.275 \cdot E} = 18.869 \text{ mm}$$

Puristettu betoni (jälkivalu mukaanlukien)

$$k_{15} := \frac{0.425 \cdot I_{eff} \cdot t_p^3}{m^3} = 2.198 \text{ mm}$$

Pohjalevyn taivutus vedetyllä puolella

$$t_{bp} := 0.2 \cdot d = 6 \text{ mm}$$

Aluslaatan paksuus, likiarvo
Hitsatut profiilit s.311

$$h_{ruuvi} := 0.63 \cdot d = 18.9 \text{ mm}$$

Ruuvin kannan paksuus, likiarvo
Hitsatut profiilit s.311

$$h_{mutteri} := 0.63 \cdot d = 18.9 \text{ mm}$$

Mutterin paksuus, likiarvo
Hitsatut profiilit s.311

$$L_b := 2 \cdot t_p + h_{ruuvi} + h_{mutteri} + 2 \cdot t_{bp} = 89.8 \text{ mm}$$

Ruuvin venymäpituus

$$k_{16} := \frac{2.0 \cdot A_s}{L_b} = 12.279 \text{ mm}$$

Vedetyt perustusruuvit

$$k_{eff} := \frac{1}{\frac{1}{k_{13}} + \frac{1}{k_{15}} + \frac{1}{k_{16}}} = 1.697 \text{ mm}$$

Ruuvirivin tehollinen
jäykkyystekijä

$$h_r := \frac{z}{2} = 144.65 \text{ mm}$$

$$z_{eq} := \frac{k_{eff} \cdot h_r^2}{k_{eff} \cdot h_r} = 144.65 \text{ mm}$$

Momenttivarsi (yksinkertaistettu)

$$k_{eq} := \frac{(k_{eff} \cdot h_r)}{z_{eq}} = 1.697 \text{ mm}$$

Ekvivalentti jäykkyystekijä

$$\mu := 1.0$$

Jäykkyyssuhde

$$S_{j.ini} := \frac{E \cdot z_{eq}^2}{\mu \cdot \frac{1}{k_{eq}}} = 7454.608 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

Kiertymisjäykkyyden alkuarvo

Luokitus:

$$k_b := 8$$

Sivusiirtymätön rakenne

$$I_b := I_y = 83560000 \text{ mm}^4$$

Pilarin neliömomentti

$$L_b := 5000 \text{ mm}$$

Pilarin pituus

Jäykän liitoksen raja-arvo:

$$S_{j,ini} = 7454.608 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{rad}} < k_b \cdot \frac{E \cdot I_b}{L_b} = 28076.16 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

Nivel-liitoksen raja-arvo:

$$S_{j,ini} = 7454.608 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{rad}} > 0.5 \cdot \frac{E \cdot I_b}{L_b} = 1754.76 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$