

Saimaan ammattikorkeakoulu
Tekniikka Lappeenranta
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Rakennesuunnittelu

Teemu Kojo

Alkuepäkeskisyydestä aiheutuvien lisävaakavoimien laskenta puristetuissa sauvarakenteissa

Opinnäytetyö 2017

Tiivistelmä

Teemu Kojo

Alkuepäkeskisyyksistä aiheutuvien lisävaakavoimien laskenta puristetuissa saurarakenteissa, 33 sivua, 1 liite

Saimaan ammattikorkeakoulu

Tekniikka Lappeenranta

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Rakennesuunnittelu

Opinnäytetyö 2017

Ohjaajat: lehtori Petri Himmi, Saimaan ammattikorkeakoulu
suunnittelujohtaja Timo Ahti, Wise Group Finland Oy

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tarkastella puristettuja alapaarresauvoja sisältävän jäykkänurkkaisen kehärakenteen alkuepäkeskisyyksistä aiheutuvia lisävaakavoimia ilmiönä ja tutustua tämän voiman suuruuden määrittämiseen käytettäviin laskentamenetelmiin. Työn tilaajana toimi Wise Group Finland Oy.

Opinnäytetyön teoriaosassa käsiteltiin teräsrakenteiden Eurokoodin teräsrakennesuunnittelua koskevien määräysten mukaisen murtorajatilamitoituksen perusteita sekä teräsrakenteisen ristikkorakenteen käytännön suunnittelutyössä huomioitavia tekijöitä. Kehärakenteen alkuepäkeskisyyksistä aiheutuvan lisävaakavoiman määrittäminen on tutkittu Eurokoodissa esitettyjen määräysten pohjalta laadittujen suunnitteluohjeiden, statiikan ja lujuusopin sääntöjen sekä FEM-laskennan näkökulmista. Opinnäytetyön teoriaosuuden ja ilmiön analysoinnin pohjatietona on käytetty rakennusalan kirjallisuutta ja Internet-lähteitä.

Opinnäytetyön lopussa on vertailtu lisävaakavoiman suuruuden määrittämiseen käytettyjen eri laskentamenetelmien avulla saatuja tuloksia. Lisäksi työn yhteenvedossa on kerrottu havaintoja ja huomioita käytetyistä laskentamenetelmistä sekä lisävaakavoiman laskennan tarpeellisuudesta osana kehärakenteen suunnittelutyötä. Opinnäytetyön raportin pohjalta on laadittu työn tilaajalle suunnitteluohje, joka sisältää ohjeistuksen alkuepäkeskisyyksistä aiheutuvan lisävaakavoiman laskentaan sekä kehä- ja ristikkorakenteen käytännön suunnittelutyöhön.

Asiasanat: teräsrakenne, kehärakenne, ristikkorakenne, lisävaakavoima

Abstract

Teemu Kojo

Calculation of additional horizontal forces from geometrical imperfections in compressed rod structures, 33 Pages, 1 Appendix

Saimaa University of Applied Sciences

Technology Lappeenranta

Civil and Construction Engineering

Structural Engineering

Bachelor's Thesis 2017

Instructors: Mr Petri Himmi, Lecturer, Saimaa University of Applied Sciences,
Mr Timo Ahti, Planning Manager, Wise Group Finland Oy

The purpose of this study was to examine rigid jointed frame structures with compressed lower chord rods. Geometrical imperfections cause additional horizontal forces to this kind of frame structure. In this study, different calculation methods are explored to determine the magnitude of this force. The study was commissioned by Wise Group Finland Oy.

The first chapters of this thesis focus on the basics of the steel structures ultimate limit state calculation and on other important factors to be considered in the practical design work of steel frames. The determination of the additional horizontal force has been studied from the perspectives of Eurocode design rules, FEM calculations, statics and trigonometry. The information was gathered from literature and Internet sources related to the subject.

At the end of this thesis, the results of different calculation methods used to determine the magnitude of the additional horizontal force have been compared. Based on the explored information, a design guide has been made for the company. The design guide contains guidance on calculating the additional horizontal force and other important information for design work of steel structures.

Keywords: steel structure, frame structure, truss structure, additional horizontal force

Sisällys

1	Johdanto.....	5
2	Teräsrakenteisen hallirakennuksen suunnittelun perusteet.....	6
2.1	Yleistä hallirungosta.....	6
2.2	Rakennesuunnittelijan tehtävät suunnitteluprosessissa.....	7
2.3	Yleistä teräsrunkoisen hallirakenteen murtorajatilamitoituksesta.....	8
2.3.1	Vetokestävyys.....	8
2.3.2	Puristuskestävyys.....	9
2.3.3	Taivutuskestävyys.....	10
2.3.4	Leikkauskestävyys.....	11
2.3.5	Taivutus- ja leikkausrasituksen yhteisvaikutus.....	12
2.3.6	Nurjahduskestävyys.....	12
3	Ristikkorakenteen suunnittelu.....	13
3.1	Suunnittelun vaiheet.....	13
3.2	Ylä- ja alapaarteet.....	15
3.3	Uumasauvat.....	15
3.4	Liitosalueiden suunnittelu.....	16
4	Jäykkänurkkaisen kehärakenteen alkuepäkeskisyyden aiheuttaman lisävaakavoiman laskenta ja huomiointi suunnittelutyössä.....	18
4.1	Epätarkkuuksien huomiointi.....	20
4.2	Lisävaakavoiman laskentatavat.....	20
4.2.1	Ekvivalentti vaakavoima.....	20
4.2.2	Lisävaakavoiman laskenta vinouskulmilla.....	22
4.2.3	FEM-laskenta.....	23
4.3	Siderakennesauvan muodonmuutoksen vaikutus.....	25
5	Tulokset.....	28
6	Yhteenveto.....	30
	Kuvat.....	32
	Kuviot.....	32
	Lähteet.....	33

Liitteet

Liite 1 Esimerkkikehät

1 Johdanto

Opinnäytetyössä tarkastellaan jäykkänurkkaisessa kehärakenteessa esiintyviä, rakenteen alkuepäkeskisyydestä aiheutuvia lisävaakavoimia ilmiönä sekä tutustutaan kyseisen lisävaakavoiman laskennassa käytettäviin eri laskentatapoihin. Työssä tutkitaan kehärakenteen valmistus- ja asennustoleranssien sekä siderakennesauvassa sallittavan muodonmuutoksen vaikutuksia kehää vasten kohtisuorassa tasossa vaikuttavan lisävaakavoiman suuruuteen.

Työssä käytetään lisävaakavoimien laskennassa Autodeskin Robot Structural Analysis -ohjelmaa, jolla muodostetaan kehärakenteiden alapaarresauvojen nurkkapisteen alkuepäkeskisyydet sisältäviä FEM-laskentamalleja. Ohjelman laskentamalleista saatavia tuloksia verrataan Eurokoodissa ja teräsrakenteiden suunnitteluohjeissa esitettyjen laskentatapojen sekä statiikan sääntöjen mukaan vinouskulmilla saatuihin tuloksiin.

Tarkastelun tulosten pohjalta tuotetaan työn tilaajalle suunnitteluohje, joka sisältää ohjeistuksen alkuepäkeskisyyksistä aiheutuvan lisävaakavoiman laskentaan sekä kehä- ja ristikkorakenteen käytännön suunnittelutyöhön.

Työn laskelmissa ei oteta kantaa mitoitettavaa kehärakennetta ympäröiviin rakenteisiin. Rakenteessa tapahtuvat mahdolliset toisen asteen muodonmuutokset huomioidaan ainoastaan osassa laskelmia siderakennesauvan venymän osalta. Opinnäytetyössä ei käsitellä kehärakenteen suunnittelua käyttö- tai onnettomuusrajatilojen osalta.

Opinnäytetyön tilaajana toimii Wise Group Finland Oy, joka on suomalainen talonrakennusalan konsultointi-, suunnittelu- ja rakennuttamispalveluja uudis- ja korjausrakennuskohteisiin tarjoava yritys. Wise Groupissa työskentelee yli 500 talonrakennusalan ammattilaista viidellätoista eri paikkakunnalla. (1.) Wise Group Finland Oy ja Sito Oy yhdistyvät vuoden 2018 alussa Sitowiseksi, muodostaen yhdessä lähes 1200 hengen asiantuntijayrityksen. Sitowise on suurin suomalaisomisteinen talo- ja infrarakentamisen suunnittelu- ja konsultointiyritys.

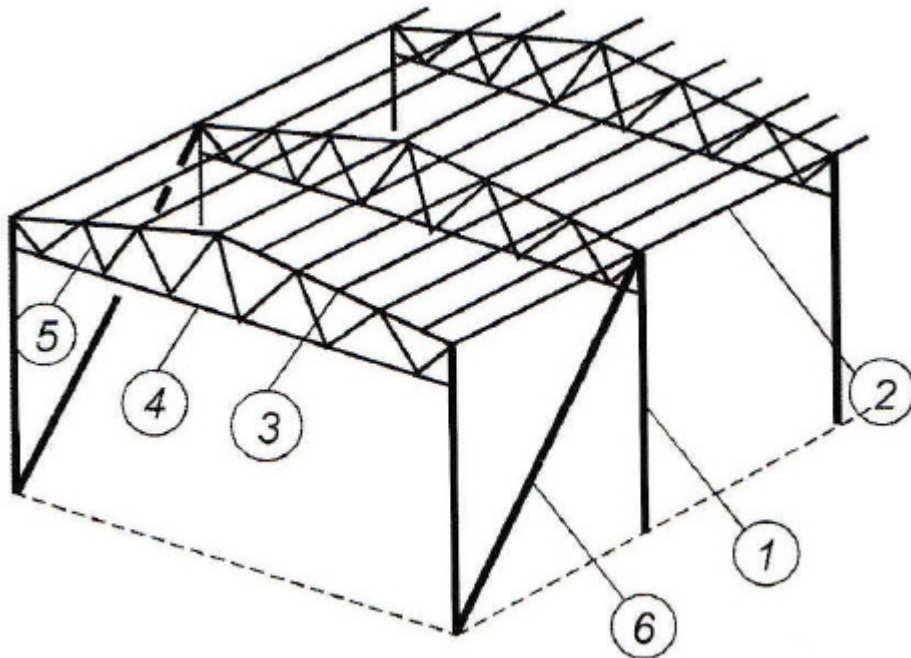
2 Teräsrakenteisen hallirakennuksen suunnittelun perusteet

2.1 Yleistä hallirungosta

Teräsrakenteiden perusrakenneosa on sauva, jolla tarkoitetaan erilaisten voimasuureiden rasittamaa kappaletta. Hallirungossa sauvoja ovat kaikki pilarit ja palkit, jotka toimivat kehärakenteen osina. Lisäksi ristikoiden eri osat tai kehän nurkkia yhdistävät osat ovat sauvoja. (2, s.47.)

Kuvassa 1 on esitetty hallirungon tyypillisimpiä sauvaosia, joita ovat:

- 1) Pilari, puristettu ja taivutettu pystysauva
- 2) Katto-orsi, taivutettu vaakasauva, johon voi kohdistua myös puristus- ja vääntörasituksia
- 3) Ristikön yläpaarre, puristettu ja taivutettu sauva
- 4) Ristikön alapaarre, useimmiten vedetty sauva
- 5) Ristikön vinosauva, vedetty tai puristettu sauva
- 6) Rungon tuuliside, vedetty tai puristettu sauva

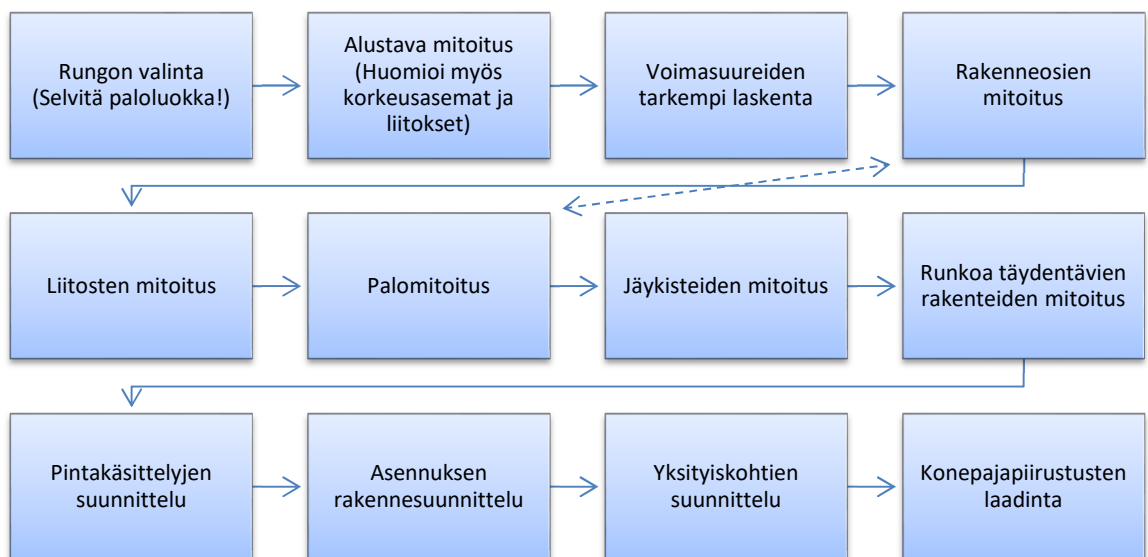


Kuva 1. Havainnekuva hallirungon sauvaosista (2, s.47)

2.2 Rakennesuunnittelijan tehtävät suunnitteluprosessissa

Teräsrakennesuunnittelijan tehtävänä on alustavassa rungon suunnittelussa laatia suunnitelmat kohteen runkojärjestelmästä sekä rungon jäykistyksestä ja toimintaperiaatteesta. Rakennuksen paloluokka tulee selvittää mahdollisimman aikaisessa suunnitteluvaiheessa. Runkojärjestelmässä esitetään arviot käytettävistä poikkileikkauksista ja kokoonpanoista, kuten ristikoista. Kun alustava runkosuunnitelma on hyväksytetty kohteen pääsuunnittelijalla ja tilaajalla, rakennesuunnittelija mitoittaa rakenneosat ja liitokset runkosuunnitelman mukaisesti. Rungon onnistuneen ja nopean asennustyön kannalta on tärkeää, että suunnittelija pyrkii välttämään tarpeettoman monimutkaisia ratkaisuja. Varsinkin liitokset tulisi suunnitella mahdollisimman yksinkertaisiksi. (3, s.5.)

Kuvassa 2 on esitetty tyypillisen teräsrakenteisen hallirakennuksen suunnittelu-projektin vaiheet rakennesuunnittelun näkökulmasta.



Kuva 2. Rakennesuunnittelun kulku teräsrunkoisen hallin rakennusprojektissa (2, s.27)

Rakennesuunnittelijan työn lähtötietovaatimuksina ovat kohteen arkkitehtisuunnitelmat, kuormatiedot, rakenteiden vaativuus-, seuraamus- ja rakenneluokkatie-

dot, työn aikataulut, kohteen suunniteltu käyttöikä, palonkestovaatimukset, geotekniset suunnitteluvaatimukset sekä mahdolliset tilaajan projektikohtaiset erityistoiveet (3, s.5).

2.3 Yleistä teräsrunkoisen hallirakenteen murtorajatilamitoituksesta

Eurokoodin mukaisessa teräsrakenteiden murtorajatilamitoituksessa noudatetaan eurokoodin yleisten rakenteiden suunnitteluperusteiden (SFS-EN 1990) ja rakenteiden kuormat määrittävän Eurokoodi 1:n (SFS-EN 1991) lisäksi teräsrakenteita käsittelevässä Eurokoodi 3:ssa (SFS-EN 1993) esitettyjä sääntöjä rakenteiden kestävyyksille (4, s.22).

Rungon jokainen sauva tulee mitoittaa kestävänsä murtorajatilassa niihin koko suunnitellun käyttöikänsä aikana todennäköisesti kohdistuvat rasitukset. Taivutetut sauvat tulee mitoittaa myös käyttörajatilassa, rajoittaen niissä esiintyvät muodonmuutokset ja taipumat sallittuihin raja-arvoihin. (2, s.47.)

Hallin teräsrunko mitoitetaan pystysuunnassa yläpohjarakenteen omalle painolle ja lumikuormalle sekä mahdollisille ripustuskuormille. Vaakas suunnassa runko mitoitetaan tuulikuormalle ja mahdollisille lisävaakavoimille.

2.3.1 Vetokestävyys

Vetorasitus on kehärakenteisessa hallirakennuksessa lähes aina määräävä rasitus ristikkorakenteiden vetorasitetuissa uumasauvoissa, siderakenteissa, vetotangoissa ja monien liitososien mitoituksessa. Yläpohjan ristikkorakenteiden yläpaarteiden vetokestävyys tulee aina tarkastella. (2, s. 47) Laskennassa vetovoiman mitoitussarvon N_{Ed} tulee aina olla pienempi kuin vetokestävyysmitoitussarvo $N_{t,Rd}$ (kaava 1) (4, s. 52).

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (1)$$

Yhtenäisessä, reiättömässä poikkileikkauksessa vetokestävyysmitoitussarvona $N_{t,Rd}$ voidaan käyttää plastisuusteorian mukaista poikkileikkauksen kestävyysmitoitussarvoa $N_{pl,Rd}$ (kaava 2) (4, s. 52). Vetokestävyysmitoitukseen vaikuttaa teräksen myötölujuus f_y ja poikkileikkauksen pinta-ala, joita pienennetään

materiaalin osavarmuuskertoimella γ_{M0} . Osavarmuuskertoimeksi γ_{M0} suositellaan Eurokoodin kansallisessa liitteessä arvoa 1,00.

$$N_{pl,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2)$$

Vetotankojen ja siderakenteiden liitososien mitoituksessa tulee huomioida poikkileikkauksen kestävyden mitoitusarvo kiinnittimen reikien kohdalla. Liitosalueen kestävyden mitoituksessa (kaava 3) käytetään teräksen myötölujuuden arvon f_y sijaan teräksen vetomurtolujuuden arvoa f_u . Lisäksi materiaalin osavarmuuskertoimena on γ_{M2} , jonka arvoksi kansallisessa liitteessä suositellaan 1,25. (4, s. 52.)

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 * A_{net} * f_u}{\gamma_{M2}} \quad (3)$$

Rakenteen sitkeyden takaamiseksi poikkileikkauksen bruttoalan mukaan laskettu kestävyys (kaava 2) ei saa laskennassa olla liitosalueen nettoalan mukaan laskettua kestävyttä (kaava 3) suurempi. Vetokestävyyden mitoitusarvoksi $N_{t,Rd}$ valitaan siis näistä kahdesta kestävydestä pienempi arvo (kaava 4). (4, s. 52.)

$$N_{t,Rd} = \min\{N_{pl,Rd}, N_{u,Rd}\} \quad (4)$$

2.3.2 Puristuskestävyys

Puristusvoima on usein mitoittava rasitus hallirakennuksen mastopilareissa ja kehärakenteen pystykuormia välittävissä osissa. Puristuskestävyys tulee lisäksi tarkistaa hallin siderakenteissa, tuulipilareissa ja yläpohjan ristikkorakenteiden alapaarteissa sekä uumasauvoissa, joissa puristusvoimia voi eri kuormitusyhdistelmillä esiintyä. (2, s. 47.)

Laskennassa puristusvoiman mitoitusarvon N_{Ed} tulee aina olla mitoituskestävyyttä $N_{c,Rd}$ pienempi (kaava 5).

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (5)$$

Kuten teräspoikkileikkauksen vetokestävyys, myös sen puristuskestävyyden $N_{c,Rd}$ (kaava 6) vaikuttaa poikkileikkauksen pinta-alan suuruus ja teräksen myötölujuus.

$$N_{c,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6)$$

Mikäli puristettu poikkileikkaus kuuluu poikkileikkausluokkaan 4, käytetään puristuskestävyyden laskennassa koko poikkileikkauksen pinta-alan sijaan tehollista pinta-alaa A_{eff} (4, s. 53).

2.3.3 Taivutuskestävyys

Taivutusmomentti toimii usein mitoittavana rasituksena hallirakennuksen yläpohjan palkkirakenteissa ja vaakakuormitetuissa pilarirakenteissa, kuten tuulipilareissa. Pilareissa tulee tutkia myös taivutus- ja puristusvoimien yhteisvaikutus. (2, s. 47.)

Taivutuskestävyyden mitoituskestävyyden $M_{c,Rd}$ tulee laskennassa aina olla suurempi kuin taivutusmomentin murtorajatilän mitoitusarvo M_{Ed} (kaava 7) (4, s. 53).

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (7)$$

Poikkileikkauksen taivutuskestävyyden $M_{c,Rd}$ vaikuttaa teräksen myötölujuus f_y ja poikkileikkauksen taivutusvastus. Poikkileikkausluokissa 1 ja 2 laskennassa (kaava 8) voidaan käyttää plastisuusteorian mukaista taivutusvastusta W_{pl} .

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} * f_y}{\gamma_{M0}} \quad (8)$$

Teräksen kimmoteorian mukaista taivutusvastusta W_{el} tulee käyttää poikkileikkausluokkaan 3 kuuluvien poikkileikkauksien mitoituksessa (kaava 9). Kimmoteorian mukaista taivutuskestävyyden arvoa voidaan käyttää myös poikkileikkausluokissa 1 ja 2, jos laskennassa halutaan varmalla puolella oleva kestävyyden arvo.

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el} * f_y}{\gamma_{M0}} \quad (9)$$

Neljännän poikkileikkausluokan taivutuskestävyyden laskennassa (kaava 10) tulee käyttää poikkileikkauksen tehollista taivutusvastusta W_{eff} , josta on vähennetty taivutuskestävyyden kannalta tehottomat alueet (4, s. 53).

$$M_{c,Rd} = M_{eff,Rd} = \frac{W_{eff} * f_y}{\gamma_{M0}} \quad (10)$$

2.3.4 Leikkauskestävyys

Kehärakenteen leikkauskestävyys tulee tarkastella sen kaikissa osissa ja liitoksissa. Kuitenkin rakenneputkista koostuvilla ristikko- ja kehärakenteilla leikkausvoima on harvoin rakenteen mitoittava rasitus. Hallirakennuksen jäykistävät siderakenteet eivät välitä muun rakenteen leikkausvoimia, joten siderakenteiden leikkauskestävyyttä ei tarvitse tarkastella. (2, s. 47.)

Leikkausvoiman mitoitusarvon V_{Ed} tulee olla poikkileikkauksen leikkauskestävyyden mitoitusarvoa $V_{c,Rd}$ pienempi (kaava 11).

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (11)$$

Poikkileikkausluokissa 1 ja 2, kun mitoittettava rakenneosaa ei ole vääntörasitettu, voidaan laskennassa käyttää plastisuusteorian mukaista leikkauskestävyyden mitoitusarvoa $V_{pl,Rd}$ (kaava 12). Leikkauskestävyyteen vaikuttaa poikkileikkauksen leikkauspinta-ala A_v ja teräksen lujuus f_y . (4, s. 54.)

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v * \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)}{\gamma_{M0}} \quad (12)$$

Kimmenteorian mukaista leikkauskestävyyden mitoitusarvoa $V_{el,Rd}$ (kaava 13) tulee käyttää poikkileikkausluokkia 3 ja 4 olevien teräspoikkileikkauksien laskennassa. Lisäksi kimmenteorian mukaisessa leikkauskestävyyden mitoituksessa leikkausjännityksen tulee olla teräksen osavarmuuskertoimella pienennettyä lujuutta suurempi (kaava 14).

$$V_{c,Rd} = V_{el,Rd} = \frac{f_y * I * t_w}{S_y * \sqrt{3}} \quad (13)$$

$$\frac{\tau_{Ed}}{f_y/(\sqrt{3} * \gamma_{M0})} \leq 1,0, \text{ jossa } \tau_{ED} = \frac{V_{Ed} * S_y}{I * t_w} \quad (14)$$

Kaavoissa 13 ja 14 S_y on puolen poikkileikkauksen staattinen momentti, I on koko poikkileikkauksen hitausmomentti ja t_w tarkoittaa uuman paksuutta.

2.3.5 Taivutus- ja leikkausrasituksen yhteisvaikutus

Leikkausvoima ja taivutusmomentti voivat esiintyä yhdessä suuruudeltaan merkittävänä samassa kohdassa rakennetta. Näitä kohtia ovat jatkuvan rakenteen tukipisteet ja pistekuormitetun yksinkertaisesti tuetun palkin kuormituspisteen ympärillä oleva alue. (2, s. 51.)

Kun teräspoikkileikkauksen leikkausrasituksen mitoitusarvo V_{Ed} on suurempi kuin puolet poikkileikkauksen plastisen leikkauskestävyyden mitoitusarvosta $V_{pl,Rd}$, sen vaikutus taivutusmomenttikestävyyteen tulee huomioida. Tällöin poikkileikkauksluokan mukaista, kaavoissa 8,9 ja 10 käytettävää, taivutuskestävyyttä $M_{c,Rd}$ muutetaan pienentämällä teräksen myötörajaa (kaava 15). (4, s. 57.)

$$(1 - \rho) * f_y, \quad \text{jossa } \rho = \left(\frac{2 * V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \right)^2 \quad (15)$$

2.3.6 Nurjahduskestävyys

Hallirakennuksen pilareiden sekä kehä- ja ristikkorakenteiden puristettujen sauvojen nurjahduskestävyys tulee tarkastella mitoitusprosessissa. Yleisesti ristikoissa käytetyillä rakenneputkilla riittää, että tarkastetaan vain taivutusnurjahdus molemman pääjäyhyysakselin suhteen. Rakenneputkien suuren vääntöjäykkyyden myötä vääntönurjahdusta ei tarvitse tutkia. (5, s. 73.)

Puristettujen sauvojen nurjahduskestävyyden mitoitusarvon $N_{b,Rd}$ tulee aina olla suurempi kuin puristusvoiman mitoitusarvo N_{Ed} (kaava 16).

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (16)$$

Nurjahduskestävyyden mitoitusarvon $N_{b,Rd}$ (kaava 17) suuruuteen vaikuttaa mitoitettavan poikkileikkauksen pinta-ala ja teräksen myötölujuus f_y , joita pienennetään nurjahduskestävyyden pienennystekijällä X ja materiaalin osavarmuusluvulla γ_{M1} . Pienennystekijän X määrittämiseen annetut ohjeet ja nurjahduskäyrät löytyvät Eurokoodi 3:n osan EN 1993-1-1 luvusta 6.3.1.2.

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{M1}} \quad (17)$$

Poikkileikkausluokassa 4 laskennassa (kaava 18) käytetään koko poikkileikkauksen pinta-alan sijaan tehollista pinta-alaa A_{eff} (4, s. 61).

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A_{eff} * f_y}{\gamma_{M1}} \quad (18)$$

3 Ristikorakenteen suunnittelu

Tässä luvussa käsitellään rakenneputkista koostuvan, ristikkorakenteisen kehärakenteen suunnitteluprosessissa huomioitavia asioita sekä paarre- ja uumasauvojen valintaan vaikuttavia tekijöitä. Rakenneputkia on käytetty Suomessa laajalti erilaisissa ristikkorakenteissa jo pitkään. Rakenneputkien hyvän vääntöjäykkyyden myötä rakenteen suunnittelu yksinkertaistuu, kun vääntönurjahdus tai kiepahdus mitoittaa rakenteen vain hyvin harvoissa tapauksissa.

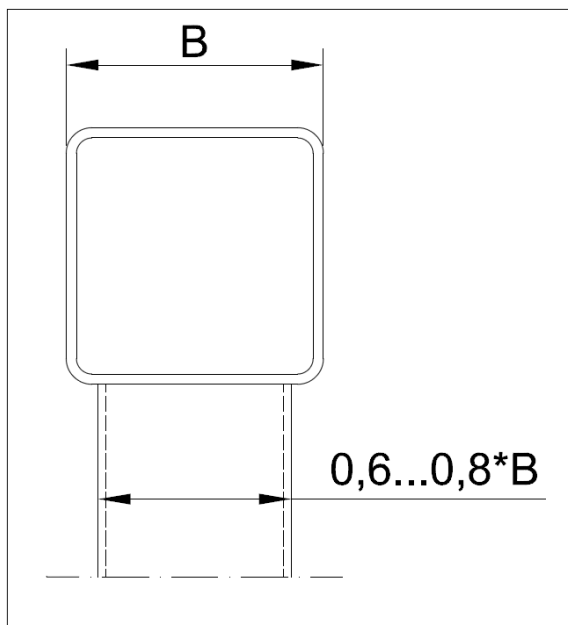
Ristikon paarteiden ja uumasauvojen väliset liitokset oletetaan rakenteen suunnittelussa yleensä nivelellisiksi. Tämän myötä uumasauvat voidaan mitoittaa ainoastaan sauvassa vaikuttavalle normaalivoimalle. Ylä- ja alapaarresauvat ovat tavanomaisissa ristikoissa jatkuvia rakenteita, jolloin niissä esiintyy normaalivoimien lisäksi myös taivutusrasituksia. (5, s. 424.)

3.1 Suunnittelun vaiheet

Ristikon suunnittelu aloitetaan määrittämällä rakenteeseen vaikuttavat kuormat ja vaarallisimmat kuormitusyhdistelmät. Koska rakenneputkien nurjahdus- ja vetokestävydet eroavat toisistaan, on rakennetta tärkeää tarkastella kuormitusyhdistelmillä, joissa pääasialliset kuormitukset eroavat selvästi toisistaan.

Suunnittelun alkuvaiheessa määritetään ristikon korkeus, tyyppi ja kattokaltevuus. Näiden tietojen pohjalta voidaan ristikosta muodostaa staattinen laskentamalli. Ristikon korkeus on teräksen menekin kannalta yksi merkittävin yksittäinen tekijä. Optimaalinen maksimikorkeus ristikolle on noin kymmenesosa kehän jännemitasta. Korkeus määräytyy usein kohteen tilantarpeiden ja muiden toiminnallisten vaatimusten sekä ristikkorakenteen asennuksen ja kuljetuksen asettamien vaatimusten mukaan. Kattokaltevuus on usein määritetty jo kohteen mahdollisissa arkkitehtisuunnitelmissa, eikä sillä ole suurta merkitystä ristikon teräsme-nekkiin. (5, s. 424.)

Kun ristikon muoto ja rakenteeseen vaikuttavat voimat ovat määritetty, valitaan alustavat poikkileikkaukset ristikon paarre- ja uumasauvoille. Sauvojen valinnassa voidaan tässä suunnitteluvaiheessa käyttää yksinkertaistettua laskentamallia, josta saadaan selville suuntaa-antavat rasitukset. Ristikoissa tulisi pyrkiä käyttämään sauvoja, jotka kuuluvat poikkileikkausluokkiin 1 ja 2. Käytettävien sauvojen seinämäpaksuuksien tulee olla vähintään 3 mm. Kuvassa 3 on esitetty uumasauvojen ja paarteiden leveyksien välinen optimaalinen suhde, jonka tulisi olla noin 0,6–0,8. Tässä suunnitteluvaiheessa on hyvä tarkastella alustavasti myös raskaimmin kuormitettujen liitosalueiden kestävyksiä.



Kuva 3. Uumasauvan ja paarteen leveyksien optimaalinen suhde

Alustavan suunnittelun jälkeen muodostetaan rakenteesta laskentamalli FEM-laskentaohjelmalla ja lasketaan ristikon todelliset sauvavoimat. Laskentaohjelmalla tarkastetaan jokaisen sauvan kestävyys ja tarvittaessa optimoidaan rakennetta. Lisäksi tässä suunnitteluvaiheessa tulisi varmistaa, että liitosten epäkeskisyydet ja sauvojen mitat täyttävät niille asetetut vaatimukset. Kun sauvojen lopulliset poikkileikkaukset on määritetty, suunnitellaan sauvojen liitokset ja mahdolliset liitosalueiden lisävahvistukset. (5, s. 425)

Lopuksi varmistetaan, ettei rakenteen taipumat ylitä sallittuja raja-arvoja. Lisäksi suunnitellaan ristikon poikittaissuuntainen tukeminen sekä orsien ja ristikon väliset liitokset. (5, s. 426)

3.2 Ylä- ja alapaarteet

Paarresauvana käytettävän rakenneputken poikkileikkauksen muotoon vaikuttaa merkittävästi paarteen eri akseleiden suuntaiset nurjahduspituudet. Kun nurjahduspituudet ovat lähellä toisiaan sauvan molempiin suuntiin, on usein järkevää käyttää neliöprofiilia. Jos nurjahduspituudet poikkeavat selvästi toisistaan, on suorakaiteen muotoinen poikkileikkaus usein neliöprofiilia järkevämpi valinta. (5, s. 429.)

Puristetun paarteen nurjahduspituutena voidaan käyttää arvoa $L_{cr}=0,9*L$ sauvan molemmissa suunnissa tapahtuvaa nurjahdusta vastaan. Nurjahduksessa, joka tapahtuu ristikon tasossa, käytetään L:n arvona uumasauvojen solmupisteiden välistä etäisyyttä. Kohtisuorasti ristikon tasoa vastaan tapahtuvan nurjahduksen laskennassa käytetään L:n arvona paarteen poikittaistukien välistä etäisyyttä.

Paarteen nurjahduskestävyyttä on yksinkertaisinta kasvattaa suurentamalla poikkileikkauksen ulkomittoja. Uumasauvojen ja paarteen välisen liitoksen kestävyttä voi lisätä kasvattamalla paartessa käytettävän profiilin seinämän paksuutta. (5, s. 430.)

3.3 Uumasauvat

Uumasauvaksi kannattaa yleensä valita paarresauvaa ohutseinäisempi profiili, jonka myötä uuma- ja paarresauvan välisessä hitsausliitoksessa saavutetaan

hyötyjä liitoksen lujuuden ja liitoshitsin pienemmän a-mitan suhteen. Uumasauvan tulee kuulua poikkileikkausluokaan 1 tai 2, ja sauvan leveyden suhteen tulee olla 0,6–0,8 parresauvan leveydestä. Jos uumasauva on liian kapea suhteessa paarteen leveyteen, uumasauvan laipoilta tuleva normaalivoima ei siirry parresauvana toimivan rakenneputken voimaisille laipoille. Tämä voi aiheuttaa sauvojen liitosalueella parresauvan lommahduksen tai läpileikkautumisen.

Nurjahduspituutena uumasauvalla voidaan Eurokoodi 3:n mukaan käyttää arvoa $L_{cr}=0,75*L$, jossa L on sauvan solmupisteiden välinen etäisyys. Jos laskentaan halutaan lisävarmuutta, voidaan nurjahduspituutena käyttää sauvan solmupisteiden välistä etäisyyttä kokonaisuudessaan, jolloin $L_{cr}=L$.

Uumasauvan poikkileikkauksen muodon valinnalla voidaan liitoskulmien ohella vaikuttaa merkittävästi liitoksen epäkeskisyyden suuruuteen (5, s. 431).

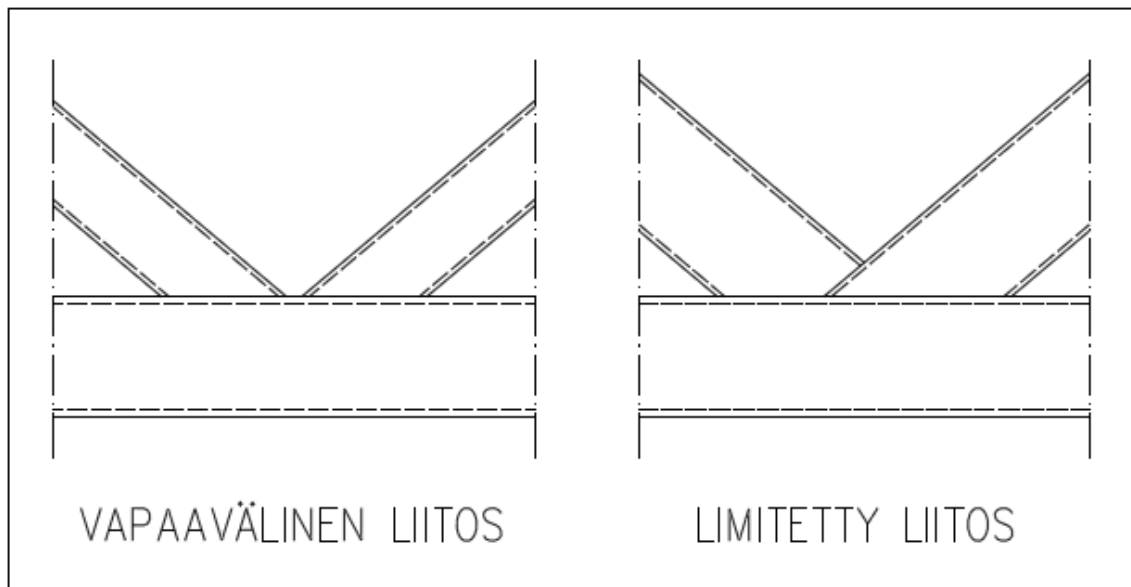
Ristikon uumasauvat ovat yleensä tarpeellista mitoittaa ainoastaan sauvassa vaikuttavalle normaalivoimalle. Poikkeuksena ristikot, jotka ovat raskaasti kuormitettuja tai jänneväliittäin pitkiä. Tällaisessa poikkeavassa tilanteessa lähellä ristikon tukipisteitä sijaitsevien uumasauvojen mitoituksessa tulee huomioida myös sauvaan kohdistuvan taivutusmomentin aiheuttava rasitus.

3.4 Liitosalueiden suunnittelu

Ristikkorakenteen sauvojen väliset liitokset voivat olla joko limitettyjä tai vapaavälisiä liitoksia. Kuvassa 4 on esitetty esimerkit molemmista liitostyypeistä. Vapaaväliset liitokset ovat yleensä valmistusteknisesti helpompia toteuttaa, kun uumasauvan päähän tulee vain yhdensuuntainen viiste ja kokoonpanossa on hieinan enemmän sovitustoleranssia limitettyyn liitokseen verrattuna. Jos ristikon uumasauvoina käytetään neliöprofiileja, kasvaa vapaavälisen liitoksen epäkeskisyyden usein suureksi. Liitoksen epäkeskisyyden arvo on uumasauvojen neutraaliakselien leikkauspisteen ja parresauvan neutraaliakselin välinen etäisyys. Epäkeskisyyden aiheuttama lisämomentti paarteeseen.

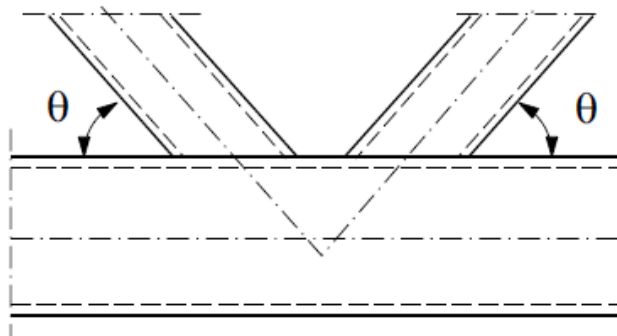
Limitetty liitos on valmistusteknisesti vapaaväliseen liitokseen verrattuna työlämpi, kun vähintään yhden sauvan pää täytyy viistää kahdessa kulmassa. Lisäksi liitoksen sovitustoleranssit ovat tiukemmat. Limitetyn liitoksen kestävyys on

kuitenkin huomattavasti parempi ja liitoksen epäkeskisyys on mahdollista poistaa kokonaan.



Kuva 4. Esimerkit vapaavälisestä ja limitetystä liitostyypistä

Uumasauvojen liitoskulmien θ tulisi olla vähintään 30° . Pienillä liitoskulmilla sauvan terävän päädyn hitsaamisesta tulee hankalaa ja pienetkin virheet sauvan pään katkaisussa voivat aiheuttaa suuria ilmarakoja liitokseen. Pienillä liitoskulmilla voidaan kuitenkin käyttää neliöprofiileja ilman, että liitoksen epäkeskisyys kasvaa välttämättä liian suureksi. Varsinkin suurilla liitoskulmilla uumasauvoina kannattaa käyttää suorakaideprofiileja, jolloin liitoksen epäkeskisyyden suuruus on helpommin hallittavissa. (5, s.432) Kuvassa 5 on esitetty liitoskulmien määräytyminen ja sijainti vapaavälisessä liitoksessa.



Kuva 5. Liitoskulmat θ esitetty vapaavälisessä liitoksessa (5, s.432)

Liitosten hitsausseamat tulee mitoittaa sauvojen kanssa tasalujuisiksi. Tämä mahdollistaa paarteen ja uumasauvojen myötäämisen, joka tasaa alueelle syntyviä jännityshuippuja. (5, s.433.)

Ristikkoliitoksia voidaan tarvittaessa vahvistaa lisälevyillä. Lisälevyt kasvattavat ristikon valmistuskustannuksia, mutta jos vahvistettavia liitoksia on vähän suhteessa muihin ristikkoliitoksiin, voidaan sauvoihin valittujen poikkileikkauksien kasvatusta välttää ja tämän myötä ristikon paino voi pysyä alhaisempana. Paarteen pintaa voidaan vahvistaa hitsaamalla lisälevy uumasauvojen päiden ja parresauvan väliin. Tällä menettelyllä voidaan esimerkiksi estää uumasauvan läpileikkautuminen paarteen seinämästä. Paarteen leikkauskestävyyttä liitosalueella voidaan puolestaan kasvattaa parresauvan kylkiin hitsattavilla sivulevyillä. (5, s.433.)

4 Jäykkänurkkaisen kehärakenteen alkuepäkeskisyyden aiheuttaman lisävaakavoiman laskenta ja huomiointi suunnittelutyössä

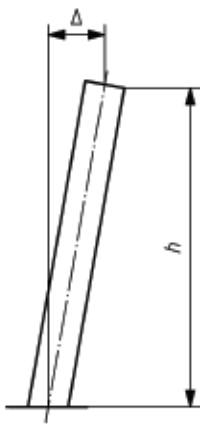
Tässä luvussa käsitellään kehärakenteeseen sen geometrisista alkuepäkeskisyyksistä aiheutuvan lisävaakavoiman syntymistä ilmiönä ja kerrotaan tilanteet, joissa rakenteen alkuepätkäruudut tulee Eurokoodin mukaisessa suunnittelutyössä huomioida. Lisäksi luvussa on esitetty laskentamenetelmiä lisävaakavoiman laskentaan.

Työssä on keskitytty tarkastelemaan jäykkänurkkaisen ja ristikkorakenteisen kehän alapaarresauvojen nurkkapisteeseen, rakennetta kohtisuoraa tasoa vastaan, syntyneestä epäkeskisyydestä aiheutuvaa lisävaakavoimaa. Tämä lisävaakavoima voidaan välittää ulos kehästä sen nurkkapistettä tukevalla siderakennesauvalla. Laskelmissa on oletettu kehän ympärillä olevien rakenteiden olevan äärettömän jäykkiä ja sivusiirtymättömiä. Rakenteeseen myöhemmin syntyvät toisen asteen muodonmuutokset on laskelmissa jätetty huomioimatta. Todellisuudessa rakennuksessa voi olla useita siderakenteilla toisiinsa liitettjä vierekkäisiä kehiä, joista jokaisella on omat alkuepäkeskisyytensä, jotka aiheuttavat muodon-

muutoksia siderakenteisiin ja viereisiin kehärakenteisiin. Lisäksi kehän oman kokoonpanon yksittäisten sauvojen alkukäyryydet ja -vinoudet voivat vaikuttaa kehästä ulos siirtyvän lisävaakavoiman suuruuteen. Kaikkien näiden muuttujien huomiointi olisi suunnittelutyössä mahdollista esimerkiksi tuottamalla samasta rakennuksesta ja sen kehärakenteista useita erilaisia alkuepäkeskisyyksiä sisältäviä FEM-laskentamalleja.

Alkuepäkeskisyyttä syntyy jäykkänurkkaiseen kehärakenteeseen jo kehän kokoonpanovaiheessa, jossa sallitaan teräsrakenteiden toteutusta ja teknisiä vaatimuksia koskevan standardin SFS-EN 1090-2 mukaisten valmistustoleranssien käyttö. Lisäksi kehän parresauvojen liitoskohta, eli niin sanottu nurkkapiste, voi siirtyä sivuun lisää suhteessa kokoonpanon tarkoitettuun keskilinjaan työmaalla kokoonpanon asennusvaiheessa. Teräsrakenteiden asennustoleransseille on valmistustoleranssien tavoin määritelty sallitut raja-arvot standardissa SFS-EN 1090-2. Työn laskemissa on käytetty kehän parresauvojen nurkkapisteelle sallitun epäkeskisyyden määrittämisessä SFS-EN 1090-2:ssa määrättyä pilarin olennaisen asennustoleranssin suurinta sallittua mittapoikkeamaa $h/300$ (Kuva 6), jossa h :n arvona on käytetty parresauvojen nurkkapisteen korkeutta.

D.1.11 Olennaiset asennustoleranssit – [A1] Yksikerroksisten rakennusten pilarit <A1]

Nro	Poikkeaman tyyppi	Mittauskohde	Sallittu poikkeama Δ
1	<p>[A1] Yksikerroksisten rakennusten pilarien vinous: <A1]</p> 	Kokonaisvinous kerroskorkeuden h matkalla:	$\Delta = \pm h / 300$

Kuva 6. Pilarin sallittu olennainen asennustoleranssi standardin SFS-EN 1090-2 mukaan (6, s.118)

4.1 Epätarkkuuksien huomiointi

Teräsrakenteiden suunnittelua käsittelevässä Eurokoodi 3:n osassa EN 1993-1-1 esitetään, että rakennelaskemissa tulee ottaa huomioon kuormittamattoman rakenteen epätarkkuuksien vaikutukset. Näitä epätarkkuuksia, joita Eurokoodissa kutsutaan ekvivalenteiksi geometrisiksi epätarkkuuksiksi, ovat rakenteen alkujännitykset ja geometriset epätarkkuudet, kuten alkuvinous tai alkukäyryys. Suunnittelussa on huomioitava koko rakenteen ja jäykistysjärjestelmien globaalit epätarkkuudet ja yksittäisten sauvojen paikalliset epätarkkuudet. (4, s.33.)

Laskettaessa kehärakenteen sauvojen päiden voimia ja mitoitettaessa sauvan nurjahdus- tai kiepahduskestävyyttä, voidaan sauvan alkukäyryydestä aiheutuva epäkeskisyys jättää kyseisessä kestävyystarkastelussa huomioimatta. Toisen kertaluvun vaikutuksille herkissä, sivusiirtävissä kehissä sauvan paikallinen alkukäyryys tulee huomioida niissä puristetuissa sauvoissa, joissa sauvan toisessa päässä on jäykkä liitos tai sauvan muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}$ toteuttaa kaavan 19 ehdon. (4, s.35.)

$$\bar{\lambda} > \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{Ed}}} \quad (19)$$

4.2 Lisävaakavoiman laskentatavat

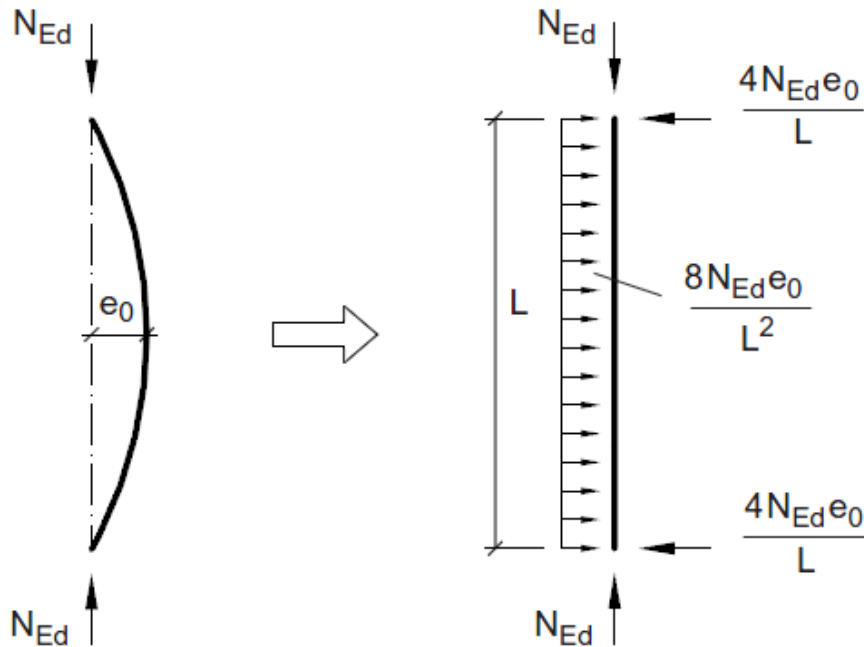
4.2.1 Ekvivalentti vaakavoima

Paikallisen alkukäyryyden muodossa olevan alkuepätarkkuuden vaikutukset voidaan Eurokoodi 3:n ohjeiden mukaan korvata kuvassa 7 esitetyllä ekvivalentilla vaakakuormalla. Ekvivalentti vaakavoima q_{ekv} voidaan laskea kaavalla 20.

$$q_{ekv} = \frac{8 * N_{Ed} * e_0}{L^2} \quad (20)$$

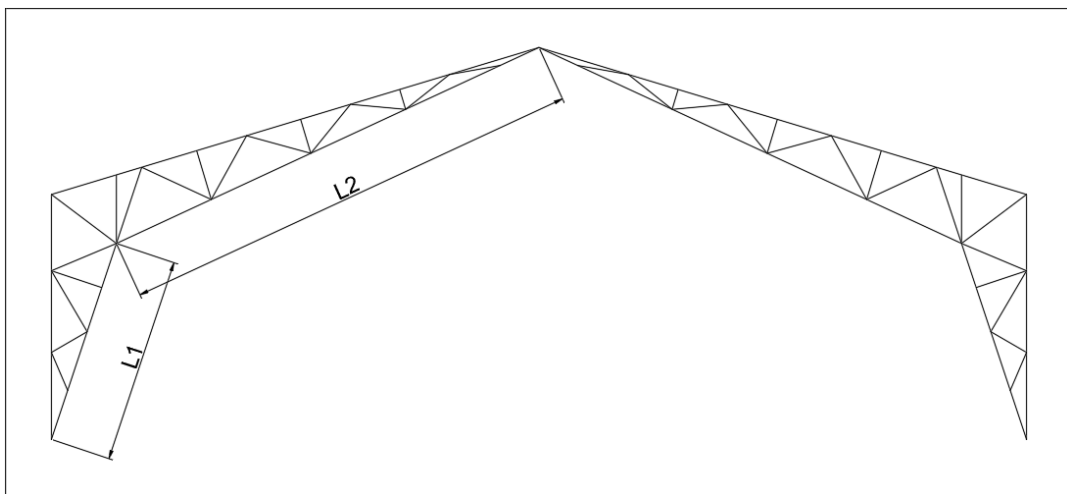
Tätä vaakavoimaa tulisi käyttää rakennuksen laskentamalleissa sen kehärakenteiden kaikissa kyseeseen tulevilla vaakasuunnissa, mutta kerrallaan vain yhteen suuntaan yhden kuormitusmallin sisällä (4, s.36). Vierekkäisissä kehissä

voidaan kuormitussuuntia vaihdella eri kehien välillä. Laskentamalliin kehän nurkkapisteeseen voidaan lisätä vaakavoiman resultantti, koko molempia parresauvoja kuormittavan tasaisen lisävaakavoiman sijaan.



Kuva 7. Alkukäyryden korvaus ekvivalentilla vaakakuormalla (7, s.532)

Tämän opinnäytetyön laskelmissa ekvivalentin vaakavoiman laskennassa sauvan pituuden arvona L on käytetty alapaarresauvojen yhteispituutta, jolloin $L=L_1+L_2$. L_1 :n ja L_2 :n määrittäminen on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Havainnekuva paarteiden yhteispituuden määrittämisestä työn laskelmissa

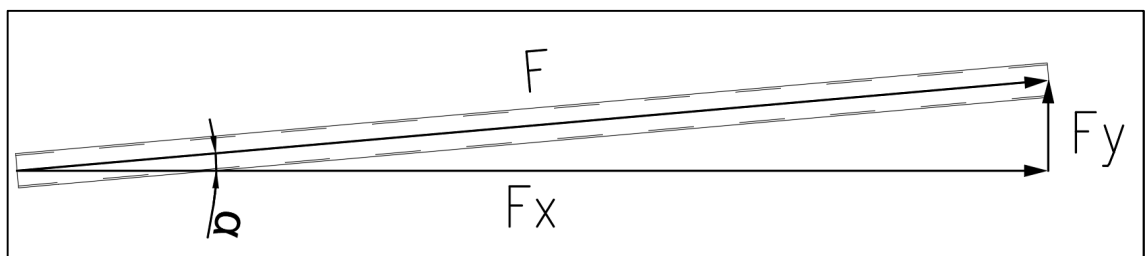
Kun sauvojen pituuksista käytetään laskennassa niiden yhteispituutta, on näiden kahden parresauvan ajateltava toimivan yhdessä yhtenä jäykkänä sauvana. Kuvassa 8 esitetyn kaltaisessa jäykkänurkkaisessa kehässä, jossa parresauvat ovat liitetty hitsaamalla toisiinsa, voidaan ekvivalentin vaakavoiman laskennassa käyttää sauvojen yhteispituuden arvoa.

Sauvan alkukaarevuuden e_0 arvona on laskelmissa käytetty asennustoleranssien mukaista suurinta sallittua mittapoikkeamaa $h/300$. Sallitun mittapoikkeaman määrittämisessä korkeuden h arvona tulee käyttää alapaarresauvojen nurkkapisteen korkeutta.

Paarresauvoissa vaikuttava suurin puristusvoima N_{Ed} on laskelmiin määritetty alkuepäkeskisyyksiä sisältämättömällä FEM-laskentamallilla. Laskentamallissa kehää on kuormitettu ainoastaan lumikuormalla ja laskennassa on huomioitu kehän omasta massassa aiheutuvat kuormat.

4.2.2 Lisävaakavoiman laskenta vinouskulmilla

Statiikan ja trigonometrian sääntöjen mukaan voiman resultantti voidaan jakaa useisiin eri suuntaisiin komponentteihin, jotka yhdessä muodostavat resultantin suuntaisen ja suuruisen voiman. Alkuepäkeskisyydestä aiheutuvan lisävaakavoiman laskennassa voidaan olettaa kehän alapaarteessa vaikuttavan puristusvoiman olevan resultantti, joka koostuu kehän tason suuntaisesta ja kehään kohtisuorasti vaikuttavasta voimakomponentista. Kuvassa 9 on esitetty esimerkkitilanne voiman F resultantin muodostumisesta kahden voimakomponentin, F_x ja F_y avulla.



Kuva 9. Resultantin muodostuminen voimakomponenteista

Kehärakenteesta ulos siirtyvän lisävaakavoiman suuruus saadaan määritettyä laskemalla yhteen parresauvojen kehään kohtisuorasti vaikuttavat vaakakomponentit (F_y). Vaakakomponentin laskenta on mahdollista kaavalla 21, kun tiedetään parresauvan vinouskulman ja sauvassa vaikuttavan puristusvoiman suuruus.

$$F_y = \frac{\sin \alpha}{F} \quad (21)$$

Vinouskulman suuruus voidaan määrittää teräskokoonpanojen asennustoleransseissa määritetyn suurimman sallitun mittapoikkeaman avulla. Parresauvassa vaikuttavan normaalivoiman suuruus saadaan selville esimerkiksi kehän alkuepäkeskisyyksiä sisältämättömästä FEM-laskentamallista.




4.2.3 FEM-laskenta

Kehärakenteen alapaarresauvojen nurkkapisteen alkuepäkeskisyydestä syntyvän lisävaakavoiman suuruus on mahdollista määrittää FEM-laskentaohjelman avulla. Tässä opinnäytetyössä voiman laskemiseksi on muodostettu alkuepäkeskisyydet sisältäviä laskentamalleja Autodeskin Robot Structural Analysis -ohjelmalla. Kuvassa 10 on esitetty kyseisellä Robot Structural Analysis -ohjelmalla muodotettu kehän laskentamalli, jossa kehän toisen puolen nurkkapistettä on siirretty kehän tasoa vasten kohtisuorasti sen suurimman sallitun asennustoleranssin arvon mukaan. Kehän toinen puoli on tässä lasketamallissa mallinnettu alkuepäkeskisyyksiä sisältämättömäksi, jolloin samasta laskentamallista ja kuormitustilanteesta on saatu helposti lähtötiedot parresauvojen rasitusten osalta työssä myös muihin, FEM-laskennan tulosten vertailukohtina toimineisiin laskentamenetelmiin.



Kuva 10. Autodesk Robot Structural Analysis -ohjelmalla muodostettu nurkkapisteen alkuepäkeskisyyden sisältävä kehärakenteen FEM-laskentamalli

Yksi tapa mallintaa nurkkapisteen epäkeskeisyys laskentamalliin on siirtää kehän alapaarresauvojen solmupistettä ennen ristikon uumasauvojen mallinnusta. Tällä tavoin mallinnettaessa uumasauvan pää yhdistyy suoraan, jo siinä vaiheessa vinon alapaarresauvan normaaliakseliin. Uumasauvojen solmupisteitä ei tarvitse enää myöhemmin siirtää yksitellen kohtaamaan paarresauvan akselia. Mikäli uumasauvan pään solmupiste ei kohtaa laskentamallissa paarresauvan normaaliakselia, FEM-ohjelma olettaa ettei sauvojen välillä ole liitosta. Kuvassa 11 on esitetty kehän nurkan paarresauvojen solmupisteen parametrit Robot Structural Analysis -ohjelmasta, jossa solmupistettä on siirretty kehän tasoa vasten kohtisuorassa tasossa, tässä tapauksessa Y-akselin suunnassa 17 mm.

Name	Value	Unit
List of nodes	2	
General		
Adjoining m...	1 2 5 7 12 13	
Adjoining el...	10 22	
Geometry		
Coordinates	2,000 0,017 6,0...	
X	2,000	(m)
Y	0,017	(m)
Z	6,000	(m)
Type of coo...	cartesian	
Additional characteristics		
Support...	Pinned y	
Rigid Link...		
Compatible...		

Kuva 11. Näkymä kehän parresauvojen nurkan solmupisteen parametreista Autodesk Robot Structural Analysis -ohjelmasta

Alkuepäkeskisyydestä aiheutuvan lisävaakavoiman suuruus saadaan ohjelmalla laskettua sijoittamalla kehän tasoa vasten kohtisuoraa liikettä estävä tukilaite kehärakenteen nurkkapisteeseen, kohtaan johon kehien välisen siderakennesauvan on tarkoitus liittyä. Tukipisteeseen syntyy näin lisävaakavoiman suuruinen tukivoima.

4.3 Siderakennesauvan muodonmuutoksen vaikutus

Mikäli siderakenteessa sallitaan muodonmuutosta, tässä tapauksessa venymää, lisää se kehärakenteen epäkeskisyyttä. Kun epäkeskisyyks kasvaa, suurenee myös kehän nurkan epäkeskisyydestä aiheutuva lisävaakavoima ja perustuksille aiheutuvat momentti- ja leikkausvoimarasitukset. Vetosauvan venymä u voidaan laskea kaavalla 22. Kaavassa voiman F arvona tulee käyttää siderakenteella tuettavan kehärakenteen liitoskohdassa vaikuttavan vaakavoiman arvoa. Pituuden arvona L käytetään siderakennesauvan pituutta ja pinta-alan arvo A määräytyy

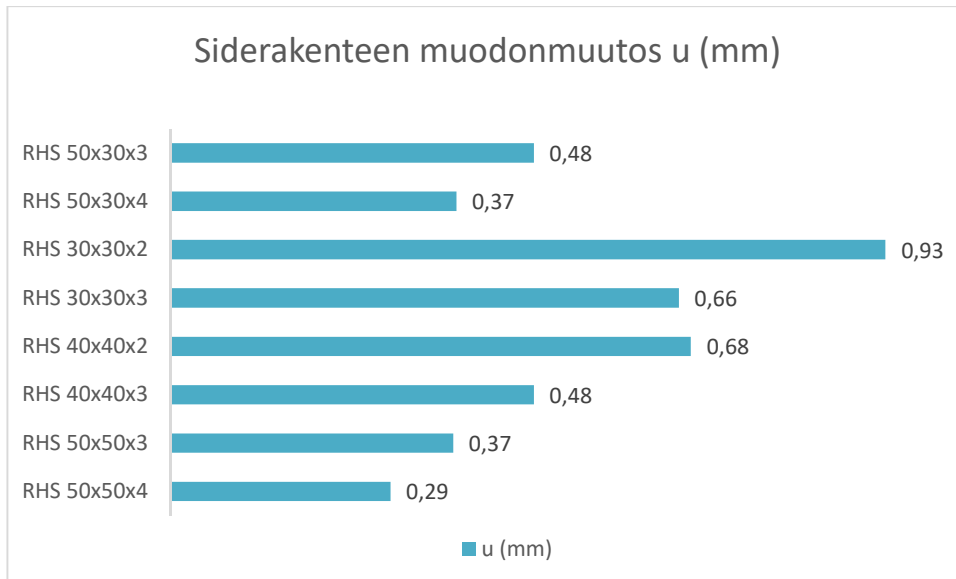
sauvan poikkileikkauksen mukaan. Vakiosuure E ilmaisee kaavassa materiaalin kimmomoduulia, jonka arvo teräksellä on 210000 N/mm².

$$u = \frac{F * L}{E * A} \quad (22)$$

Siderakenteen pituussuuntaisen muodonmuutoksen määrittäminen onnistuu tällä laskentamenetelmällä, jos sauvan toinen pää voidaan olettaa sivusiirtymättömäksi. Mikäli kehärakenne on tuettu siderakennesauvalla viereiseen rakenteeseen taivutuksen nähdessä molemmilta puolilta, vastustaa vastainen siderakenne nurkan siirtymää. Monissa tapauksissa ei siis voida olettaa sauvan venymän suuruuden olevan suoraan määritettävissä kehän alkuepäkeskisyydestä aiheutuvan lisävaakavoiman suuruuden perusteella.

Tilanne, jossa tätä laskentatapaa on yksinkertaisinta soveltaa, on hallirakennuksen päätykehän nurkkapisteeseen siderakennesauvan muodonmuutoksesta aiheutuvan lisäsiirtymän määrittäminen. Päätykehän ollessa tuettu siderakennesauvoilla vain toiselta puoleltaan, sauvan venymään vaikuttavien ulkoisten muuttujien määrä vähenee.

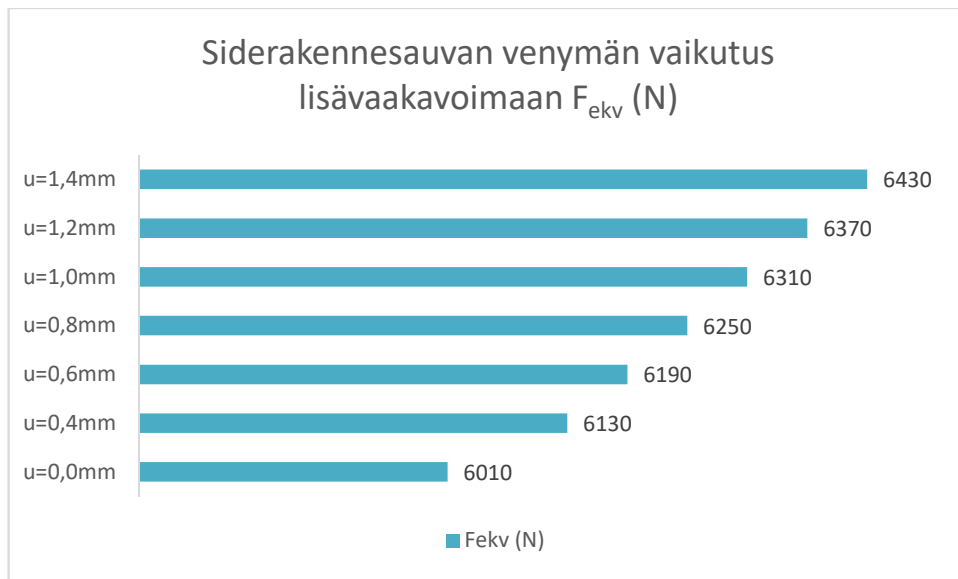
Kuviossa 1 on tuloksia siderakennesauvan pituussuuntaisen muodonmuutoksen eli venymän arvon u laskennasta eri kokoisilla RHS poikkileikkauksilla. Laskennassa lisävaakavoiman arvona on käytetty 6 kN:n suuruista voimaa, joka on lähellä työn laskelmissa käytetyistä esimerkkikehistä saatua suurinta lisävaakavoimaa. Siderakennesauvan pituutena on laskuissa käytetty seitsemää metriä.



Kuvio 1. Kuvaaja siderakenteen muodonmuutoksien arvoista u

Venymä on näillä RHS-profiileilla noin 0,3...1,0 millimetriä. Mikäli teräsprofiilin poikkileikkaus pysyy samana, kasvaa siderakenteen venymä suoraan verrannollisesti voiman tai sauvan pituuden suhteessa. Esimerkiksi sauvan pituuden kaksinkertaistuksessa sauvan venymä kaksinkertaistuu. Jos taas voima ja sauvan pituus pysyvät samana poikkileikkauksen pinta-alan puolittuessa, sauvan venymä kaksinkertaistuu.

Kuviossa 2 on esitetty tuloksia siderakennesauvan venymän vaikutuksesta lisävaakavoiman suuruuteen, kun voiman suuruus lasketaan Eurokoodin mukaisesti ekvivalentin lisävaakavoiman avulla. Laskennassa on käytetty apuna työn esimerkkikehän 1 arvoja. Alapaarresauvojen yhteispituutena on käytetty 25,8 metriä ja alkuepäkesisyyden e_0 arvona 20 millimetriä ennen venymän aiheuttamaa lisämuodonmuutosta. Paarresauvan puristusrasituksen arvona N_{Ed} on käytetty 970 kN:n suuruista voimaa.



Kuvio 2. Kuvaaja siderakennesauvan venymän vaikutuksesta ekvivalentin vaakavoiman avulla lasketun lisävaakavoiman suuruuteen

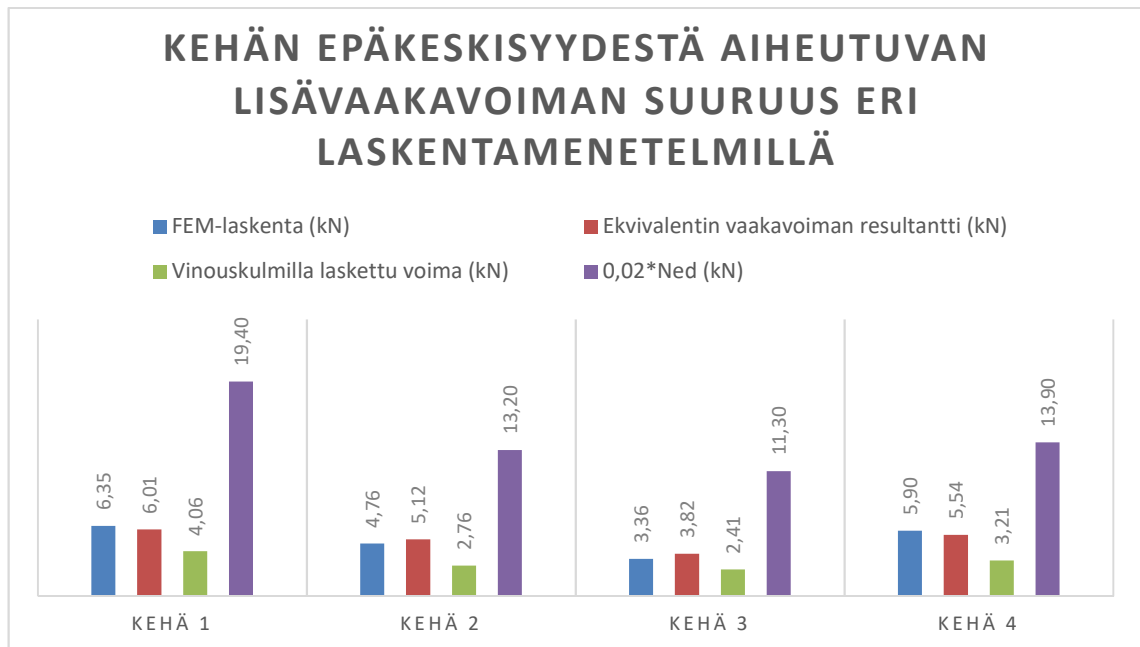
1,0 mm venymä kasvatti tässä esimerkkitapauksessa noin 5 % lisävaakavoiman suuruutta ja 1,4 mm venymä kasvatti voimaa noin 7 %. Pieni 0,4 mm muodonmuutos siderakenteessa kasvatti lisävaakavoimaa kuitenkin vain noin 2 %:n verran. Ristikon alapaarteen puristusvoiman suuruus ei laskelmien perusteella vaikuta näihin suhteisiin.

5 Tulokset

Tässä opinnäytetyössä esitettyjä laskentamenetelmiä alkuepäkeskisyydestä aiheutuvan lisävaakavoiman laskentaan on kokeiltu neljään erilaiseen esimerkki-kehään. Esimerkkikehien päämitat on esitetty tämän opinnäytetyön liitteessä 2. Kuviossa 3 on esitetty pylväsdiagrammit eri laskentamenetelmillä saaduista tuloksista jokaisen neljän kehän osalta.

Laskentamenetelmistä FEM-laskenta on toteutettu Autodeskin Robot Structural Analysis -ohjelmalla tuottamalla kehärakenteen nurkkapisteen alkuepäkeskisyyden sisältävä FEM-laskentamalli. Ekvivalentin vaakavoiman resultantin suuruus on laskettu Eurokoodin osassa EN 1993-1-1 esitetyn sauvan alkukäyryyden huomiointiin liittyvien ohjeiden mukaan. Vinouskulmien avulla laskettu voiman suuruus on määritetty statiikan ja trigonometrian sääntöjen perusteella. Rakenteen

pystysuoran vinouden perusarvoon perustuvaa menetelmää, jonka mukaan rakenteeseen syntyvä lisävaakavoima on 2 % puristetun sauvan normaalivoimasta, on käytetty neljäntenä vertailukohtana muille laskentatavoille.



Kuvio 3. Lisävaakavoiman suuruus eri laskentamenetelmillä työn esimerkkikehässä

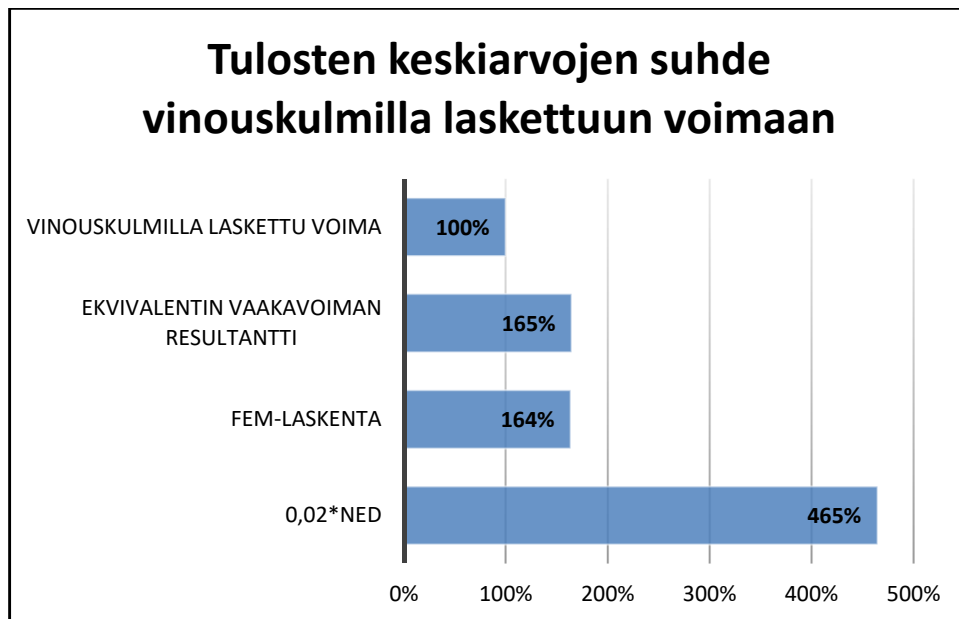
Verrattaessa Robot Structural Analysis -ohjelmasta saatuja tuloksia lisävaakavoiman suuruudesta ekvivalentin vaakavoiman tai vinouskulmien avulla laskettuihin tuloksiin tulee muistaa, että ohjelma huomioi laskennassa myös kehärakenteessa tapahtuvat toisen asteen muodonmuutokset. Lisäksi FEM-ohjelmat käyttävät laskennassa huomattavan määrän parametrejä, joita muut tässä työssä esitetyt laskentamenetelmät eivät itsessään ota huomioon.

Statiikan sääntöjen mukaan vinouskulmien avulla saadun lisävaakavoiman voidaan olettaa suuruudeltaan olevan lähinnä todellista, ainoastaan ensimmäisen asteen alkuepäkeskisyyksistä aiheutuvaa lisävaakavoimaa. Koska kaikilla muilla menetelmillä saadut tulokset ovat vinouskulmilla laskettuja voimia suurempia, voidaan todeta näiden laskentamenetelmien antavan suunnittelijan näkökulmasta varmallalla puolella olevia tuloksia.

Pystysuoran vinouden perusarvoon perustuva yksinkertaistettu laskentatapa näyttäisi antavan lähes viisi kertaa suuremman tuloksen kuin vinouskulmiin

perustuva laskentatapa. Tätä menetelmää tulisikin käyttää lähinnä vertailukohtana muille laskelmille, samalla tiedostaen, että se todennäköisesti antaa huomattavasti todellista tilannetta suuremman tuloksen.

Kuviossa 4 on esitetty tämän opinnäytetyön laskelmissa käytetyn neljän esimerkikiehen laskelmien tulosten keskiarvojen suhteet verrattuna suuruudeltaan pienimmän lopputuloksen antaneeseen vinouskulmalaskentaan.



Kuvio 4. Lisävaakavoiman laskennan lopputuloksien keskiarvojen suhteet verrattuna vinouskulmalaskennan tuloksiin

6 Yhteenveto

Opinnäytetyön lopputuloksena tuotettiin suunnitteluohje, joka sisältää ohjeistuksen jäykkänurkkaisen kehärakenteen nurkkapisteen alkuepäkeskisyyden aiheuttaman lisävaakavoiman laskentaan. Lisäksi suunnitteluohjeessa esitetään keskeisimpiä teräsrakenteisen kehä- ja ristikkorakenteen käytännön suunnittelytyössä huomioitavia tekijöitä.

Työn alussa perehdyttiin teräsrakennesuunnittelun perusteisiin tutustumalla halirakennuksen rakenneosiin ja teräsrakenteiden Eurokoodin mukaiseen murtora-

jatilamitoitukseen. Opinnäytetyön edetessä perehdyttiin ristikkorakenteen suunnitteluun ja Autodeskin Robot Structural Analysis -ohjelman käyttöön osana teräsrakenteen suunnittelua.

Tässä työssä käytetyt laskentamenetelmät antoivat lisävaakavoiman laskennassa lopputulokseksi hieman toisistaan poikkeavia tuloksia. Kuitenkin voidaan todeta jokaisen laskentamenetelmän olevan käyttökelpoinen tapa alkuepäkeskisyydestä aiheutuvan lisävaakavoiman suuruuden määrittämiseen. Mallintamalla alkuepäkeskisyyttä FEM-laskentamalliin saadaan varmasti lähimpänä rakenteessa todellisuudessa vaikuttavaa voimaa vastaava tulos. Epäkeskisyyden mallintaminen suoraan laskentamalliin on kuitenkin työlästä ja vie huomattavasti muita laskentamenetelmiä enemmän aikaa suunnittelutyössä. Kaikissa sivusiirtyvissä kehärakenteissa, joissa puristetussa alapaarresauvassa vähintään toisessa päässä on jäykkä liitos, tulee rakenteen alkuepäkeskisyyttä huomioida. Suunnittelijan täytyy tapauskohtaisesti päättää lisävaakavoiman laskennalle tarvittava tarkkuustaso ja käytettävä laskentamenetelmä.

Käytettävää laskentamenetelmää tärkeämpää suunnittelutyössä on ymmärtää alkuepäkeskisyydestä rakenteeseen aiheutuvien lisärasitusten syntyminen ja varmistaa, että kyseiset rasitukset johdetaan valituilla rakenneosilla turvallisesti ulos rakenteesta. Etenkin tilanteissa, joissa suunniteltavaan kehärakenteeseen ei kohdistu ulkoisia vaakavoimia tai näiden ulkoisten voimien suuruudet ovat pieniä, on olemassa riski, että siderakennesauvat mitoitetaan kestävyydeltään liian pieniksi, mikäli kehän geometrisista alkuepäkeskisyyksistä aiheutuvaa lisävaakavoimaa ei huomioida. Tarkemman laskentamenetelmän valinnan merkitys korostuu silloin, kun rakenteeseen kohdistuvien ulkoisten voimien suuruudet ovat pieniä ja rakenteessa on useita vierekkäisiä kehiä. Siderakennesauvan mitoitukseen vaikuttavat useat eri tekijät, jolloin yksittäisen kehän jäykistyksessä ja tuennassa alkuepäkeskisyyksistä aiheutuva lisävaakavoima voi olla harvoin suurin yksittäinen mitoitettava tekijä tämän sauvan poikkileikkaukselle.

Hallirakennuksen tietyissä osissa mahdollinen siderakennesauvan venymän aiheuttama lisäys lisävaakavoiman suuruuteen oli työn esimerkkilaskelmissa pieni. Venymän suuruuden laskenta ja sen huomiointi lisävaakavoiman

laskennassa on kuitenkin yksinkertaista ja nopeaa, mikäli yhdeltä sivulta tuetun kehän viereiset rakenteet voidaan olettaa sivusiirtymättömiksi. Muissa tapauksissa ainoa järkevä tapa huomioida siderakenteen venymä on mallintaa mitoitettavan kehän lisäksi siderakennesauvat ja viereiset rakenteet FEM-laskentamalliin.

Kuvat

Kuva 1. Havainnekuva hallirungon sauvaosista, s. 6

Kuva 2. Rakennesuunnittelun kulku teräsrunkoisen hallin rakennusprojektissa, s. 7

Kuva 3. Uumasauvan ja paarteen leveyksien optimaalinen suhde, s. 14

Kuva 4. Esimerkit vapaavälisestä ja limitetystä liitostyypistä, s. 17

Kuva 5. Liitoskulmat Θ esitetty vapaavälisessä liitoksessa, s. 17

Kuva 6. Pilarin sallittu olennainen asennustoleranssi standardin SFS-EN 1090-2 mukaan, s. 19

Kuva 7. Alkukäyryyden korvaus ekvivalentilla vaakavoimalla, s. 21

Kuva 8. Havainnekuva paarteiden yhteispituuden määrittämisestä työn laskelmissa, s. 21

Kuva 9. Resultantin muodostuminen voimakomponenteista, s. 22

Kuva 10. Autodesk Robot Structural Analysis -ohjelmalla muodostettu nurkkapisteen alkuepäkeskisyiden sisältävä kehärakenteen FEM-laskentamalli, s. 24

Kuva 11. Näkymä kehän paarisauvojen nurkan solmupisteen parametreista Autodesk Robot Structural Analysis -ohjelmasta, s. 25

Kuviot

Kuvio 1. Kuvaaja siderakenteen muodonmuutoksien arvoista u , s. 27

Kuvio 2. Kuvaaja siderakennesauvan venymän vaikutuksesta ekvivalentin vaakavoiman avulla lasketun lisävaakavoiman suuruuteen, s. 28

Kuvio 3. Lisävaakavoiman suuruus eri laskentamenetelmillä työn esimerkkikehässä, s. 29

Kuvio 4. Lisävaakavoiman laskennan lopputuloksien keskiarvojen suhteet verrattuna vinouskulmalaskennan tuloksiin, s.30

Lähteet

1. Wise Group Finland Oy. <http://www.wisegroup.fi/yritys>. Luettu 17.9.2017
2. Teräsrakenneyhdistys ry. 2010. Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus/Eurocodes 3 -oppikirja.
3. Vaajasaari, H. 2016. Teräsrakenteiden suunnitteluohje. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma.
4. Suomen standardisoimisliitto. 2005. SFS EN 1993-1-1 Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.
5. SSAB Europe Oy. 2016. Rakenneputket EN 1993 -käsikirja.
6. Suomen standardisoimisliitto. 2015. SFS EN 1090-2 Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus. Osa 2: Teräsrakenteita koskevat tekniset vaatimukset.
7. Rautaruukki Oyj. 2010. Hitsatut profiilit EN 1993 -käsikirja.

