

Poikittaistukemattoman paarteen stabiilius

Tuomas Haapanen¹, Ville Laine ja Sami Pajunen

Tiivistelmä. Tässä artikkelissa esitetään, miten poikittaistukemattoman paarteen nurjahduspituus voidaan määrittää hyödyntämällä ristikkorakenteen stabiloivia osia. Poikittaistukemattomalla paarteella tarkoitetaan tässä artikkelissa ristikkopilarin puristettua sisäpaarretta tai kattoristikon alapaarretta. Näissä tapauksissa on perinteisesti käytetty erillistä nurjahdustuentajärjestelmää, jotta nurjahduspituutta tasosta poispäin on voitu pienentää. Kuitenkin, vaikka sisä- tai alapaarre on kokonaan ilman erillistä poikittaistuenta, voidaan nurjahduspituutta redusoida selvästi, jopa arvoon $0,3L-0,4L$, jossa L on paarteen pituus. Tämä perustetaan siihen, että ristikkoa hyödynnetään kokonaisuutena ja otetaan huomioon uumasauvojen taivutus- ja liitosjäykkyudet sekä tukevan/vedetyn paarteen vääntöjäykkyys.

Avainsanat: nurjahduspituus, poikittaistukematon paarre, K-liitoksen rotaatiojäykkyys

Vastaanotettu 1.11.2017. Hyväksytty 3.12.2018. Julkaistu verkossa 31.12.2018.

Johdanto

Stabiiliuden laskenta ja sen huomioon ottaminen tulee aina kyseeseen, kun suunnitellaan puristettuja rakenteita kuten pilaria tai ristikon puristettua paarretta. Myös palkin kiepahdusilmiö sekä esimerkiksi isoja levykenttiä sisältävän korkean I-palkin paikalliset lommahdusilmiöt luetaan stabiiliustehtäviksi. Rakenteen tai rakenneosan nurjahdus voi tapahtua rakenteen tasossa tai rakenteen tasosta poispäin. Rakenteet tulee luonnollisesti mitoittaa molemmille ilmiöille. Usein rakenteet tuetaan erillisellä nurjahdustuennalla tasosta poispäin tapahtuvassa nurjahduksessa, sillä jäykkyys tähän suuntaan on tavanomaisesti pienempi kuin tasonurjahduksessa.

Tässä työssä keskitytään tasosta poispäin tapahtuvaan nurjahdukseen. Erityisesti työn tarkoituksena on tutkia poikittaistukemattomien rakenteiden nurjahdusta. Tyypillisiä tällaisia rakenteita ovat korkean ristikkopilarin sisäpaarre sekä kattoristikon alapaarre niissä tapauksissa, kun ne ovat puristusrasituksen alaisia joko tietyltä osaa paarretta tai koko paarteen matkalta. Ristikkopilareita käytetään teollisuusrakentamisessa, kun pilarilta vaaditaan suurta normaali- ja taivutuskestävyyttä (esim. nosturirata) ja/tai pilari on hyvin korkea. Kattoristikon alapaarre saattaa joutua puristusrasituksen alaiseksi johtuen

¹Vastuullinen kirjoittaja: tuomas.haapanen@ains.fi

muun muassa ristikon jäykästä kiinnityksestä pilariin, poikkeuksellisesta sidejärjestelystä tai kevytrakenteisissa halleissa tuulen imukuormasta.

Työn tarkoituksena on tutkia edellä mainittuja rakenteita ja selvittää kriittisen kuorman perusteella puristetun rakenneosan nurjahduspituus tasosta poispäin tapahtuvaa nurjahdusta vastaan. Useissa lähteissä ja käytännön suunnittelutehtävissä on usein tyydytty varustelemaan esimerkiksi ristikkopilarit erillisellä nurjahdustuennalla sekä todettu, että nurjahduspituus em. tapauksissa on nurjahdustukien välimatka. Tämä lähestymistapa on siinä määrin perusteltua, että ristikon puristetun paarteen on helppo mieltää toimivan tällä tavoin.

Edellä mainittu ei kuitenkaan ota millään tavoin huomioon ristikon rakennetta kokonaisuutena. Tarkoitus on selvittää, mikä vaikutus ristikon vetopaarteella ja tietyn jäykkyyden omaavilla uumasauvojen liitoksilla on puristuspaarteen kriittisen kuorman arvoon. Kun ristikkoa ajatellaan kokonaisuutena, on ristikon vedossa olevien osien ja uumasauvojen kautta muodostuvalla vääntöjäykkyydellä stabiloiva vaikutus. Mikäli edellä mainitut asiat voidaan luotettavasti hyödyntää, voidaan saavuttaa taloudellisia säästöjä. Lisäksi etenkin ristikkopilarin sisäpaarteessa ei voi aina arkkitehtonisista syistä tai käyttäjän vaatimuksista johtuen käyttää suurta määrää nurjahdussiteitä, sillä teollisuushallilta voidaan vaatia leveyttä rakennuksen toiselta ulkopaarteelta toiselle ulkopaarteelle esimerkiksi teollisuuskoneiden vaatiman tilan vuoksi.

Poikittaistukematon paarre

Työn keskeisin tarkoitus on selvittää, mitä hyötyä voidaan saavuttaa poikittaistukemattoman paarteen nurjahdusanalyysissa, kun ristikkoa ajatellaan kokonaisuutena. Kuvassa 1 on esitetty tyypillinen kehä, joka muodostuu kattoristikosta sekä ristikkopilarista, joiden sisä- tai alapaarre ovat tämän työn keskipisteessä.

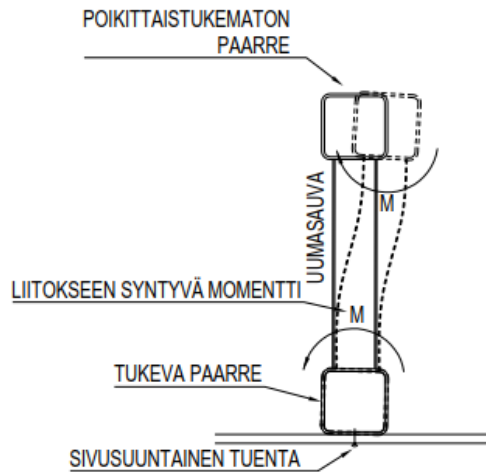
Ristikkopilaria käytetään esimerkiksi silloin, kun pilarilta vaaditaan suurta korkeutta (kymmeniä metrejä), suurta puristuskestävyyttä (nosturiradat) tai kun rungon vaakasiirtymien hallitseminen sitä edellyttää. Myös kattoristikon alapaarre voi joutua puristusrasituksen alaiseksi johtuen esimerkiksi ristikon ja pilarin jäykästä liitoksesta tai kevytrakenteisissa halleissa tuulen imusta katolla.

Yksinkertaisimmillaan tilannetta on käsitelty siten, että puristettu sisäpaarre tuetaan erillisellä nurjahdustuennalla tasosta poispäin tapahtuvaa nurjahdusta vastaan. Tällöin nurjahduspituutena on käytetty nurjahdustuennan välimatkaa. Tämä periaate ajaa pääsääntöisesti tiheään tuentaväliin tai ylimitoitettuun paarteeseen.

Edellä mainittu menetelmä ei ota millään tavalla huomioon ristikon käyttäytymistä kokonaisuutena. Todellisuudessa puristettu paarre saa tukea uumasauvojen taivutusjäykkyyksien sekä tukevan/vedetyn paarteen vääntöjäykkyyden kautta. Tällöin uumasauvojen liitosten jäykkyys vedettyyn ja/tai tuettuun paarteeseen otetaan huomioon todellisen liitoksen jäykkyyttä vastaavilla arvoilla. On olennaista ymmärtää, että näin menetellen laskennassa käytetään hyödyksi tukevan paarteen vääntöjäykkyyttä sekä uumasauvojen ja paarteiden välisten liitoksien momenttijäykkyyksiä tasosta poispäin syntyvää momenttia vastaan. Kuvassa 2 on havainnollistettu tätä ilmiötä.



Kuva 1. Ristikkopilarista ja kattoristikosta muodostuva kehärakenne.



Kuva 2. Ristikkorakenteen uumasauvojen ja paarteiden välisiin liitoksiin kehittyvä momentti.

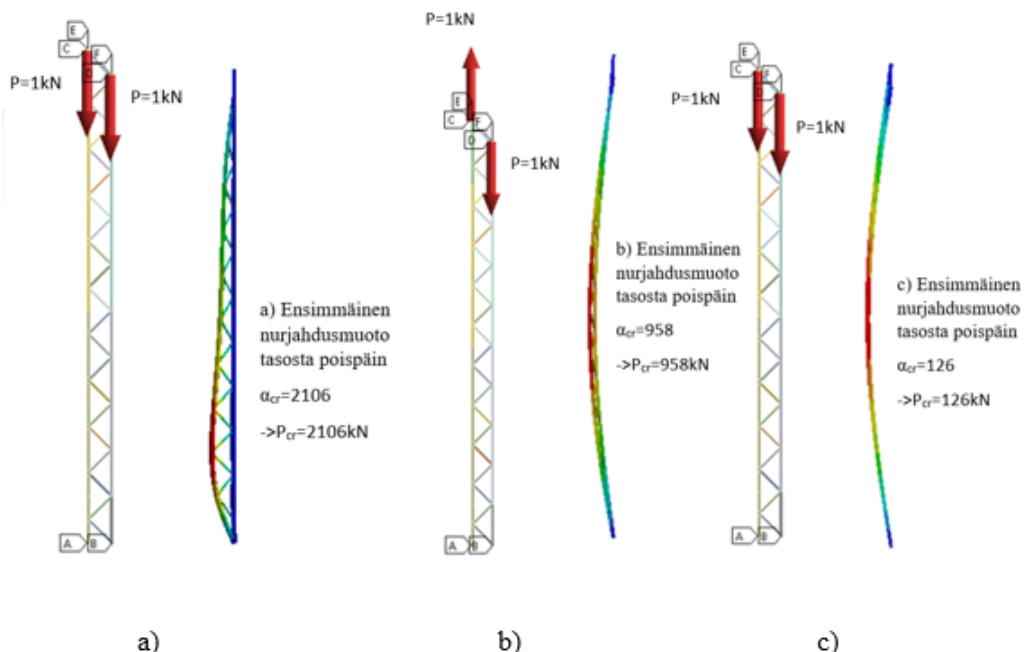
Lisäksi etenkin ristikkopilarin tapauksessa on tärkeää tiedostaa, että tuentaa antavan paarteen on oltava riittävästi tuettu sivuttaissuunnassa, mikäli myös se on puristusrasituk-

sen alainen. Tässä tapauksessa myös tukea antava paarre nurjahtaa ”mukana” eli ristikkopilarin nurjahtaa kokonaisuudessaan. Toisaalta, mikäli tukea antava paarre on mitoittavassa tilanteessa vedettynä, antaa se huomattavasti tukea puristetun paarteen nurjahdukselle ilman erillistä poikittaistuenta. Jo tämän perusteella voi todeta, että poikittaistukemattoman paarteen nurjahdus on hyvin haasteellinen ilmiö ja on riippuvainen monesta asiasta.

Tässä työssä tuettu paarre oletetaan tuetuksi paarteen takaa kuvastaen esimerkiksi kattoristikon tuentaa poimulevyllä tai erillisillä orsilla. Näin ollen nurjahdustuenta on vain sivusuuntainen ilman vääntöjäykkyyttä. Etenkin ristikkopilarin tapauksessa tuenta voidaan siteillä järjestää ulkopaarteen kyljestä, mutta tämän työn puitteissa ei oteta huomioon siitä saatavaa lisähyötyä sisäpaarteen nurjahdusta ajatellen. Vääntöjäykän tuennan tuoma lisäjäykkyys tulee selvittää tapauskohtaisesti.

Havainnollistetaan mainittuja ilmiöitä laskemalla Ansys-ohjelmalla muutama lineaarinen nurjahdusanalyysi 28 metriä korkealle ja 1,4 metriä leveälle ristikkopilarille. Pilarit on mallinnettu käyttäen kuorielementtejä. Kuvassa 3 on lineaarisen nurjahdusanalyysin tuloksia kolmelle erilaiselle tapaukselle:

- Molemmat paarteet on puristettu samalla kuormalla, mutta ulkopaarre on sivusuunnassa tuettu jokaisesta uumasauvojen risteyskohdasta.
- Ulkopaarre on vedetty samalla kuormalla, kuin sisäpaarre on puristettu. Kumpikaan paarre ei ole sivusuunnassa tuettu.
- Molemmat paarteet on puristettu samalla kuormalla, eikä kumpikaan paarre ole sivusuunnassa tuettuna.



Kuva 3. Linearisoidun nurjahdusanalyysin tuloksia samalle ristikkopilarille kolmella eri tuentaehdoilla.

Kuvassa 3 termi α_{cr} on kerroin, jolla referenssikuorma 1kN kerrotaan, jotta saavutetaan kriittinen kuorma P_{cr} . Kun kriittinen kuorma P_{cr} on tiedossa, Eulerin tunnetulla kaavalla (1) voidaan laskea rakenteen nurjahduspituus.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2}. \quad (1)$$

Tapaukselle c) nurjahduspituudeksi saadaan laskemalla 27100 mm eli noin koko paarteen pituus, mikä on luonnollista, sillä kumpaakaan paarretta ei ole tuettu. Tapaukselle b) nurjahduspituus on 9590 mm, eli paarteiden vastakkaismerkkisillä normaalivoimilla on suuri merkitys. Tilanteessa a) nurjahduspituus on 6470mm eli vielä huomattavasti pienempi kuin keskimmaisessä tapauksessa. Tästä havaitaan tukevan paarteen ja uumasauvojen merkitys tukemattoman paarteen nurjahduspituuteen tasosta pois päin.

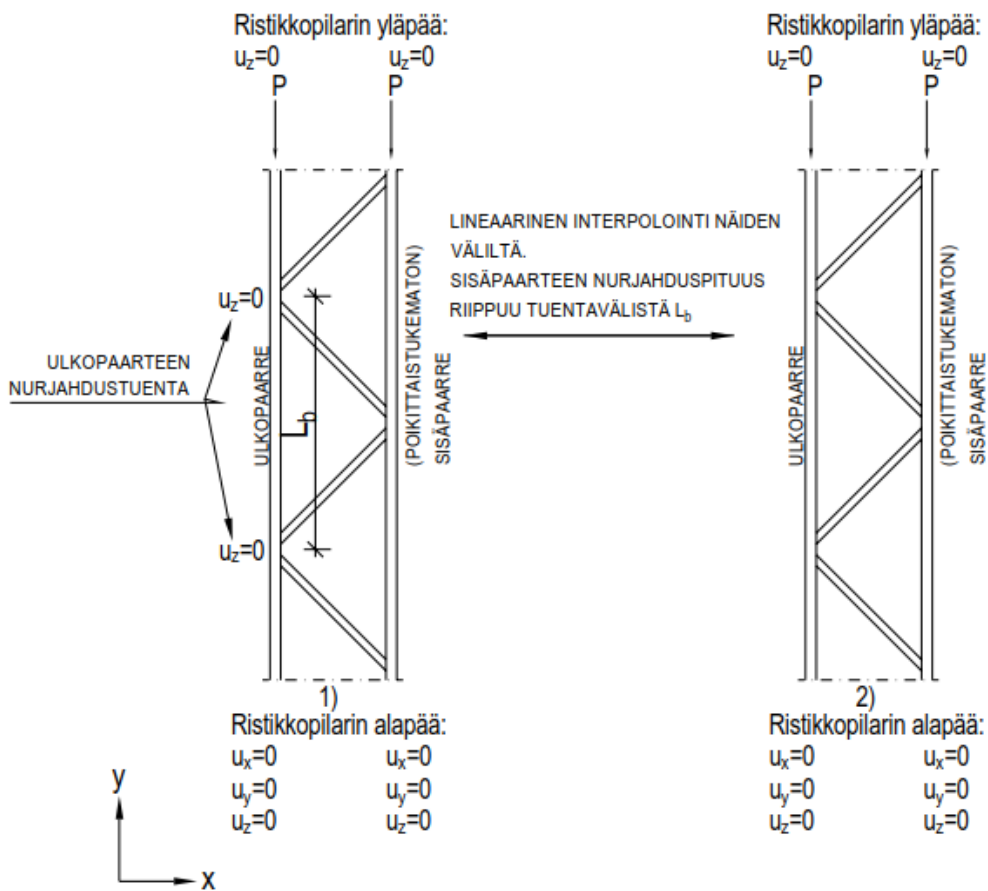
Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan tarkastella normaalivoimien suhteesta tulevaa hyötyä, koska todellisuudessa voimat eivät jakaudu niin tasaisesti, että se voitaisiin yksinkertaisella menetelmällä esittää. Se ei kuitenkaan poista sitä tosiasiaa, että ulkopaarteen ollessa vedettynä tai vähemmän puristettuna, antaa se selkeän tuennan sisäpaarteen nurjahdusta vastaan. Mikäli paarteelle halutaan todentaa lisää kapasiteettia, on se mahdollista tämän menettelyn avulla käyttäen FEM-laskentaa.

Edellisten perusteella työssä tuotettavassa laskentamenettelyssä on tehtävä varmalla puolella olevia oletuksia, että sen käyttö pysyy riittävän käyttäjäystävällisenä. Taulukkoon 1 on koottu tutkimuksessa tehtävät oletukset sekä käsiteltävät aiheet.

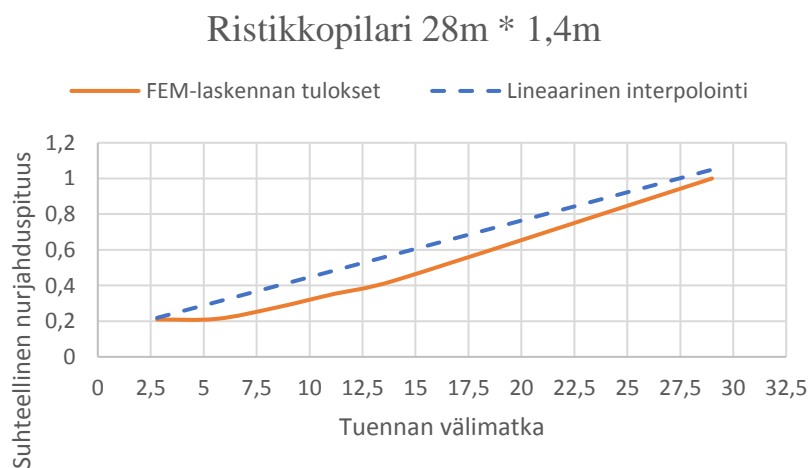
Taulukko 1. Tutkimuksessa käsiteltävät asiat ja tehtävät oletukset.

Käsiteltävät aiheet/tehtävät oletukset	Huomautukset
1. Nurjahdustuennat oletetaan nivelellisiksi (tuki vain sivusuunnassa tasosta pois).	
2. Kattoristikon yläpaarre oletetaan tuetuksi poimulevyllä.	
3. Laskentamenettely laskee ala-/sisäpaarteen nurjahduspituuden, kun ylä-/ulkopaarre on täysin tuettu.	Mikäli ulkopaarre on harvemmin tuettu, nurjahduspituus voidaan laskea lineaarisella interpoloinnilla.
4. Laskentamenettelyn oletuksena on, että paarteissa vaikuttaa saman suuruinen puristava voima.	FEM-mallia käyttämällä voi hyödyntää lisää kapasiteettia ristikosta.

Tutkimuksessa kehitetty laskentamenetelmä pohjautuu kuvassa 4 esitettyyn periaatteeeseen. Kuvassa 5 on esitetty lineaarisen interpoloinnin periaate. Kuvasta 5 havaitaan, että lineaarinen interpolointi tuottaa varmalla puolella olevia tuloksia eli suurempia nurjahduspituuksia verrattuna FEM-laskennan tuloksiin.



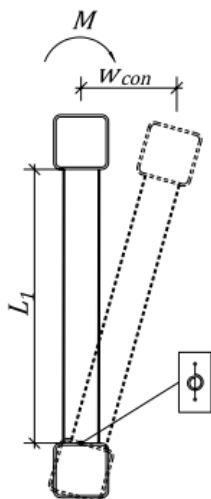
Kuva 4. Laskentamenetelmän kaksi äärivaihtoehtoa reunaehtoineen sisäpaarteiden nurjahduspituuksien määrittämiseksi.



Kuva 5. Erään ristikon paarteiden nurjahduspituuksien muutos suhteessa nurjahdustukien välimatkaan. Kuvassa katkoviivalla interpoloinnin tulokset ja ehjällä viivalla FEM-laskennan tulokset.

K-liitoksen rotaatiojäykkyys

K-liitoksen rotaatiojäykkyyden laskentamenetelmä perustuu Boelin diplomityössä esitettyyn menetelmään [2]. Työssä kuvataan momentilla rasitetun uumasauvan pään siirtymää kuvan 6 mukaisesti.

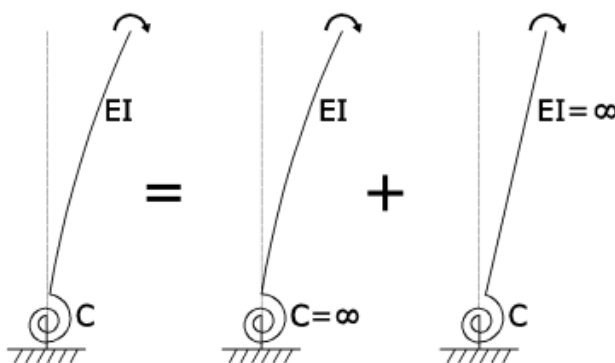


Kuva 6. K-liitoksen rotaatiojäykkyyden laskentaperiaate.

Sivusiirtymän w_{con} perusteella liitoksen rotaatiojäykkyys voidaan laskea kaavasta

$$C = \frac{M}{w_{con}} L_1. \quad (2)$$

Liitoksen kiertymästä aiheutuva siirtymä lasketaan hyödyntäen kuvan 7 mukaista superpositioperiaatetta.

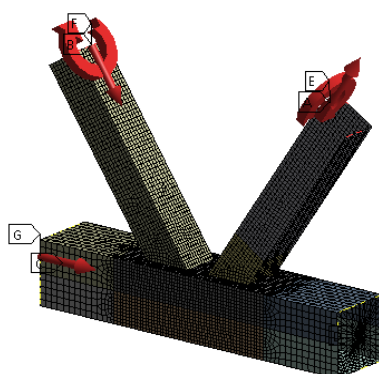


Kuva 7. Superpositioperiaate K-liitoksen rotaatiojäykkyyden laskemisessa.

Kuvassa 7 oikeanpuoleinen tilanne kuvaa tavoiteltua ratkaisua. Kuvan 7 mukaisesti se saadaan vähentämällä keskimmäinen tilanne vasemmanpuoleisesta siirtymätilasta.

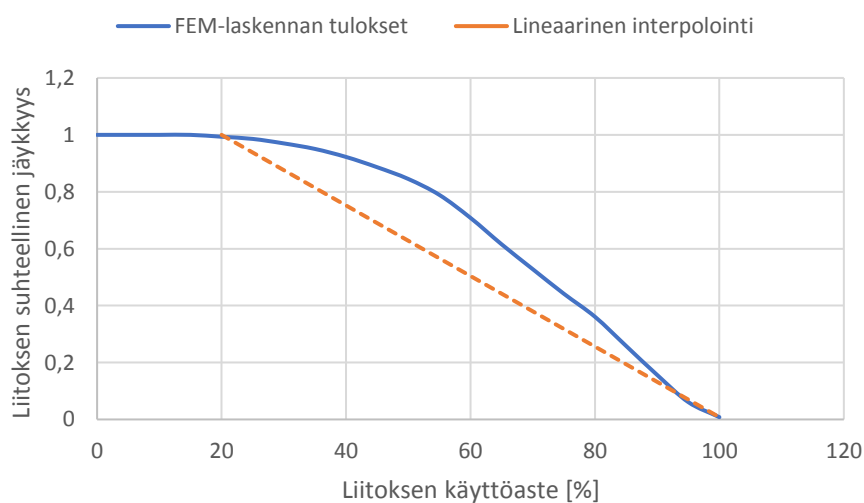
Keskimäinen siirtymän arvo saadaan laskemalla tunnetuista käsikirjakaavoista ja vasemman puoleisen tapauksen siirtymä lasketaan FEM-ohjelmalla.

Tämän lisäksi K-liitoksen rotaatiojäykkyyttä tulee redusoida sen käyttöasteen suhteen. Uumasauvat ovat lähes poikkeuksetta aina normaalivoimarasitettuja jolloin paarteen pinta voi olla osin plastisoitunut. Vertailutulosta haetaan FEM-laskennasta, jossa K-liitosta kuormitetaan kuvan 8 mukaisesti. Materiaalimalli on laskennassa ideaaliplastinen ilman myötölujittumista. Kuormitus tapahtuu siten, että ensin liitosta puristetaan normaalivoimilla ja tämän jälkeen vasta lasketaan liitoksen rotaatiojäykkyyttä.



Kuva 8. K-liitos kuormitettuna normaalivoimilla ja taivutusmomenteilla.

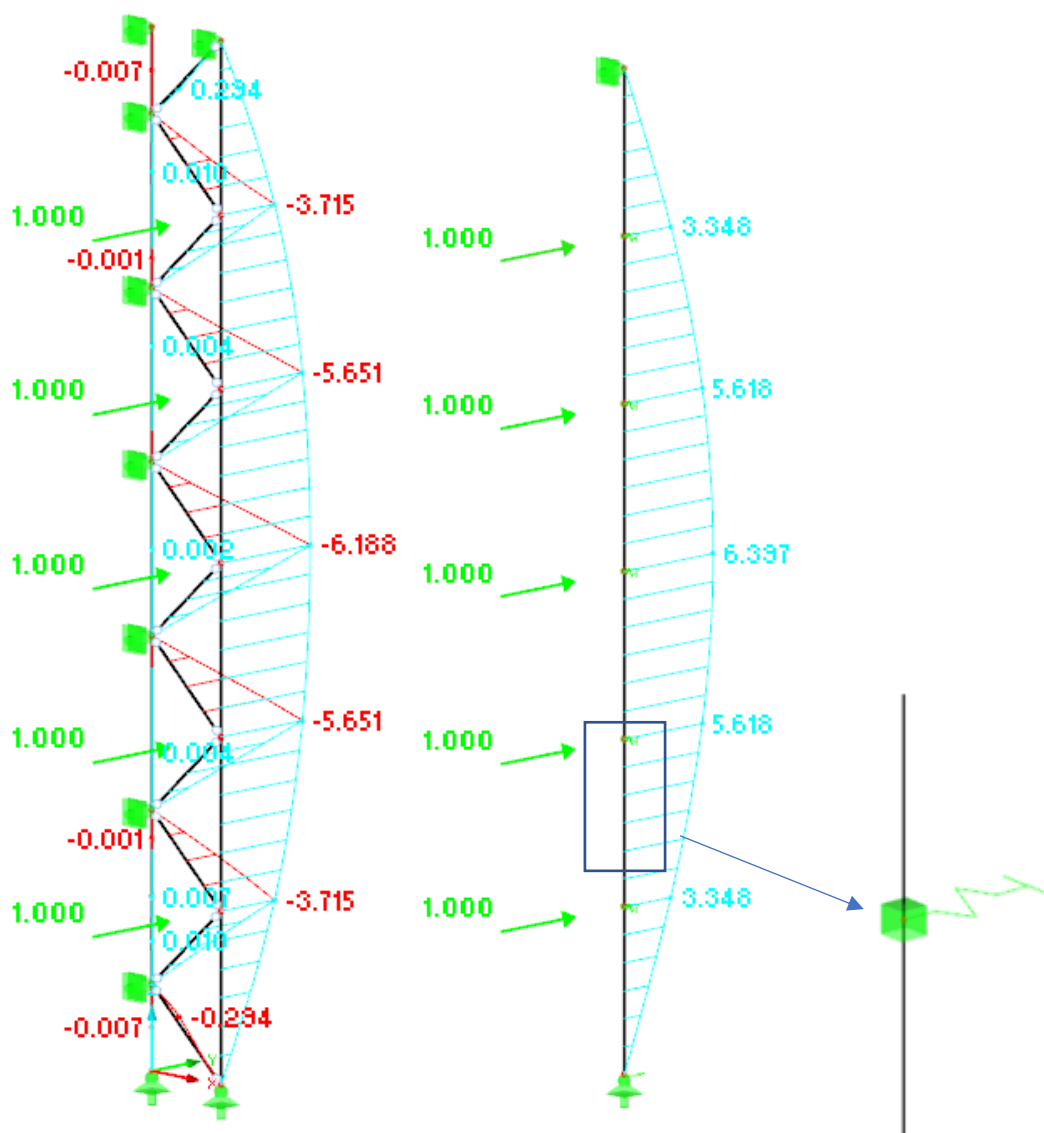
Kuvassa 9 on esitetty ehjällä viivalla FEM-laskennan tulokset, josta nähdään hyvin, että liitoksen jäykkyys pienenee käyttöasteen kasvaessa. Katkoviivalla on esitetty tutkimuksessa tehty lineaarinen interpolointi. Kun liitoksen käyttöaste on 20%-100%, tulee suorittaa kuvan mukainen interpolaatio. Kuvan 9 mukainen lineaarinen interpolaatio antaa varmalla puolella olevan tuloksen.



Kuva 9. Liitoksen käyttöasteen vaikutus sen rotaatiojäykkyyteen.

Poikittaistukemattoman paarteesta analytyttinen rakennemalli

Ristikon poikittaistukemattomasta paarteesta kehitetään kuvan 10 mukainen rakennemalli, joka on jousilla tuettu palkki. Ideana on tuottaa jousituetulle palkille sellaiset jousiva-kiot, jotka vastaavat ristikkomallin jäykkyyttä sivusuunnassa. Kuvassa luvut kuvaavat siirtymien arvoja.

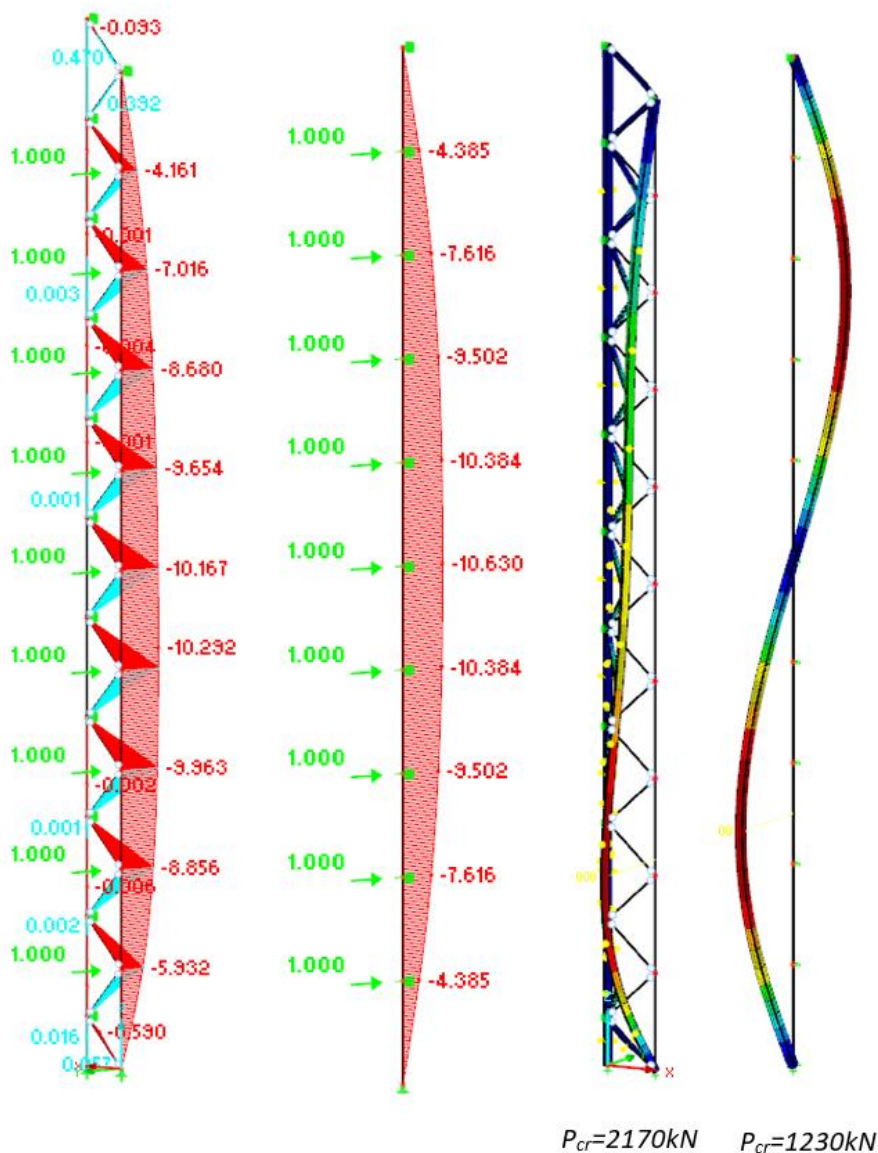


Kuva 10. Jousituetun palkin muodostaminen. Translaatiojousi muodostetaan jokaisen K-liitoksen kohdalle.

Tämä rakennemalli kuvaa tilannetta, jossa tukea antava paarre on täysin tuettu sivusuunnassa. Tuentävälän kasvaessa voidaan lineaarisesti interpoloida tämän tuloksen ja tukevan paarteesta todellisen nurjahdustuentävälän väliltä. Poikittaistukemattoman

paarten kuvaamista jousituetun palkin avulla on esitetty jo aiemmin esimerkiksi lähteissä [1] ja [5].

Näin menetellen tehdään yksi merkittävä konservatiivinen oletus olettamalla uumasauvat toisistaan riippumattomiksi. Kokonaisessa ristikkomallissa uumasauvojen nurjhdussuunnat kytkeytyvät toisiinsa, jolloin sillä on huomattavasti enemmän jäykkyyttä olla nurjahtamatta eri suuntaan kuin viereinen uumasauva. Jousituetussa palkissa jouset eivät riipu millään tavalla toisistaan, jolloin ne voivat aina nurjahtaa kumpaan suuntaan tahansa ja näin ollen tuottavat pienemmän kriittisen kuormakertoimen. Kuva 11 havainnollistaa tätä ilmiötä.



Kuva 11. Jousituetun palkin analyysissä tehty konservatiivinen oletus. Vasemmalla tukemattomasta paarteesta muodostettu jousituettu palkki, jolla sama jäykkyys sivusuunnassa. Oikealla ristikosta sekä jousituetusta palkista lasketut kriittiset kuormakertoimet.

Kuvasta 11 nähdään, että kriittinen kuormakerroin jousitetulla palkilla on huomattavasti pienempi kuin ristikkorakenteen paarteella, vaikka sillä on lähes yhtä paljon jäykkyyttä sivusuunnassa. Tämä konservatiivinen oletus kuitenkin kompensoi sekundäärisiä rasituksia, joihin palataan myöhemmässä luvussa. Vaikka jousitettu palkki antaa huomattavasti pienemmän kriittisen kuormakertoimen, saadaan sen avulla erittäin käyttökelpoisia tuloksia. Havainnollistetaan tätä taulukon 2 avulla.

Taulukko 2. Jousitetun palkin tuottaman nurjahduspituuden antama taloudellinen hyöty verrattuna perinteiseen menetelmään.

Menettely	L_{cr}	Valittu profiili	Käyttöaste	Paino	Paino yhteensä (20 kpl)
Esitetty laskentamenettely	8600 mm	SHS200x200x10,0	95 %	57 kg/m	31920 kg
Perinteinen menettely	28000 mm	HK350-15-15x350	95 %	158 kg/m	88368 kg

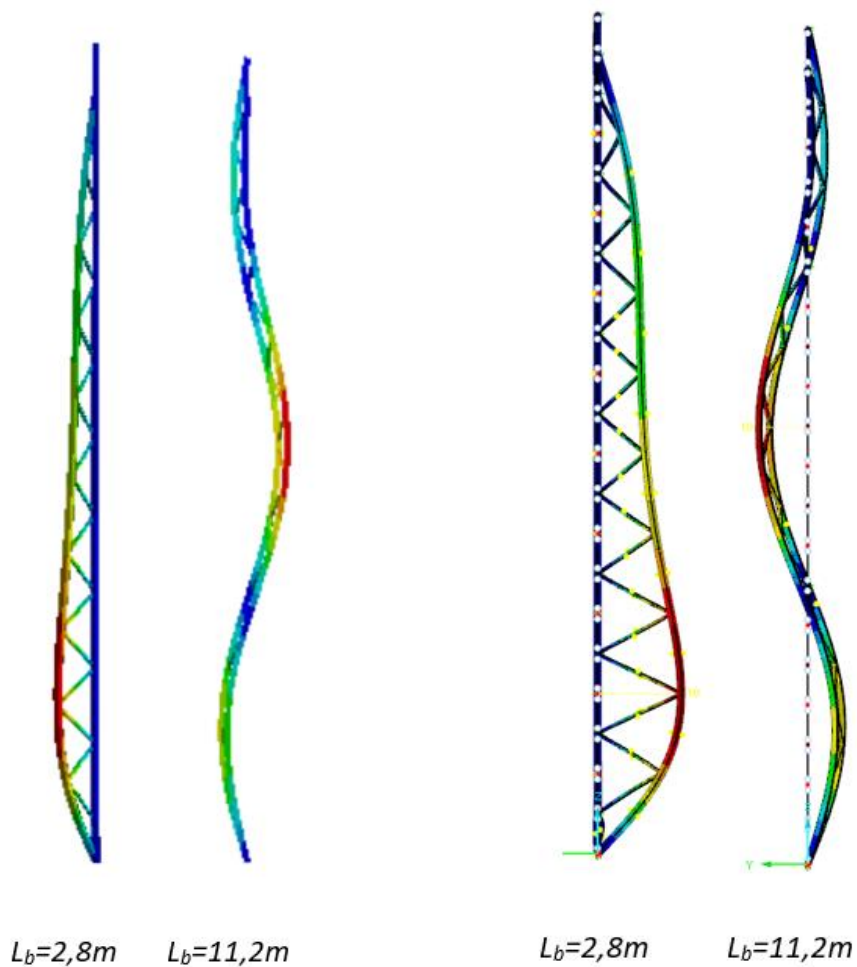
Taulukossa 2 on hyvin karkea, mutta suuntaa antava esimerkkilaskelma jousitetun palkin antamasta hyödystä. Taulukossa on laskettu tyypillistä teollisuushallia, jossa on oletettu olevan 20 ristikkopilaria ja paarteessa vaikuttava voima 800 kN. Jousitetulla palkilla nurjahduspituudeksi on laskettu 8600 mm. Tätä on verrattu perinteiseen menetelmään, jossa nurjahduspituus olisi koko paarteen pituus. Taulukon 2 mukaan teräskiloissa tehtävä säästö on ilmeinen.

Laskentamenetelmän verifiointi

Tässä tutkimuksessa esitellyllä menetelmällä laskettuja tuloksia on verrattu FEM-laskennan antamiin tuloksiin. Lisäksi FEM-laskennan avulla on varmennettu K-liitoksen rotaatiojäykkyyden laskentamenetelmää sekä laskettu sekundäärisiä rasituksia. Kuvassa 12 vasemmalla on kuorielementein laskettu ristikkopilarin sisäpaarteen nurjahduspituus kahdella eri ulkopaarteen tuentavälillä. Kuvassa oikealla on laskettu palkkielementtien avulla liitoksissa esitetyllä menetelmällä laskettuja rotaatiojäykkyyksiä.

Kuvan 12 tuloksista nähdään, että palkkielementeillä lasketut nurjahduspituudet ovat hyvin samaa suuruusluokkaa kuin kuorielementeillä lasketut. Tästä voidaan päätellä rotaatiojäykkyyden laskentamenetelmän antavan käyttökelpoisia arvoja.

Yksi mielenkiintoisista asioista ovat ristikkorakenteeseen syntyvät sekundääriset rasitukset. Nurjahduspituuden ollessa pienempi kuin paarteen pituus tai nurjahdustuontaväli, ei paarre pysty itsessään vastustamaan nurjahdusta. Sitä pitävät paikallaan K-liitokset, uumasauvat ja tukeva paarre, joihin tämä kuormitustilanne tuo rasituksia. Tarkasteltavat ilmiöt ovat tukevan paarteen nurjahdustuennan tukireaktio, tukevan paarteen vääntörasitus sekä K-liitokseen syntyvä momentti tasosta pois päin.



		$L_b=2,8m$	$L_b=11,2m$
Kuorielementit	N_{cr}	2125 kN	992 kN
	L_{cr}	6439 mm	9424 mm

		$L_b=2,8m$	$L_b=11,2m$
Palkkielementit	N_{cr}	1976 kN	912 kN
	L_{cr}	6679 mm	9829 mm

Kuva 12. Kuorielementeillä ja palkkielementeillä (sisältäen liitoksien rotaatiojäykkyudet) lasketujen nurjahduspituuksien vertailua eri nurjahdustuentavälein.

Lähteessä [4] on analysoitu muutamia ristikkopilareita epälinearisella FEM-laskennalla, jossa ristikkopilaria häiritään eurokoodin mukaisilla alkuhäiriöillä. Epälinearisessa laskennassa on mukana sekä geometrinen että materiaalinen epälinearisuus. Ristikkoa kuormitetaan, kunnes se ei enää pysty ottamaan kuormitusta vastaan.

Muutaman lasketun ristikkopilarin perusteella todetaan, että on suositeltavaa käyttää ulkopaarteen nurjahdustuennan tukireaktion arvona 4 % ulkopaarteen puristavasta voimasta. Tukevan paarteen vääntörasituksen todetaan olevan suhteellisen pieni, suunnilleen noin 5-10%:a puhtaasta vääntökapasiteetista. Nämä voimat kuvaavat suurinta kuormaa sillä hetkellä, kun ristikkopilari menettää kantokykynsä. Todellisuudessa rakenteet usein

mitoitetaan noin 85-95%:n käyttöasteelle, jolloin edellä mainitut voimat ovat selkeästi pienempiä.

CIDECT on johtavien kansainvälisten teräsputkien valmistajien järjestö, jonka tavoitteena on laajentaa ja tuottaa tietoa teräsrakentamisen suunnittelusta ja sovellutuksista erilaisten tutkimusten avulla. CIDECT'n laskentaesimerkit [1] eivät mainitse edellä esitettyjä ilmiöitä lainkaan. Toisessa CIDECT'n tutkimuksessa on kuitenkin maininta K-liitokseen syntyvästä momentista [1]. Tämän tutkimuksen mukaan tämä ilmiö kompensoituu muilla konservatiivisilla oletuksilla sekä yleisesti käytössä olevilla osavarmuusluvuilla. Kuvassa 13 on kaksi otetta kyseisestä tutkimuksesta, jossa tätä aihetta käsitellään.

7. CONSTRUCTION DETAILS

In order to ensure that certain assumption made in the analysis are satisfied, it should be seen that a number of construction details are carried out properly.

1. The web members must be connected rigidly to the chord opposite to the compressed chord, because these joints have to transmit out-of-plane bending moments. Therefore welded joints between tubular sections are specially suitable.

Note: Although such joints cannot be considered completely rigid, due to local elastic and plastic deformability, tests have proved their suitability.

In the absence of lateral props the stability of compressed chords depends, to a large measure, on the rigidity of the whole structure and especially of the truss joints. Welded tubular trusses are eminently suitable in this respect, compared with other types of structures.

The rigidity of welded truss joints was experimentally investigated in research project 3D. It was found that tubular truss joints with usual weld connections are liable to show some elastic and plastic deformations (owing to deformation of the tube walls). These deformations, however, are small in the stress range in question, and their effect is compensated by the usual factor-of-safety and by a number of conservative assumptions introduced in the proposed method of analysis.

Kuva 13. CIDECT'n tutkimuksessa oleva maininta K-liitokseen kertyvästä momentista. [1, s. 1 ja 60].

CIDECT'n tutkimuksessa todetaan (kuva 13): ”Uumasauvat oltava kiinnitetty jäykästi, koska niiden täytyy siirtää tasosta poispäin olevaa momenttia. Siispä hitsatut putkiprofiilien väliset liitokset ovat erityisen soveltuvia”. Lisäksi mainitaan, että vaikka tämän tyyppiset liitokset eivät ole täysin jäykkiä, testit ovat todistaneet niiden soveltuvuuden. Tämän jälkeen on vielä maininta, että syntyvät muodonmuutokset ovat pieniä ja niiden vaikutukset kompensoidaan varmuuskertoimilla ja useilla laskentamenetelmissä tehtävillä konservatiivisilla oletuksilla. Nämä konservatiiviset oletukset ovat itse asiassa hyvin samat kuin diplomityössä tehdyt oletukset. Kuvassa 14 on CIDECT'n menetelmän kuvaus ja tehdyt oletukset.

The procedure involves two distinct steps:

- a. Evaluation of the elastic support at the joints of the compressed chord.
- b. Solution of the buckling problem of the elastically supported compressed bar.

1.31 Elastic support values

The below given formulae for the elastic support values are based on the following simplifying assumptions:

- a. The support values at the joints of the compressed chord are taken to be independent of each other. (i.e. a lateral displacement of one joint is assumed to have no influence on the displacement of other joints).
- b. The torsional rigidity of the web members is neglected.
- c. The web members are assumed to be pinned to the compressed chord.
- d. The influence of axial forces in the web members (which are usually alternate tension and compression) on their bending stiffness is neglected.
- e. The connection of the web member to the opposite chord is considered completely rigid, i.e. local deformation at the joint, whether elastic or plastic, is neglected.**

Kuva 14. CIDECT'n menetelmän kuvaus ja tehdyt laskentaoletukset. [1, s. 4-5].

Ainut selkeä ero CIDECT'n tutkimuksen ja tässä artikkelissa kuvatun menetelmän välillä on, että CIDECT'n menetelmässä uumasauvat oletetaan jäykästi kiinnitetyksi tukevaan paarteeseen ja nivelellisesti nurjahtavaan paarteeseen. Tässä artikkelissa liitoksien rotaatiojäykkyydet otetaan huomioon todellisten jäykkyyksien mukaisina.

Tämän artikkelin mukaisilla menetelmillä nurjahdustuennan tukireaktio sekä tukevaan paarteeseen syntyvä vääntörasitus ovat kunnossa. Edellä esitettyihin CIDECT'n tutkimuksiin nojaten myös K-liitokseen syntyvä, tasosta poispäin oleva momentti on kunnossa. Diplomityössä on ko. CIDECT'n tutkimuksen tuloksista huolimatta laskettu syntyviä momenteja, jotta saadaan suuruusluokasta kiinni. Taulukossa 3 on yhden ristikkopilarin K-liitoksien momenttien tuloksia.

Taulukossa 3 toisessa sarakkeessa vasemmalla on momenttien arvoja tukevan paarteen K-liitoksissa. Ensimmäisenä huomio kiinnittyy molempiin päihin syntyviin huippuarvoihin. Toiseksi havaitaan, että käyttöasteen pienentyessä 100 %:sta 80 %:iin momenttien arvot puolittuvat.

Jos oletetaan momenttien jakautuvan tasaisesti, keskiarvomomentti on 4,1 kNm. Hyvin lähelle tätä tulosta päästään soveltamalla laajasti käytössä olevaa 2 %:n sääntöä. Sisäpaarteen pituus on 28000 mm ja nurjahduspituudelle lasketaan arvoksi 6260 mm. Näin ollen ”virtuaalisia nurjahdustukia” on $(28000 \text{ mm}/6260 \text{ mm}) - 1 = 3,47$ kappaletta. Voima paarteessa on 1200 kN, ristikon leveys 1400 mm ja uumasauvojen lukumäärä 21. Kun jokaiseen tuentapisteeseen oletetaan 2%:n voima puristavasta voimasta, saadaan jokaisen uumasauvan päähän momentin arvoksi 5,55 kNm. Vastaavaan tulokseen on päästy diplomityössä myös kertaluokkaa isommassa ristikkopilarissa. Tulos on hieman varmalla puolella FEM-tulokseen nähden. Yleisesti tällä laskennalla saatava momentti vie noin 20% liitoksen käyttöasteesta. Mikäli liitoksen käyttöaste on jo valmiiksi 80-90%,

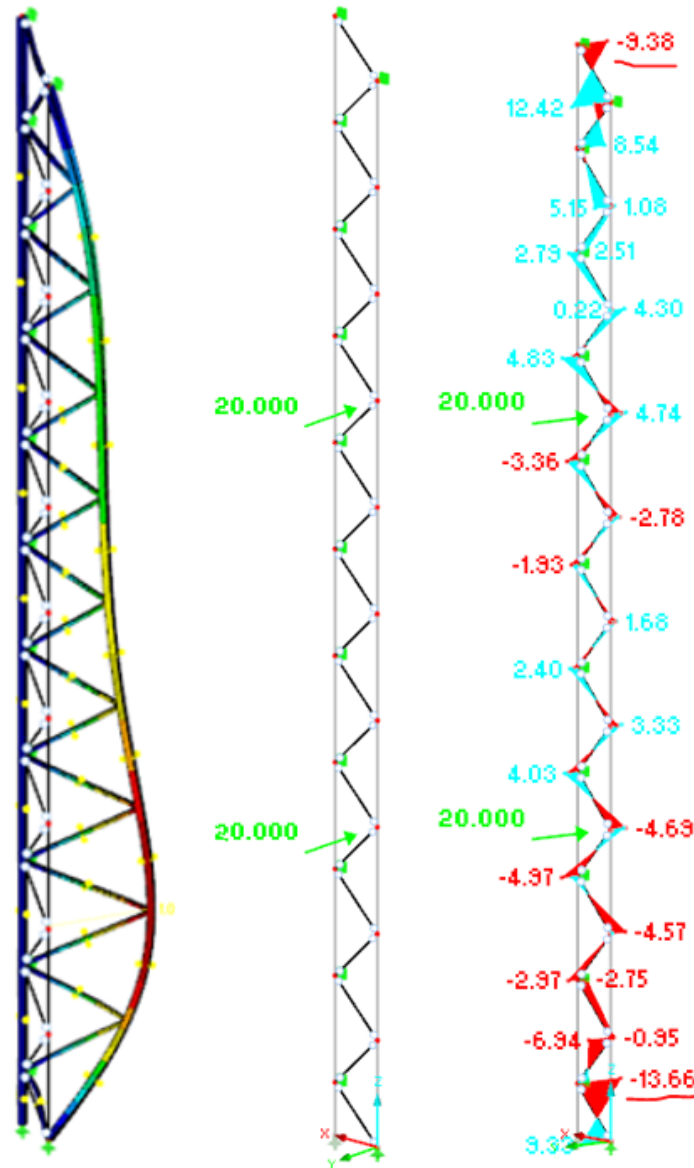
liitoksen voi jättää kokonaan ottamatta huomioon jousituettua palkkia määritettäessä. Näin voidaan todeta laskennan olevan selkeästi turvallisella puolella, kun otetaan huomi-
oon lisäksi kuvassa 13 esitetyt CIDECT'n tutkimuksen tulokset.

Taulukko 3. 28 metriä korkean ristikkopilarin K-liitoksiin kertyvien momenttien arvoja ulko- ja sisäpaarteissa.

Liitos	100% ulkopaarre [kNm]	80% ulko paarre [kNm]	100% sisäpaarre [kNm]	80% sisäpaarre [kNm]	Kuva tutkittavasta ristikosta
1	-9,7	-4,8	-14	-7,0	
2	-8,0	-3,9	-3,4	-1,5	
3	0,6	0,4	-3,9	-1,8	
4	-1,6	-0,6	2,9	1,6	
5	3,0	1,6	0,09	0,19	
6	0,16	0,25	2,8	1,43	
7	1,9	0,95	0,07	0,18	
8	-0,47	-0,11	1,4	0,66	
9	0,8	0,34	-0,99	-0,4	
10	-1,5	-0,67	0,47	0,16	
11	0,36	0,09	-2,1	-0,97	
12	-2,1	-0,9	0,8	0,28	
13	1,8	0,8	-1,6	-0,8	
14	-0,6	-0,3	3,3	1,5	
15	5,2	2,4	1,8	0,78	
16	4,2	2,0	7,9	3,8	
17	8,7	4,3	8,9	4,3	
18	10	5,4	9,0	4,6	
19	1,4	1,3	12	6,2	
20	1,6	1,9	-9,0	-3,4	
21	-23	-14	-12	-7,8	
	KA	KA	KA	KA	
	4,1	2,2	4,6	2,3	

Kuten edellä mainittiin, taulukosta 3 voi nähdä huippuarvot momenteissa ristikkopilarin päissä. Tämä johtuu nurjahdustuennan tuentatyyppistä. Diplomityössä nurjahdustuennan on oletettu olevan vain sivusuuntainen, ilman minkäänlaista vääntöjäykkyyttä. Yksinkertaisella lineaarisella FEM-mallilla voidaan todeta tuentatyyppin vaikutus. Kuvassa 15 on erään ristikkopilarin linearisoidun nurjahdusanalyysin mukainen kriittinen kuorma,

sekä tasosta poispäin olevien momenttien arvot, kun ristikkoo häiritään sivusuunnassa. Nurjahdustuenta on sivusuuntainen.

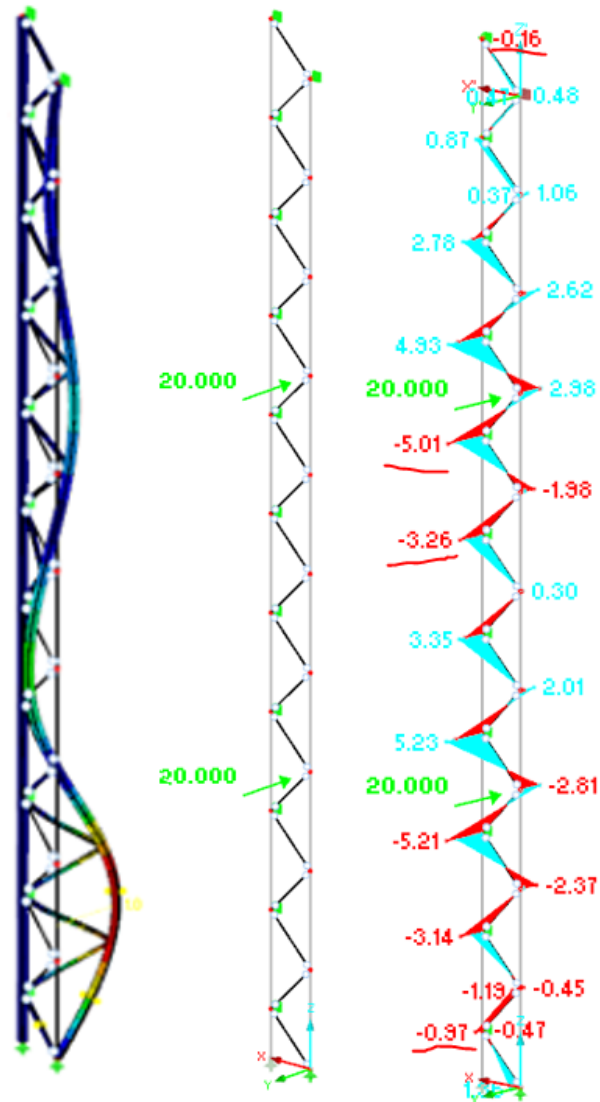


$P_{cr}=1948\text{kN}$

Kuva 15. Tasosta poispäin syntyvien momenttien jakautuminen, kun nurjahdustuenta on vain sivusuuntainen.

Kuvan 15 alleviivatuista arvoista nähdään, että momentti saavuttaa huippuarvon 13 kNm ristikkorakenteen päissä, kun keskialueella momentti on ~3-5 kNm. Kuvan 16

esimerkissä on sama ristikkorakenne, mutta nurjahdustuenta on lisäksi myös vääntöjäykkä.



$$P_{cr} = 3456 \text{ kN}$$

Kuva 16. Tasosta poispäin syntyvien momenttien jakautuminen, kun nurjahdustuenta on sivusuuntainen ja vääntöjäykkä.

Jo kuvan 16 nurjahdusmuodosta nähdään, että vääntöjäykkä nurjahdustuenta antaa huomattavasti kapasiteettia myös sisäpaarten nurjahdusta vastaan. Tämä on luonnollisesti nähtävissä myös suurempana kriittisenä kuormana. Lisäksi havaitaan, että momenttien huippuarvot ovat hävinneet ristikon päistä ja momentit ovat näin ollen jakautuneet tasaisemmin paarten koko matkalle.

Vaikka edellä on todettu CIDECT'n tutkimukseen nojaten, että K-liitoksen momentti hoidetaan muilla konservatiivisilla oletuksilla, on varmuuden lisäämiseksi suunnittelu-työssä järkevää kiinnittää siihen kuitenkin huomiota. Esimerkiksi suunniteltaessa ristikkopilarin ulkopaarteen nurjahdustuenta, voitaisiin suositella nurjahdustuennan (esim. putkiprofiili) kiinnittämistä paarteen kylkeen ennemmin kuin paarteen taakse. Kylkeen liitettäessä liitos on helppo mieltää vääntöjäykemmäksi. Tällöin momenttien voidaan ajatella jakautuvan tasaisemmin. Liitoksen vääntöjäykkyyttä ei kuitenkaan huomioida nurjahduspituutta määritettäessä.

Taulukkoon 4 on yhteenvedona kirjattu sekundaaristen rasiusten tarkastelu CIDECT'n tutkimuksissa ja tässä tutkimuksessa. CIDECT'n tutkimuksilla viitataan lähteisiin [1] ja [3].

Taulukko 4. Yhteenvedo sekundäärinen rasiusten tarkastelusta.

Aihe	CIDECT	Tutkimus	Huomautukset
Nurjahdustuennan tukireaktio	<i>Ei erillistä mainintaa</i>	<i>Suosittelavaa käyttää 4%:a puristavasta paarteen voimasta</i>	-
Tukevan paarteen vääntörasitus	<i>Ei erillistä mainintaa</i>	<i>Ei tarvitse analysissä erikseen huomioida</i>	<i>Tutkimuksessa oletetaan paarre päistään vääntövapaiksi</i>
K-liitoksen momentti tasosta pois päin	<i>Osavarmuusluvut ja konservatiiviset oletukset kompensoivat tämän ilmiön</i>	<i>2%:n säännöstä kehitetty menetelmä, jolla voi arvioida momentin suuruutta</i>	<i>Tutkimuksessa suositellaan vääntöjäykkää nurjahdustuennan liitosta momentin tasaamiseksi. Tämän merkittävää pienentävää vaikutusta nurjahduspituuteen ei kuitenkaan huomioida.</i>

Mainittakoon, että tutkimuksessa lasketun 28 metriä korkean ja 1,4 metriä leveän ristikkopilarin sisäpaarteen nurjahduspituudeksi saatiin noin 11 metriä, kun analysissä tehtiin taulukon 4 mukaiset, tutkimuksessa suositeltavat laskentaoletukset. Analysissä oletettiin reunimmaisten K-liitosten käyttöasteiksi 80%, seuraavien 60% ja loppujen 30%. Ristikko tuettiin sivusuunnassa joka toisesta K-liitoksen kohdasta.

Johtopäätökset

Ristikkopilarissa sisäpaarre on lähes poikkeuksetta aina puristettu rakenneosa. Vastavasti kattoristikossa alapaarre voi olla puristusrasituksen alainen johtuen esimerkiksi nostavista kuormista tai jäykkänurkkaisesta kehästä. Usein sisäpaarre tai kattoristikon alapaarre on näissä tapauksissa tuettu erillisellä nurjahdustuennalla, jotta voidaan käyttää pienempää nurjahduspituutta. Tämä ei kuitenkaan ota millään tavalla huomioon ristikko-

rakennetta kokonaisuutena. Todellisuudessa sisä- tai alapaarre saa uumasauvojen taivutusjäykkyuden ja ristikon kokonaisvääntöjäykkyyden kautta selvän tuennan nurjaldusta vastaan. Tämän lisäksi normaalivoimien jakautumalla paarteiden välillä on merkittävä vaikutus. Tutkimuksessa on laskettu useita ristikkorakenteita, joissa sisä- tai alapaarre on ilman poikittaistuenta. Nurjalduspituuden arvoiksi on saatu riippuen reunaehdoista ja käytettävästä menetelmästä $0,25L-0,48L$, jossa L on paarteen pituus.

Kun ristikkorakennetta hyödynnetään kokonaisuutena, aiheuttaa se sekundäärisiä rasituksia ristikon eri osille. Näistä merkittävin on K-liitokseen kertyvä tasosta pois päin oleva momentti. CIDECT'n tutkimukseen nojaten tämä syntyvä momentti kompensoituu useilla laskennassa tehtävillä konservatiivisilla oletuksilla. Tutkimuksessa tehtyjen laskelmien perusteella asiaankuuluvaa on kuitenkin liitoksen käyttöasteen rajoittaminen, jotta siihen jää kapasiteettia sekundaarista momenttia vastaan. Usein reunimmaisilla K-liitoksilla voi olla jopa 90% käyttöaste, jolloin se on syytä jättää laskennasta pois muodostettaessa jousituettua palkkia.

Ristikkorakenteen hyödyntäminen kokonaisuudessaan kasvattaa sisä- ja alapaarteen nurjalduskuormaa ristikon tasosta ulospäin. Perinteisesti tehty oletus paarteen mittaisesta nurjalduspituudesta on vahvasti varmallalla puolella.

Viitteet

- [1] E. Spira, E. Pollner. Lateral buckling of tubular latticed girders, design manual, Cidect, 1968.
- [2] H. Boel. Buckling length factors of hollow section members in lattice girders. Master Thesis, Eindhoven University of Technology, 2010.
- [3] J. Mouty, Effective Lengths of Tubular Lattice Girder Members, Monograph no. 4, Cidect, 1980.
- [4] T. Haapanen. Poikittaistukemattoman paarteen stabiilisuus. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2017.
- [5] Ziemian D. Ronald. Guide to stability design criteria for metal structures, 6th edition, Wiley, 2010.

Tuomas Haapanen, Ville Laine
A-Insinöörit Suunnittelu Oy
Puutarhakatu 10, 33210 Tampere
tuomas.haapanen@ains.fi

Sami Pajunen
Tampereen Teknillinen Yliopisto
PL 600, 33101 Tampere