



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Mikko Kähkönen

# WQ-profiilin käyttö yläpaarteena teräs- ristikossa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

7.5.2019

Tekijä Otsikko	Mikko Kähkönen WQ-profiilin käyttö yläpaarteena teräsristikossa
Sivumäärä Aika	99 sivua + 4 liitettä 7.5.2019
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Rakennustekniikka
Ammatillinen pääaine	Rakennetekniikka
Ohjaajat	Dipl.ins. Jouni Kalliomäki Suunnittelupäällikkö Ville Laine Laskentapäällikkö Ziaur Rehman
<p>Tämä insinöörityö tehtiin A-Insinöörit Suunnittelu Oy:lle ja työn tarkoituksena oli selkeyttää WQ-ristikon suunnitteluprosessia. Tällä hetkellä kyseisestä rakennetyypistä ei ole olemassa yhtenäisiä suunnitteluohjeita. Työn tavoitteena oli kertoa WQ-ristikon mitoituksen liittyviä asioita ja ilmiöitä, jotka suunnittelijan tulee ottaa huomioon.</p> <p>Tuloksena oli, että WQ-ristikon mitoituksen kulkua selkeytettiin ja siinä esiintyviä ilmiöitä havainnollistettiin. Opinnäytetyön teossa hyödynnettiin eurokoodeja, Ruukin Hitsatut profiilit sekä SSAB Domex Tube Rakenneputket -käsikirjaa ja teräsrakenneyhdistyksen WQ-palkkia käsittelevää teräsnormikorttia.</p> <p>Eryistä huomiota kiinnitettiin työssä WQ-ristikon mitoituksessa ilmeneviin ilmiöihin sekä rakenteellisten erityispiirteiden huomioimiseen. Työssä kiinnitettiin lisäksi erityistä huomiota ristikon toiminnallisuuden eroavaisuuteen, kun alapaarteena on rakenneputken sijaan lattateräs. Tämänäyttypin rakenneseosan käyttöä teräsristikossa eurokoodi ei käsittele lainkaan.</p> <p>Tutkimusmenetelminä olivat kirjalliset lähteet, viranomais määräykset sekä suunnittelijoiden haastattelut.</p> <p>WQ-profiilista teräsristikkorakennetta käytetään isoissa avoimissa tiloissa, joiden rakenteisiin kohdistuu isoja kuormia. Tällöin WQ-palkki ei itsessään riitä kantamaan kuormia, jolloin käytetään WQ-yläpaarteista teräsristikkoa lisäjäykkyyden saamiseksi. Tässä ristikkotyypissä yhdistetään WQ-palkin ja teräsristikon molemmat hyvät puolet, jolloin tuloksena on isojaakin kuormia kestävä rakenne.</p>	
Avainsanat	WQ-ristikko, yläpaarre, teräsristikko, ristikko, WQ, lattateräs

Author Title	Mikko Kähkönen Usage of WQ Profile as an Upper Chord in a Steel Truss
Number of Pages Date	99 pages + 4 appendices 7 May 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Professional Major	Structural Engineering
Instructors	Jouni Kalliomäki, M.Sc. (Building Technology) Ville Laine, Technology Manager Ziaur Rehman, Calculations Manager
<p>This engineer's thesis was assigned by and in collaboration with A-Insinöörit Suunnittelu Oy. The aim of this thesis was to clarify the design process of a WQ truss. At this moment, there are no common design standards established for this type of structure. The goal of this research is to tell about the matters and phenomena that must be taken into consideration when using trusses.</p> <p>The results were that the design process of a WQ truss was clarified and the related phenomena were demonstrated. Eurocode instructions, Ruukki Welded Profiles and SSAB Domex Tube Handbooks and the WQ steel design standard card issued by the Finnish Constructional Steelwork were used as the source material for this thesis.</p> <p>In this thesis, particular attention was paid to the phenomena regarding the WQ truss design and to the consideration of structural characteristics. In addition, attention was paid to the differences in truss functionality, when the lower chord is a flat bar instead of a hollow section. This type of a structural part in a steel truss isn't taken into account in Eurocode at all.</p> <p>The research was conducted through the analysis of source literature, regulations and interviews with designers.</p> <p>A WQ truss is used in large open spaces, where structures are stressed by a high load and which have big spans due to the nature of the space. Thereby, a WQ beam itself is not enough to bear the loads, in which case a WQ upper chord steel truss is used in order to gain additional stiffness. A WQ truss combines the good qualities of a WQ beam and a steel truss. The result is a structure that can bear very high loads</p>	
Keywords	WQ truss, upper chord, steel truss, truss, WQ, flat bar

## Sisällys

Lyhenne- ja käsiteluettelo

1	Johdanto	1
1.1	Rajaukset	1
2	Teräsristikkorakenteesta yleisesti	2
2.1	Teräsristikkorakenteen toimintaperiaate	2
2.2	Tasoristikot ja niiden erot	3
3	WQ-palkki	5
3.1	Tietoa WQ-palkista	5
3.2	Toimintaperiaate	6
4	Teräsristikkorakenteen osien mitoitus	7
4.1	Poikkileikkausluokkien merkitys WQ-teräsristikossa	8
4.2	WQ-ristikkoon kohdistuvat rasitukset	12
4.3	WQ-yläpaarten mitoitus	13
4.3.1	Yläpaarten nurjahduskestävyys	13
4.3.2	Leikkauskestävyys	14
4.3.3	Vääntö ja väännön WQ-paarteelle aiheuttama lisäleikkausvoima	16
4.3.4	Alalaipan poikittainen taivutuskestävyys	18
4.3.5	WQ-paarten taivutuskestävyys ja sitä pienentävät tekijät	20
4.3.6	Yhdistetty puristus- ja taivutuskestävyys	22
4.4	Rakenneputkesta tehdyn alapaarten ja diagonaalisauvojen mitoitus	24
5	WQ-yläpaarteisen teräsristikon liitosten mitoitus	25
5.1	Liitosten murtumistavat teräsristikossa	29
5.2	Vahvistamaton Y-liitos	30
5.2.1	Yläpaarten pinnan myötääminen Y-liitoksessa	33
5.2.2	Uumasauvan myötääminen	36
5.2.3	Murtumismuodon lineaarinen interpolointi	38
5.2.4	Paarten pinnan lävistysleikkautuminen	43

5.2.5	WQ-yläpaarteen uuman lommahtaminen tai myötääminen	45
5.3	Vahvistamaton vapaavälinen K-liitos	46
5.3.1	WQ-yläpaarteen leikkausmurtuminen	49
5.3.2	Yläpaarteen pinnan myötääminen vapaavälisessä K-liitoksessa	52
5.3.3	Uumasauvojen myötääminen	54
5.3.4	Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen	55
5.4	Neliönmuotoisten diagonaalisauvojen erityisehdot	57
5.5	Alapaarteen liitosten mitoitus	58
5.5.1	Vahvistettu limitetty K-liitos, kun alapaarteena rakenneputki	59
5.5.2	Vahvistettu limitetty K-liitos, kun alapaarteena lattateräs	64
5.6	Hitsausliitokset	70
6	Käyttörajatilatarkastelut WQ-paarteiselle teräsristikkorakenteelle	74
6.1	Von Mises'n myötöehto	74
6.2	Alalaipan käyttörajatilajännitykset	76
6.3	Ristikon taipuma, kun alapaarteena rakenneputki	79
7	WQ-profiililla varustetun teräsristikkorakenteen palomitoitus	80
7.1	Palotilanteen kuormat	82
7.2	Palotilanteen poikkileikkausluokan laskenta	83
7.3	Teräksen kriittinen lämpötila palotilanteessa	83
7.4	Palolta suojaamattoman teräsrakenteen lämpötilan kehitys	84
7.5	Teräksen suojaaminen tulipalolta palosuojamateriaalien avulla	88
7.6	Palolta suojatun teräsrakenteen lämpötilan kehitys	90
7.7	Yhdistetyn taivutuksen ja puristuksen kestävyys palotilanteessa	92
8	Yhteenveto	93
8.1	Lattateräsalaapaarteeseen liittyviä havaintoja	95
8.2	Tulevaisuudessa tutkittavia asioita	97
	Lähteet	98
	Liitteet	
	Liite 1. Neutraaliakselin sijainnin vaikutus plastisoitumiseen	
	Liite 2. WQ-profiilin plastisuusteorian mukainen neutraaliakseli	
	Liite 3. Plastisen taivutuskestävyyden laskeminen puristetulle ja taivutetulle WQ-profiilille	
	Liite 4. Puristetun ja taivutetun suorakaideprofiilin plastinen taivutuskestävyys	

## Lyhenne- ja käsiteluettelo

$a$	Hitsin efektiivinen mitta ilman tunkeuman vaikutusta.
$A_0$	Paarteen poikkileikkauspinta-ala.
$A_{fc}$	Lommahduksen kannalta kriittisemmän laipan (joko ylä- tai alalaippa) pinta-ala.
$A_{v0}$	Paarteen leikkauspinta-ala.
$A_w$	WQ-profiilin uumien yhteenlaskettu pinta-ala.
$b_0$	Paarteen leveys.
$b_{eff}$	Diagonaalisauvan tehollinen leveys, kun se liittyy paarteeseen.
$b_{e.ov}$	Limittävän diagonaalisauvan tehollinen leveys, kun se liittyy alla olevaan (limitettyyn) uumasauvaan.
$b_{e.p}$	Diagonaalisauvan tehollinen leveys, kun laskeaan paarteen pinnan lävistysleikkautumiskestävyyttä.
$b_i$	Diagonaalisauvan leveys.

$b_j$	Saumavalun paksuus.
$b_p$	Ristikon liitoksessa käytettävän vahvikelevyn leveys. Käytetään tässä työssä vahvistetun alapaarten limitetyssä liitoksessa.
$c_a$	Teräksen ominaislämpökapasiteetti.
CIDECT	Kansainvälinen putkirakenteiden kehitys- ja koulutuskomitea. Lyhenne koostuu ranskankielisestä nimestä Comité International pour le Développement et l'Étude de la Construction Tubulaire.
$d$	Ontelolaatan tukipinnan leveys.
$e$	Liitoksen epäkeskeisyys.
$E$	Teräksen kimmokerroin, kuvaa materiaalin elastisuutta.
ETA	Lyhenne sanoista European Technical Assessment, suomeksi eurooppalainen tekninen arviointi. Kyseessä on vapaaehtoinen tuotehyväksyntä. ETA-arvioinnilla osoitetaan, että rakennustuote täyttää sille lainsäädännössä asetetut vaatimukset.
$f_b$	Paarten uuman nurjahduslujuus.
$f_u$	Teräksen murtolujuus.
$f_{vw,d}$	Hitsin leikkauslujuuden mitoitusarvo.
$F_{w,Ed}$	Hitsissä vaikuttavan voiman mitoitusarvo pituusyksikköä kohti.

$F_{w,Rd}$	Hitsin kestävyuden mitoitusarvo pituusyksikköä kohti.
$f_y$	Teräsosan myötöraja. Indeksillä $y$ tarkoitetaan englanninkielistä sanaa "yield" eli myötö. Indeksillä $0$ ja $i$ täsmennetään, onko kyseessä paarteen ( $0$ ) myötöraja vai diagonaalisauvan/-sauvojen ( $i$ ) myötöraja.
$g$	Teräsristikkoliitoksen vapaaväli.
GMNIA	Geometrically and Materially Nonlinear Analysis. Laskenta-analyysimenetelmä, joka huomioi materiaalin ominaisuudet sekä valmistuksesta johtuvat profiilien epätäydellisyydet.
$h_0$	Paarteen korkeus.
$h_i$	Diagonaalisauvan korkeus.
$i$	Diagonaalisauvan numero. Y-liitoksessa on yksi vedetty sauva eli sen numero on 1. K-liitoksessa numero 1 tarkoittaa puolestaan puristettua sauvaa ja 2 vedettyä sauvaa.
Ideaaliristikko	Idealisoitu versio ristikosta, jonka liitoksissa ei ole epäkeskeisyyksiä ja liitokset ovat täysin nivellisiä. Kuormitus kohdistuu vain ristikon solmupisteisiin.
$k_{E,\theta}$	Lämpötilasta riippuva kimmokertoimen pienennyskerroin.
$k_n$	Liitoksen kestävyuden pienennyskerroin.



$k_{y,\theta}$	Lämpötilasta riippuva teräksen myötörajan pienennyskerroin.
Limitetty liitos	Liitos, missä toinen diagonaalisauva on kiinnitetty paarteeseen kiinni (limitetty sauva) ja toinen sauva on kiinnitetty osittain kiinni paarteeseen ja osittain toiseen, paarteeseen liittyvään (limittävään) diagonaalisauvaan.
L	Sauvan systeempituus teräsristikkorakenteessa. Systeempituus on ristikkoliitosten solmupisteiden välinen etäisyys.
$M_{0,Ed}$	Paarteeseen vaikuttavan momentin mitoitusarvo.
Materiaalimalli	Teräksen myötölujittumista kuvaava SFS-EN 1993-1-5 mukainen linearisoitu materiaalimalli, minkä mukaan laskenta suoritetaan. Tulokset ovat valitun materiaalimallin mukaisia. Näitä on olemassa neljää eri kappaletta ja niistä valitaan laskentaan yksi halutun tarkkuustason mukaisesti.
n	Paarteessa vaikuttavan normaalivoiman ja momentin yhteisvaikutuksen aiheuttaman puristusjännityksen suhde myötölujuuden mitoitusarvoon.
$N_{0,Ed}$	Paarteen itseisarvoltaan suurempi normaalivoiman mitoitusarvo. Se voi olla joko paarteen vasemmalla tai oikealla puolella.
$N_{0,gap,Rd}$	Paarteen kestävyys normaalivoimalle liitoksen vapaavälin kohdalla.

$N_{i,Ed}$	Diagonaalisauvan $i$ sisäisen aksiaalisen voiman mitoitusarvo.
$N_{i,Rd}$	Liitoksen normaalikestävyyden arvo. Se ilmaistaan sauvan $i$ sisäisen aksiaalisen voiman avulla. $i = 0$ (paarre), $1$ (puristettu sauva) tai $2$ (vedetty sauva).
Paarre	Teräsristikon ylin tai alin vaakatasossa oleva rakenneosa. Ristikon ylin osa on yläpaarre ja alin osa on alapaarre. Katto- tai välipohjarakenne tuetaan yläpaarteeseen ja alapaarre ottaa taivutuksesta aiheutuvan vedon vastaan.
Päittäishitsi	Hitsisauma, joka on hitsattu liitettävän rakenteen juuresta läpi.
$q$	Limityspituus. Mitataan K-liitoksen paarteiden pinnan suuntaisesti diagonaalisauvojen kärkien välisenä etäisyytenä.
$R$	Aika, jonka kantavan rakenteen tulee kestää tulipalossa sortumatta. Aikamääränä käytetään minuuttia. Esimerkiksi $R60$ tarkoittaa, että kantavan rakenteen tulee kestää 60 minuuttia sortumatta.
$t_0$	Paarteiden seinämän paksuus, jonka merkitys riippuu tarkasteltavasta ilmiöstä. Alaindeksi $f$ viittaa ilmiössä vaikuttavaan alalaippaan ja alaindeksi $w$ viittaa uumaan.
Tasalujuusvaatimus	Ristikkoliitoksia hitsatessa käytettävän hitsiaineen on oltava yhtä luja liitettävän teräsraakkeen kanssa. Vaatimuksella varmistetaan, ettei

	hitsausliitos murru ennen perusaineen myötäämistä.
Tehollinen leveys	Sauvarakenteen osa, joka osallistuu välittämään liitoksista kohdistuvia voimia. Tehollinen leveys vastata osittain tai kokonaan sauvan leveyttä.
$t_i$	Diagonaalisauvan $i$ seinämänpaksuus.
$t_p$	Vahvikelevyn paksuus.
Vapaaväli	Kahden diagonaalisauvan etäisyys toisistaan ristikon liitoksessa. Etäisyyden on oltava vähintään molempien diagonaalisauvojen seinämäpaksuuksien summa.
$W_{el.0}$	Paarteen kimmoteorian mukainen taivutusvastus.
WQ-ristikko	Teräsristikko, jonka yläparre on WQ-profiili. Alapaarteen voi olla joko rakenneputki tai latta-teräs.
$\alpha$	Paarteen leikkauspinta-alan laskennassa käytetty parametri.
$\beta$	Diagonaalisauvan leveyden suhde paarteen leveyteen.
$\beta_w$	Hitsausliitoksen lujuuskerroin, joka huomioi käytetyn teräslajin vaikutuksen hitsin kestävyteen.
$\gamma$	Liitoslaskennassa käytettävä parametri, ilmaisee paartesauvan puolikkaan leveyden suhteen paarteen seinämän paksuuteen. WQ-profiilin

yhteydessä tarkoittaa sen suorakaiteen muotoisen osan leveyden puolikkaan suhdetta alalaippaan.

$\eta$

Uumasauvan korkeuden suhde paarteen leveyteen.

$\lambda_{ov}$

Limitetyn liitoksen limitsaste.

$\lambda_{ov,lim}$

Yläraja limitetyn liitoksen limitsasteelle.

$\theta_i$

Diagonaalisauvan ja paarteen välinen pienempi kulma.

## 1 Johdanto

Rakennesuunnittelualan haasteena on ollut, että WQ-ristikkoa varten laadittuja suunnitteluohjeita ei ole olemassa. Mielenkiintoinen piirre tässä rakenteessa on, että siinä yhdistetään sekä WQ-palkin että teräsristikon ominaisuudet yhdeksi toimivaksi kokonaisuudeksi. Teräsristikolle sekä WQ-profiilille on olemassa omat erilliset mitoitusohjeet, mutta näiden yhteiskäyttöä kumpikaan ohje ei käsittele. Suunnittelijalle haastetta tuo myös, että WQ-ristikoita tarvitsevia kohteita suunnitellaan ajallisesti vaihtelevin välein. On siis mahdollista, että opittu asia unohtuu.

Tämän insinööriyön tavoitteena on yläpaarteena käytettävän WQ-profiililla varustetun teräsristikon mitoituksen kulun selkeyttäminen sekä siinä vaikuttavien ilmiöiden havainnollistaminen. Lisäksi insinööriyössä tutkitaan lattateräksen käyttöä ristikon osana käyttäen lähteinä kahta aiheesta tehtyä tutkimusta. Tällaisen rakenneosan käyttöä teräsristikossa eurokoodi ei käsittele lainkaan.

Insinööriyön laatimisessa tullaan käyttämään lähdemateriaalina Rautaruukin Hitsatut Profiilit ja SSAB Domex Tube Rakenneputket -käsikirjoja, teräsrakenneyhdistyksen WQ-palkille laatimaa teräsnormikorttia sekä teräsrakenteille laadittuja eurokoodeja. Lisäksi työn tavoitteena on selkeyttää WQ-profiilisen teräsristikon mitoituksen kulkua ja kertoa siihen liittyvistä ilmiöistä ja erityispiirteistä. Tämän insinööriyön voi ajatella ikään kuin oppaana, joka vie polkua pitkin suunnittelijan mitoitusprosessin läpi kertoen selkeästi mitoituksen eri vaiheista ja siinä huomioitavista asioista.

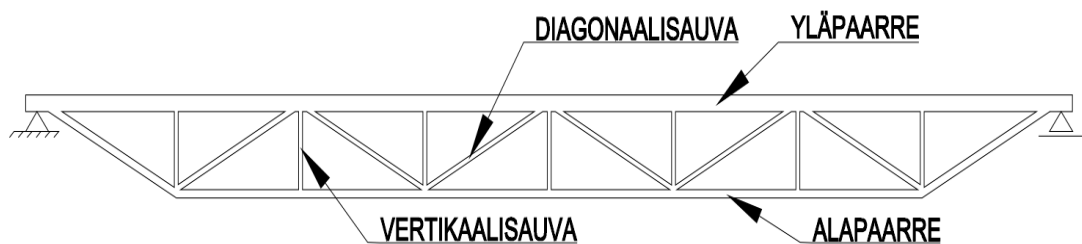
### 1.1 Rajaukset

Tässä työssä keskitytään yksiaukkoisen, nivelellisesti pilareihin kiinnitetyn WQ-profiilisen teräsristikkorakenteen mitoitukseen, jota käytetään ylä- ja välipohjissa kantavana rakenteena. Tässä työssä WQ-profiili on kummaltakin puolelta kuormitettu. Kyseessä on K-ristikon varioitu muunnos, missä yläosa on vapaavälinen K-liitos ja alaosa on vahvistettu sekä limitetty K-liitos. Liitokset teräs- ja betonipilareihin sekä seinärakenteisiin rajataan tämän työn ulkopuolelle. Työn pääpaino onkin siis tavallisen WQ-ristikon mitoituksen periaatteissa, siihen liittyvissä erityispiirteissä ja siinä vaikuttavissa ilmiöissä.

## 2 Teräsristikkorakenteesta yleisesti

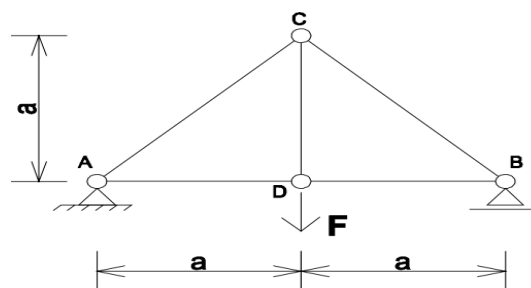
### 2.1 Teräsristikkorakenteen toimintaperiaate

Teräsristikkorakenne koostuu toisiinsa yhdistetyistä sauvoista. Käytettäviä sauvoja on kahta lajia: paarteet ja uumasauvat. Paarteet sijaitsevat ristikon ylä- ja alaosassa ja uumasauvat sitovat nämä kaksi paarretta toisiinsa. Uumasauvoja ovat sekä halutussa kulmassa asennettavat diagonaalisauvat että pystysuorat vertikaalisauvat. Edellä mainittuja käsitteitä on havainnollistettu kuvassa 1, jossa esitelty ristikko on tyypiltään kaideansas.



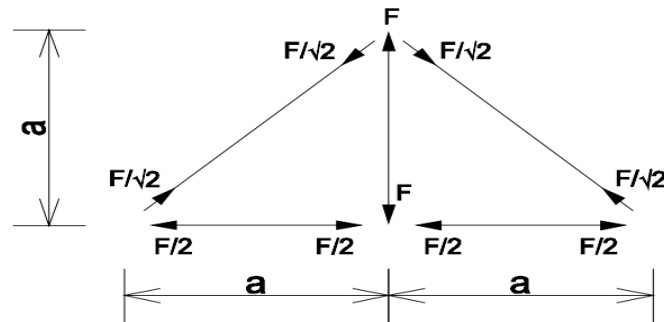
Kuva 1. Ristikon osat havainnollistettuna. Kuva: Mikko Kähkönen.

Teräsrakenteisissa ristikoissa pyritään noudattamaan ideaaliristikon periaatteita, joita on kolme kappaletta. Ensimmäisessä idealisoinnissa oletetaan, että ristikon sauvojen liitokset ovat kitkattomia nivelliitoksia. Tällöin uumasauvat ottavat vastaan vain puristusta tai vetoa, mikä luonnollisesti vaikuttaa myös niveliin. Liitoksen toiminnan kannalta sauvojen ja nivelten voimien pitää olla tasapainossa. Toinen idealisointi on, että kohdistuva kuormitus vaikuttaa vain ristikon niveliin. Idealisoiteja on havainnollistettu kuvassa 2.



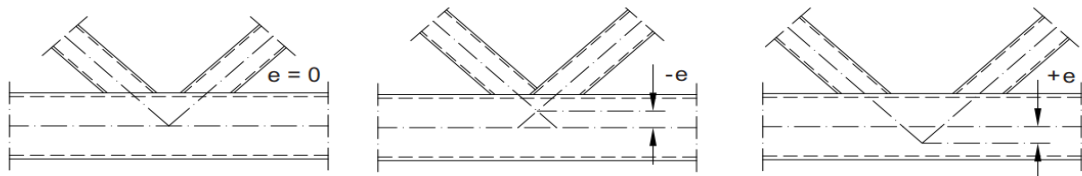
Kuva 2. Ideaaliristikko, jossa sauvojen liitokset ovat kitkattomia. Nivelet on kuvattu kuvassa valkoisilla ympyröillä. Pistekuorma F vaikuttaa nivelessä D. Kuva: Mikko Kähkönen.

Kolmannessa idealisoinnissa oletetaan sauvojen painopisteakseleiden leikkaavan nivel-liitoksen samassa pisteessä eikä sauvojen liitoksessa esiinny epäkeskisyyttä. Tällöin liitos voidaan ajatella kitkattomaksi eikä liitoksissa esiinny momenttia. Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 3.



Kuva 3. Ideaaliristikossa sauvojen liitokset ovat kitkattomia ja täten myös momentti liitoksissa on 0 kNm. Sauvoissa vaikuttaa vain puristus- tai vetovoima. Kuva: Mikko Kähkönen.

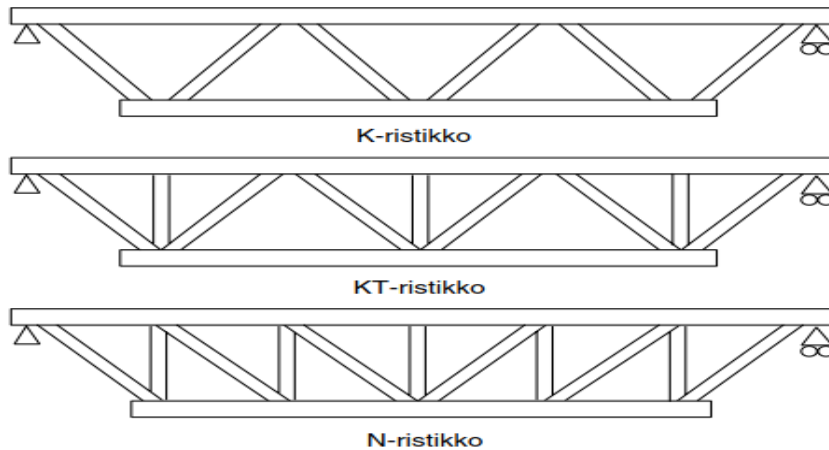
Liitokseen syntyy epäkeskeisyyttä, mikäli sauvojen painopisteakselit eivät leikkaa samassa pisteessä. Epäkeskeisyys taas saa aikaan momentin lausekkeen mukaisesti taivutusmomenttia. Diagonaalisauvojen asettelun liitoksen keskeisyyteen ja epäkeskeisyyteen on havainnollistettu kuvassa 4.



Kuva 4. Liitosten epäkeskeisyys havainnollistettuna. [1, s. 169.]

## 2.2 Tasoristikot ja niiden erot

On olemassa hyvin monenlaisia tasoristikkoita. Suomalaisessa rakentamisessa käytetään tavallisesti K-, KT- tai N-ristikoita, jotka ovat saaneet nimensä liitosten ulkonäön mukaan. Nämä ristikkotyypit on esitelty kuvassa 5. [1, s. 427.]



Kuva 5. K-, KT- ja N-ristikot visuaalisesti havainnollistettuna. [1, s. 427.]

K-ristikko soveltuu sellaisiin kohteisiin, joissa on pitkä jänneväli ja joissa kuormat saadaan siirrettyä suoraan ristikon liitoskohtiin. Tämän tyyppisessä ristikossa liitokset ovat yksinkertaisia hitsausliitoksia ja sauvoja on vähän. Huonona puoleena K-ristikossa on kuitenkin yläpaarteen suuri nurjahduspituus. Valmistuskustannuksiltaan K-ristikko on edullinen vapaavälisten liitosten ansiosta ja rakenteeltaan yksinkertainen. [1, s.427.]

KT-ristikossa uumasauvoja on tiheämmässä ja alapaarteen liitokset ovat limitettyjä, mikä tarkoittaa vaikeammin toteutettavia liitoksia ja vaatii konepajalta asennusten suhteen suurempaa tarkkuutta. Toisaalta yläpaarre on tässä ristikkotyypissä tuettu tiheämmin, jolloin yläpaarteen nurjahduskestävyys on parempi. [1, s. 427.]

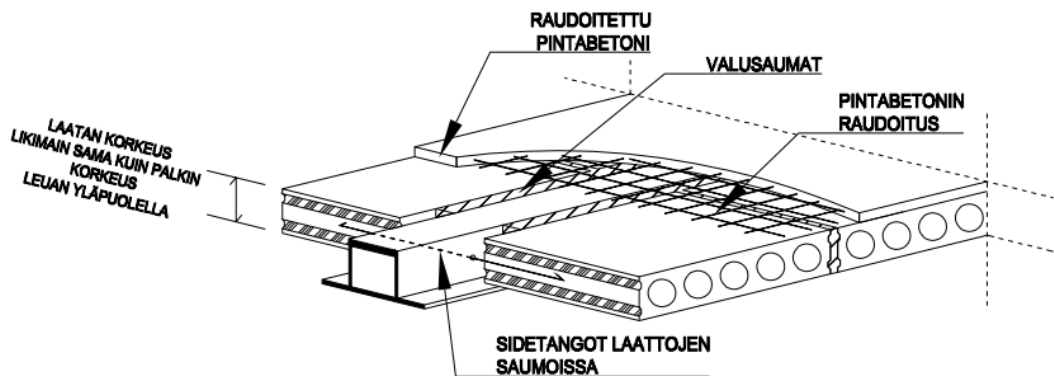
N-ristikko soveltuu paikkoihin, joihin tarvitaan pituudeltaan lyhyitä ja korkeita ristikoita. Ristikkoliitosten väli matka on lyhyt ja tämän ristikkotyypin etuna K-ristikkoon nähden on puristettujen uumasauvojen lyhyys, jolloin ne ovat vähemmän nurjahdusalttiita. Korkeassa ja lyhyessä ristikossa parvevoimat ovat pieniä ja uumasauvojen voimat puolestaan suuria. N-ristikossa liitokset tehdään limitettynä, jolloin vältetään sauvojen leikkauskoh- tien epäkeskeisyydeltä. [1, s. 427.]



### 3 WQ-palkki

#### 3.1 Tietoa WQ-palkista

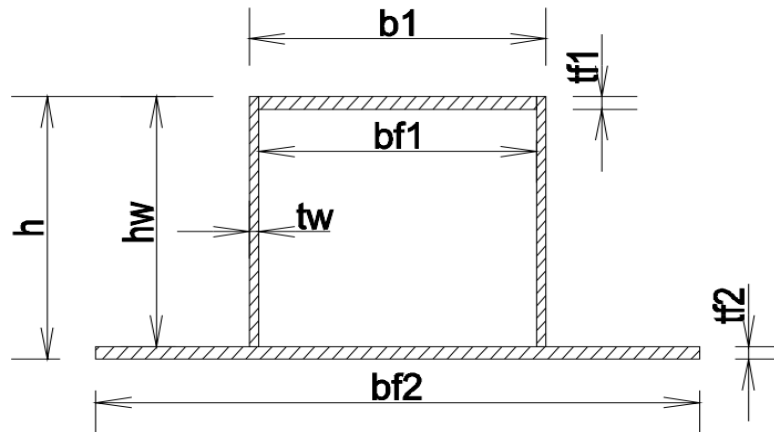
WQ-palkki on vääntöjäykkä teräspalkki, joka koostuu neljästä yhteen hitsatusta levystä: alalaipasta, kahdesta uumalevystä ja ylälaipasta. Teräslaatuena käytetään tavallisesti S355-terästä. WQ-palkkia käytetään ontelolaattojen kannattamiseen. Tätä on havainnollistettu periaatetasolla kuvassa 6.



Kuva 6. Ontelolaattakentän keskellä sijaitseva WQ-palkki. Kuva: Mikko Kähkönen.

WQ-palkki mitoitetaan samankorkuisiksi kuin ontelolaatat, jolloin palkkirakenteesta jää näkyviin vain sen alalaippa ja kerroksen vapaa korkeus saadaan mahdollisimman suureksi. WQ-palkki mitoitetaan toimimaan vapaasti tuettuna yksiaukkoisena palkkina. Sitä voidaan käyttää myös jatkuvana palkkina sekä ulokepalkkina. Palkille mitoitettavia kuormia ovat palkille tulevien rakenteiden painot, ontelolaataston hyötykuormat, ontelolaatosten ja saumavalun omapainot sekä WQ-profiilin omapaino. Myös asennustilanteen aikainen palkin yhdelle puolelle kohdistuvan poikittaisen kuormituksen aiheuttama vääntövaikutus tulee huomioida palkkirakenteen mitoituksessa, sillä ontelolaatosten kuormitus kohdistuu palkin alalaipan puoliväliin. [2, s. 2; 3, s. 1 ja 20.]

Ylälaipan leveyden määräytymiseen vaikuttavat tavallisesti palkille sekä sen liitoksille asetetut kestävyysvaatimukset. Alalaipan leveys riippuu sekä ontelolaatan tai kuorilaatan tarvitsemasta tukipinta-alan leveydestä, että ylälaipan leveydestä. Tämän työn mukaisen symmetrisen WQ-profiilin mitat on esitelty kuvassa 7. [3, s. 7.]



Kuva 7. Symmetrisen WQ-profiilin mitat. Kuva: Mikko Kähkönen.

Teräsrakenneyhdistys ry suosittelee Teräsnormikortissa 21 seuraavia suositusmittoja WQ-palkille:

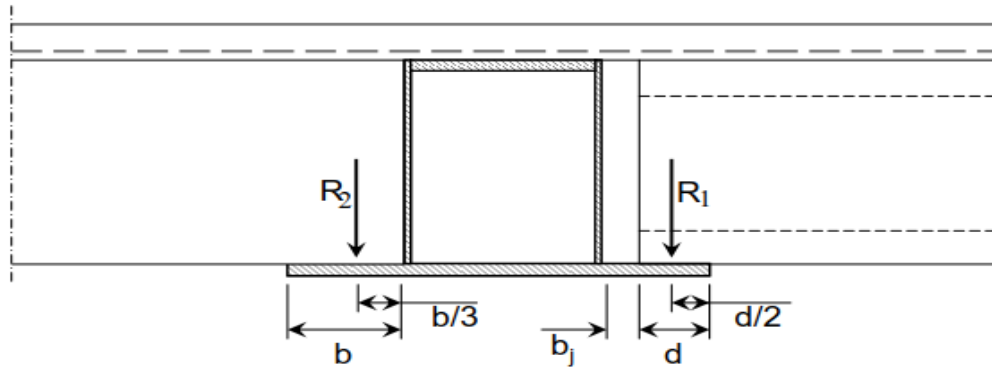
- Alalaipan leveys: vähintään 250 mm, enintään 700 mm
- Uuman korkeus: vähintään 265 mm, enintään 800 mm
- Ylälaipan leveys: vähintään 120 mm, enintään 390 mm
- Ylälaipan paksuus: vähintään 10 mm, enintään 60 mm
- Alalaipan paksuus: vähintään 10 mm, enintään 35 mm
- Uuman paksuus: vähintään 5 mm, enintään 10 mm.

Suositusmittojen ulkopuolella olevia poikkileikkauksia voidaan myös käyttää, mutta ne tulee tällöin mitoittaa tapauskohtaisesti. [3, s. 2.]

### 3.2 Toimintaperiaate

WQ-palkin toimintaperiaate staattisen kuormituksen alaisena perustuu siihen, että palkki ottaa taivutuskuorman vastaan ylä- ja alalaipan avulla. Ylälaippa ottaa vastaan puristusvoimat ja alalaippa vetovoimat. Leikkausvoimat otetaan vastaan kahden uuman avulla. WQ-palkin alalaippojen päälle asennetaan joko ontelolaatta tai kuorilaatta. Vaihtoehtoisesti voidaan alalaipan päälle asentaa myös umpilaatta. Näiden kuormituksellinen ero on tukireaktion sijainnissa.

Kuten kuvasta 8 voidaan nähdä, kuvassa vasemmalla puolella olevan umpilaatan tukireaktion  $R_2$  paikka on kyljestä mitattuna palkin ulokkeen mitasta kolmasosan päässä ( $b/3$ ). Kuvassa oikealla puolella olevan ontelolaatan tukireaktion  $R_1$  paikka on puolestaan alalaipan puolivälissä ( $d/2$ ). Kuvassa esitetty termi  $b_j$  kuvaa saumavalua. Termit  $b$  kuvaa umpilaatan tukialueen pituutta ja  $d$  ontelolaatan tukialueen pituutta. [3, s. 7.]

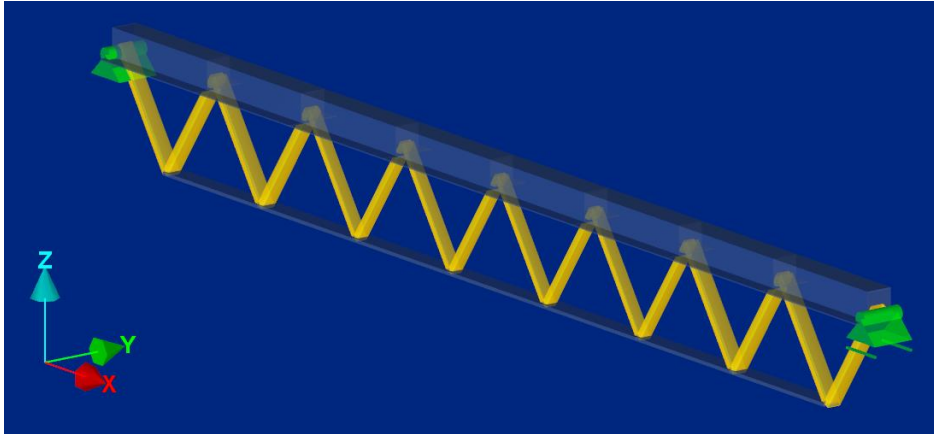


Kuva 8. WQ-palkin tavallisin kuormitustapaus, jossa on esitelty tukireaktioiden sijaintien paikat. Vasemmalla on umpilaatta ja sen tukireaktion  $R_2$  sijainti, oikealla on esitetty ontelolaatan tukireaktion  $R_1$  sijainti. Rakenteen päälle tulee työmaalla valettava pintalaatta. [3, s. 7.]

Kuormitusten sijainnin vuoksi kyseessä on epäkeskeisesti kuormitettu WQ-palkki. Epäkeskisyys tarkoittaa sitä, että kuorma ei kohdistu keskelle profiilia. Tämän seurauksena yläpaarteen alalaippaan kohdistuu poikkileikkaukseen nähden poikittaissuuntaista taivutusta. Lisäksi palkkiin kohdistuu vääntömomenttia, joka johtuu tukireaktion ja etäisyyden funktiosta, joka puolestaan lisää palkin leikkausvoimarasitusta. Ilmiö johtuu siitä, että vääntömomentti pyrkii kiertämään WQ-profiilin ympäri, jolloin poikkileikkaukseen syntyy sen vääntökeskiön ympäri kulkevaa leikkausjännitystä. Tämän huomioimista WQ-yläpaarteen mitoituksessa käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa.

#### 4 Teräsristikkorakenteen osien mitoitus

Tässä työssä käytetty WQ-ristikko sekä koordinaatisto on kuvan 9 mukainen.



Kuva 9. WQ-yläpaarteinen teräsristikko sekä koordinaatisto. Kuva: Mikko Kähkönen.

Ristikkoliitosten osalta tämän työn mukainen teräsristikko voidaan jakaa ristikkoliitostyypeiltään kolmeen osaan: ristikon molemmilla reunoilla käytetään vahvistamattomia Y-liitoksia ja sen keskiosassa sijaitsevat yläpaarteiden vapaaväliset K-liitokset. Alapaarteissa liitostyyppinä käytetään vahvikelevyllä vahvistettuja limitettyjä K-liitoksia. Alapaarteiden osalta havainnekuvasssa on käytetty lattaterästä, mutta alapaarteena voidaan käyttää myös rakenneputkea.

#### 4.1 Poikkileikkausluokkien merkitys WQ-teräsristikossa

Ennen WQ-ristikon mitoitusta suoritetaan ensimmäisenä ristikon rakenneosien poikkileikkausluokkien määrittäminen. Poikkileikkausluokka ilmaisee, millä laajuudella poikkileikkauksessa tapahtuva paikallinen lommahdus rajoittaa valitun rakenneosan kestävyyttä sekä sen kiertymiskykyä. Ilmiön merkitys korostuu erityisesti ohutuomaisissa WQ-profiileissa, joissa lommahdus rajoittaisi merkittävästi niiden leikkauskestävyyttä sekä taivutuskestävyyttä. Lommahdus voidaan välttää käyttämällä sopivan paksuja uumalevyjä. Eurokoodin SFS-EN 1993-1-1 mukaiset poikkileikkausluokat 1–2 vaatimuksineen ovat esitelty kuvassa 10.

Poikkileikkausluokka	Taivutetut taso-osat	Puristetut taso-osat	Taivutetut ja puristetut taso-osat
Taso-osan jännitysjakautuma (puristus positiivinen)			
1	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$	$\text{kun } \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ $\text{kun } \alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$
2	$c/t \leq 83\epsilon$	$c/t \leq 38\epsilon$	$\text{kun } \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ $\text{kun } \alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$

Kuva 10. Eurokoodi SFS-EN 1993-1-1 mukaiset poikkileikkausluokat 1-2. [5, s. 45.]

Poikkileikkausluokitus määritetään rakenteeseen kohdistuvan rasitustyyppin mukaisesti. Teräsrakenteiden eurokoodia tutkimalla voidaan havaita, että se on kaksoissymmetrisiä profiileja varten, mutta WQ-profiilille ei ole eurokoodissa esitetty ohjetta. WQ-profiilin poikkileikkausluokan määrittämisestä onkin selkeytetty Teräsnormikortti 21:ssä. Kyseisen kortin mukaan alalaipan poikkileikkausluokka määritetään kyljestä alkavan alalaipan ulokeosan suhteen alalaipan paksuuteen kuvaa 11 soveltaen. Alalaippa on samalla WQ-profiilin poikkileikkausluokan määrittämisen kannalta määräävin osa, sillä kyseessä on puristettu ulokkeellinen laippa ja sille asetetut rajaehdot ovat tiukimpia. Tämä voidaan todistaa poikkileikkausluokkien raja-arvoja tutkimalla. [3, s. 10.]

Taulukko 5.2 (Osa 2): Puristettujen taso-osien suurimmat leveys-paksuussuhteet

Ulokkeelliset laipat			
Poikkileikkausluokka	Puristetut taso-osat	Puristetut ja taivutetut taso-osat	
		Vapaa reuna on puristettu	Vapaa reuna on vedetty
Taso-osan jännitysjakautuma (puristus positiivinen)			
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$

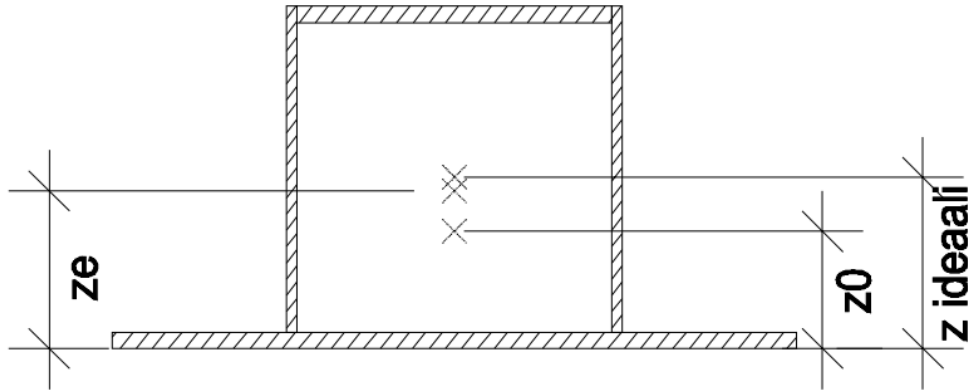
Kuva 11. Eurokoodin antamat laskentatapaohjeet kuvassa näytetyille profiileille poikkileikkausluokan määrittämiseksi. [5, s. 46.]

Poikkileikkausluokan määrittämisessä käytettävän apusuureen  $\varepsilon$ :n taustalla on oletus, että teräksen kimmokerroin olisi aina vakio. Tämä ei pidä kuitenkaan paikkaansa, sillä teräksen kimmokerroin ja myötöraja muuttuvat eri tahtia lämpötilan funktiona. Ongelman fysikaalinen luonne korostuu paloteknisessä mitoituksessa, jossa arvon vaihtelu on huomioitu. Tätä ongelmaa käsitellään tarkemmin teräksen palomitoitusta käsittelevässä luvussa.

Yläpaarteen ylä- ja alalaipan osalta poikkileikkausluokka tarkistetaan puristettuna rakenteena. Poikkileikkausluokan tarkistuksen kannalta on varmallalla puolella olettaa myös uuma kokonaan puristetuksi, vaikka se Teräsnormikortin mukaan voidaan tarkistaa puristettuna ja taivutettuna rakenteena. [5, s. 45.]

Kappaleen geometrian mukaan määräytyvän pintakeskiön tulisi olla poikkileikkauksen keskellä, koska tällöin ristikkoliitosten epäkeskeisyydet on helpompi pitää pieninä. Neutraaliakselin osalta on huomioitava, että se määräytyy puhtaassa taivutuksessa ylälaipan, uumien ja alalaipan pinta-alan ja rajajännityksen funktiona. Puhtaassa taivutuksessa neutraaliakselin profiiliin puoliväliin saaminen on suhteellisen helppoa paksumman ylälaipan ja ohuemman alalaipan avulla, sillä taivutuksessa puolet poikkileikkauksesta on puristettu ja puolet on taivutettu.

Kun poikkileikkaukseen kohdistuu aksiaalinen voima, osallistuu sen vastustamiseen osa poikkileikkauksesta. Aksiaalinen voima lisää puristetun osan suhteellista osuutta poikkileikkauksesta. Tällöin yli puolet poikkileikkauksesta on puristettu ja alle puolet taivutettu, minkä seurauksena neutraaliakseli siirtyy alaspäin. Neutraaliakselin ollessa poikkileikkauksen alaosassa alkaa plastisoituminen ensin puristetusta yläosasta, jonka jälkeen plastisoituminen alkaa myös vedetystä osasta, edeten sisäosaan päin aina WQ-profiilin neutraaliakselille. Tätä on havainnollistettu liitteessä 1. Lisäksi neutraaliakselin sijainnilla on merkitystä WQ-profiilin puristuksen ja taivutuksen kestävyiden kannalta, sillä mitä suurempi profiiliin kohdistuva normaalivoima on, sitä vähemmän profiili kestänee taivutusta. Neutraaliakseleiltaan tasapainotettua profiilia on havainnollistettu kuvassa 12. Plastisuusteorian mukaisen neutraaliakselin laskentaa on käsitelty WQ-paarteen taivutuskestävyyttä käsittelevässä luvussa sekä liitteessä 2.



Kuva 12. Neutraaliakslien tasapainotus havainnollistettuna. Kuva: Mikko Kähkönen.

WQ-ristikossa käytetään poikkileikkausluokkaan 1 tai 2 kuuluvaa yläpaarretta. Poikkileikkausluokkavaatimus johtuu teräslitoksia käsittelevän eurokoodin SFS-EN 1993-1-8 vaatimuksista. Tällöin yläpaarteen mitoitus suoritetaan plastisuusteorian mukaisesti.

Ennen mitoituksen aloittamista on syytä varmistaa, ettei WQ-profiilin alalaippaa tukeva uuma pääse lommahtamaan. Yläpaarteen edellä mainitusta poikkileikkausluokkavaatimuksesta johtuen kyseessä onkin siis lähinnä varotoimenpide. Uuman lommahdus heikentää merkittävästi alalaipan kykyä kantaa ontelolaatalta tulevaa kuormitusta. Lommahduksen estäminen vaatii uumalta riittävää jäykkyyttä. Ehto tarkistetaan Teräsnormikortissa 21 esitetyn kaavan mukaisesti:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} \quad (1)$$

missä:

$A_{fc}$  on lommahduksen kannalta kriittisemmän laipan (joko ylä- tai alalaippa) pinta-ala

$A_w$  on WQ-profiilin uumien yhteenlaskettu pinta-ala

$f_{yf}$  on edellä määritetyn kriittisen laipan myötöraja

$h_w$  on uuman korkeus

$k = 0,3$  tai  $0,4$  tai  $0,55$ .  $k = 0,3$  kun hyödynnetään puristetun laipan plastista kiertymistä. Jos hyödynnetään plastisuusteorian mukaista taivutuskestävyyttä, käytetään arvoa  $k = 0,4$ . Arvoa  $k = 0,55$  käytetään, jos hyödynnetään kimmoteorian mukaista taivutuskestävyyttä

$t_w$  on uuman paksuus. [3, s. 18–19.]

Poikkileikkausluokka 1:ssä ja 2:ssa tämä lommahduksen tarkistusehto täyttyy aina. Lisäksi huomataan, että Teräsnormikortissa annettu kaava on sama kuin eurokoodissa SFS-EN 1993-1-5 on esitetty kaava, joka on kehitetty kaksoissymmetrisille poikkileikkauksille. Eurokoodissa ei kuitenkaan ole määritelty, mitä tarkalleen ottaen tarkoitetaan kimmoteorian mukaisella taivutuskestävyyden hyödyntämisellä. [6, s. 32; 7, s. 75.]

Tämän jälkeen tarkistetaan rakenneputkista tehtyjen diagonaalisauvojen poikkileikkausluokat. Lisäksi tarkistetaan alapaarteen poikkileikkausluokka, mikäli alapaarteena on rakenneputki. Näiden ehdot esitellään ristikkoliitoksia käsittelevässä osassa. Jos alapaarteena käytetään lattaterästä, voidaan sen poikkileikkausluokka määrittää taivutettuna rakenteena eurokoodia soveltaen.

#### 4.2 WQ-ristikkoon kohdistuvat rasitukset

Ennen WQ-ristikon liitosten mitoitusta tulee ensin varmistua, että ristikon osat kestävät niille kohdistuvat kuormat. Mitoittavina kuormina käytetään ristikon suurimpia voimia, joita ovat yläpaarteelle normaalivoima ja taivutusmomentti, diagonaalisauvoille puristus- ja vetovoima sekä alapaarteelle vetorasitus. Luvussa 4.3 käydään läpi WQ-yläpaarteen mitoitus ja siinä huomioitavat asiat. Luvussa 4.4 käydään lyhyesti läpi rakenneputkesta tehdyn alapaarteen sekä diagonaalisauvojen mitoitus.



### 4.3 WQ-yläpaarteen mitoitus

WQ-profiilista yläpaarretta mitoitettaessa tarkistetaan seuraavat asiat:

- Nurjahduskestävyys
- Leikkauskestävyys
- Vääntökestävyys
- Alalaipan poikittainen taivutuskestävyys
- Yläpaarteen taivutuskestävyys
- Yhdistetty puristus- ja taivutuskestävyys.

Näiden kaikkien kestävyyssehtojen tulee täyttyä, jotta valittua profiilia voidaan käyttää.

#### 4.3.1 Yläpaarteen nurjahduskestävyys

Nurjahduskestävyyden tarkastelun osalta on syytä huomioida, että eurokoodi SFS-EN 1993-1-1 liite BB mahdollistaa nurjahduspituuden pituusvalinnaksi 0,9-kertaisen etäisyyden solmuväliin nähden sekä ristikon tasossa että ristikon tasoa vastaan kohtisuorassa tapahtuvassa nurjahduksessa. Solmuväli on siis ristikon liitoskohtien välinen etäisyys. Lisäksi liite mahdollistaa myös 0,75-kertaisen nurjahduspituuden käytön ristikossa, mikäli diagonaalisauvojen ja parresauvan leveyksien suhde on pienempi kuin 0,6 ja jos uumasauvan pää hitsataan kauttaaltaan kiinni rakenneputkesta tehtyyn alapaarteeseen. Kummankaan solmuvälin osalta uumasauvat eivät saa olla päistään litistettyjä. Lattateräksestä tehtyyn alapaarteeseen tätä sääntöä ei voida soveltaa koska tämän tyyppistä ristikkoliitosta käsitteleviä tutkimuksia ei kirjoittajan tiedon mukaan ole olemassa. Lattateräksen tapauksessa varmalla puolella olevana valintana on käyttää nurjahduspituutena diagonaalisauvan omaa pituutta ( $1,0 \cdot L$ ). [5, s. 89–90.]

Osana Eulerin nurjahdusteorian mukaista nurjahduskestävyyden laskentaa tarvitsee selvittää ensin kimmoteorian mukainen WQ-profiilin jäyhyysmomentti, joka lasketaan seuraavasti:

$$I_y = \frac{b_{f2} * t_{f2}^3}{12} + b_{f2} * t_{f2} * \left( z_{el} - \frac{t_{f2}}{2} \right)^2 + 2 * \left( \frac{t_w * h_w^3}{12} + t_w * h_w * \left( t_{f2} + \frac{h_w}{2} - z_{el} \right)^2 \right) + \frac{b_{f1} * t_{f1}^3}{12} + b_{f1} * t_{f1} * (h - t_{f1} - z_{el})^2 \quad (2)$$

missä  $z_{el}$  on kimmoteorian puhtaan taivutuksen mukaan laskettu WQ-profiilin neutraaliakseli:

$$z_{el} = \frac{b_{f2} * t_{f2} * \frac{t_{f2}}{2} + 2 * t_w * h_w * \left( t_{f2} + \frac{h_w}{2} \right) + b_{f1} * t_{f1} * \left( h - \frac{t_{f1}}{2} \right)}{b_{f2} * t_{f2} + 2 * t_w * h_w + b_{f1} * t_{f1}} \quad (3)$$

Tämän jälkeen voidaan laskea kimmoteorian mukainen kriittinen nurjahduskuorma. Nurjahdustarkastelut suoritetaan Maquoi-Rondal -yhtälöihin perustuvan eurokoodin antaman menetelmän mukaisesti. Annetut nurjahduslaskentakaavat pätevät, mikäli käytettävä teräslaji on lujuudeltaan enintään S460 ja kun teräs on valmistettu eurooppalaisten standardien mukaisesti. Nurjahduskestävyyttä laskettaessa on syytä muistaa, että Maquoi-Rondal -yhtälöiden pohjalla ovat 1960- ja 1970-luvulla suoritettavat laajamittaiset kokeet. Tuohon aikaan teräksen valmistustekniikat olivat epätarkempia. Kaavojen osalta tämä tarkoittaa, että yhtälöistä saadut tulokset ovat jonkin verran epätarkkoja. [7, s. 131.]

#### 4.3.2 Leikkauskestävyys

WQ-profiilin leikkauskestävyyteen vaikuttaa, onko leikkauslommahdus määräävä vai ei. Johtuen yläpaarteelle asetetuista poikkileikkausluokkavaatimuksista leikkauslommahdus ei ole ongelmana, sillä profiilin uumien tulee kuulua poikkileikkausluokkaan 1 tai 2. Tällöin plastinen leikkausvoimakkestävyys lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v * f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} \quad (4)$$

missä  $A_v$  on leikkauksen pinta-ala:

$$A_v = \eta \sum (h_w t_w) \quad (5)$$

Kerroin  $\eta$  riippuu käytettävästä teräslaadusta. Käytettäessä teräslaatuja S235, S275, S355, S420 tai S460, on kerroin 1,2. Kerrointa 1,0 käytetään teräslaadun ollessa S500.

Jakajassa oleva luku  $\sqrt{3}$  tulee siitä, että leikkauskestävyyden laskentakaava perustuu Von Mises'n myötöehtoon, joka on esitelty käyttörajatilatarkasteluja käsittelevässä luvussa. [5, s. 11.]

Yhtälön perusteella voidaan todeta, että poikkileikkauksen kestävyys puhtaan leikkausjännityksen osalta on noin 57,7 % teräksen myötörajan suuruudesta. Huomautettakoon, että kokeilla on osoitettu taivutetun sauvan uuman pystyvän kantamaan merkittävästi suurempia leikkausjännityksiä kuin mitä von Mises'n myötöehdon lause sallii. Tämä ilmiö perustuu siihen, että teräs myötölujittuu leikkauksessa. Tämän johdosta leikkauspinta-alan suuruutta voidaan korottaa kertoimella  $\eta$ , kun uuman lommahtaminen ei ole vaarana. Sekä palomitoitusstandardi SFS-EN 1993-1-2 että levyrakenteiden eurokoodin (SFS-EN 1993-1-5) kansallinen liite rajoittavat myötölujenemisen hyödyntämistä leikkausvoimakestävyyden laskennassa 400 celsiusasteeseen asti. [7, s. 116 ja 118; 8, s. 20; 9, s. 2.]

Syy kertoimen 1,0 käyttöön isommilla teräslajeilla perustuu siihen, että teräksen myötölujenemisen määrä vähenee teräksen lujuuden noustessa. Toinen syy kertoimen käyttöön on, että koetuloksia suuremmille teräslajeille kuin S460 ei ole olemassa. [7, s. 118.]

Välilykisteettömän uuman leikkauslommahdus tulee tarkistaa, mikäli seuraava ehto toteutuu:

$$\frac{h_w}{t_w} > 72 \frac{\varepsilon}{\eta} \quad (6)$$

missä:

$h_w$  on uuman korkeus

$t_w$  on uuman paksuus

$\varepsilon$  on apusuure, joka huomioi käytetyn teräslajin vaikutuksen suhteessa teräslaatuun S235

$\eta = 1,2$  kun käytetään teräslajeja S235–S460. Jos käytetään lujempaa teräslaataa kuin S460, käytetään kerrointa 1,0. [6, s. 23.]

Leikkauslommahduksen kaavan osalta on syytä huomioida, että se on alun perin kehitetty yksiaukkoiselle, vapaasti tuetulle I-profiiliselle palkille. Kaava perustuu koetuloksille ja näissä analyyseissa olettamuksena on ollut, että levyn reunat ovat nivelellisesti tuetuja. [7, s. 48.]

#### 4.3.3 Vääntö ja väännön WQ-paarteelle aiheuttama lisäleikkausvoima

WQ-yläparretta mitoitettaessa on syytä huomioida, että siihen kohdistuu ontelolaattojen alalaipalle kohdistamien epäkeskeisten kuormitusten takia myös vääntöä. Vääntö puolestaan saa aikaan WQ-paarteelle lisäleikkausjännityksiä.

Teräsnormikortin mukaan kokonaisvääntömomentti  $T_{Ed}$  lasketaan St. Venant'n vapaan väännön periaatteen mukaisesti, jossa vääntö muodostuu alalaipalle kohdistuvan tukireaktion etäisyydestä uuman puoliväliin. Vääntökestävyys tarkistetaan seuraavasti, kun leikkauslommahdus ei ole määräävä:

$$T_{Rd} = \frac{2A * t * f_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} \quad (7)$$

missä:

A on kotelon seinämän sisään keskiviivan sisään jäävä pinta-ala:

$$A = (b_1 - t_w) * (h_w + \frac{t_{f1} + t_{f2}}{2}) \quad (8)$$

t on kriittisemmän seinämän paksuus (joko  $t_{f1}$ ,  $t_{f2}$  tai  $t_w$ )

$f_w$  on uuman myötöraja.

Kaavaa tutkimalla havaitaan, että pinta-alan laskennassa vain kotelo-osan oletetaan olevan riittävän vääntöjäykkä ja että alalaippa voi taipua väännöstä.  $\sqrt{3}$  ilmaisee, että kaava

perustuu Von Mises'n myötöehtoon. Lisäksi voidaan havaita, että WQ-profiilin osien paksuuden vaihtelun takia rakenne mitoitetaan kestävyydeltään heikoimman osan eli uuman mukaan. Tämä mitoitustapa johtuu ylälaipan, alalaipan ja uumien erilaisista paksuuksista. [3, s. 12; 7, s. 119.]

Vääntövoimankestävyyden tarkistamisen jälkeen lasketaan WQ-paarteelle vapaasta väännöstä aiheutuva leikkausjännitys seuraavasti:

$$\tau_{t.Ed} = \frac{T_{t.ed}}{2At} \quad (9)$$

missä:

A on kaavassa 8 esitelty kotelon seinämän keskiviivan sisään jäävä pinta-ala

t on kriittisemmän seinämän paksuus.

Voidaankin siis todeta, että tarpeen vaatiessa voidaan leikkausjännityksen aiheuttamaa rasitusta pienentää kasvattamalla kriittisemmän seinämän paksuutta, esimerkiksi lisäämällä uuman paksuutta 8 millimetristä 10 millimetriin.

Osana vääntötarkasteluja tulee tarkistaa, että parre kestää sille ontelolaatalta tulevan leikkausvoiman rasitukset, kun leikkauskestävyyttä vähennetään huomioimalla väännön vaikutukset:

$$V_{pl.T.Rd} = \left[ 1 - \frac{\tau_{t.Ed}}{(f_w/\sqrt{3})/\gamma_{M0}} \right] V_{pl.Rd} \quad (10)$$

missä:

$V_{pl.T.Rd}$  on plastisuusteorian mukaan laskettu leikkauskestävyys, josta on vähennetty St. Venant'n väännön vaikutukset leikkauskestävyyteen. Voidaan havaita, että tässä kohtaa Teräsnormikortti käyttää rakenneputken kaavaa, sillä WQ-profiilin kestävyys määritetään heikoimman osan paksuuden mukaisesti ikään kuin rakenneputkenä.

$f_w$  on uuman myötöraja

$V_{c,Rd}$  on leikkauskestävyys, joka lasketaan plastisuusteorian mukaan. Tähän syynä on yläpaarten poikkileikkausluokkavaatimus. [3, s. 12; 5, s. 57.]

#### 4.3.4 Alalaipan poikittainen taivutuskestävyys

WQ-paarten alalaipan taivutuskestävyyden osalta tulee tarkistaa sen kestävyys epäkeskeiselle kuormalle. Samalla tarkistetaan, joudutaanko tämän vaikutus huomioimaan alentamalla alalaipan myötölujuutta. Jotta epäkeskeisen kuorman aiheuttama taivutusmomentti saadaan laskettua, pitää laskea ensin kuorman etäisyys uuman kyljestä mitattuna. Käytetään havainnollistavana esimerkkinä ontelolaatan tukireaktion epäkeskeisyyttä:

$$b_j + \frac{d}{2} \quad (11)$$

missä:

$b_j$  on saumavalun paksuus

$d$  on ontelolaatan tukipinnan leveys. [3, s. 7; 4, s. 222.]

Mikäli käytetään kuorilaattaelementtiä, lasketaan tukireaktion epäkeskeisyys seuraavasti:

$$b_j + \frac{b-b_j}{3} \quad (12)$$

Kun epäkeskeisyyden aiheuttama taivutuksen suuruus on selvitetty, lasketaan alalaipan taivutuskestävyys. Koska yläpaarten on eurokoodin mukaan kuuluttava poikkileikkausluokkaan 1 tai 2, lasketaan taivutusvastus plastisuusteorian mukaisesti:

$$W_{alalaippa.pl} = 1000mm * \frac{t_p^2}{4} \quad (13)$$

missä  $t_p$  on alalaipan paksuus. Toisin sanoen, mitä paksumpi alalaippa, sen parempi alalaipan taivutuskestävyys on. Nyt laskennassa syntyvä yksikkö on  $\text{mm}^3/\text{m}$ . Taivutuskestävyys lasketaan seuraavan kaavan mukaan:

$$M_{alalaippa.Rd} = \frac{W_{alalaippa.pl} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (14)$$

Tämän jälkeen tarkistetaan, että epäkeskeisyyden taivutukselle asetettu ehto täyttyy:

$$\frac{M_{p.Ed}}{M_{p.Rd}} \leq 0.5 \quad (15)$$

Missä  $M_{p.Ed}$  on tukireaktion epäkeskeisyydestä aiheutuva taivutusmomentti. Jos käyttöaste epäkeskeisen kuormituksen suhteen on alle puolet, on tästä aiheutuvan kuorman rasitus alalaipalle hyväksyttävissä. Tällöin poikittaisen taivutuksen ei katsota vaikuttavan heikentävästi paarteen y-akselin suhteen tapahtuvaan taivutuskestävyyteen. [3, s. 16; 4, s. 220.]

Jos epäkeskeisen kuorman aiheuttama taivutusmomentti on yli puolet alalaipan taivutuskapasiteetista, otetaan sen vaikutus huomioon alalaipan taivutuskestävyyden laskennassa vähentämällä myötörajaa seuraavasti:

$$f_{y,red} = f_y \sqrt{1 - \left( \frac{M_{p.Ed}}{M_{p.pl.Rd}} \right)^2} \quad (16)$$

missä  $M_{p.pl.Rd}$  on yhden metrin pituiselle matkalle laskettu alalaipan poikittainen plastinen taivutuskestävyys.

Mikäli myötörajan vähennyksen jälkeen liitoksen kestävyys ei riitä, paksunnetaan alalaippaa ja suoritetaan mitoitus uudestaan. Kuitenkin paksuhkojen alalaippojen osalta on syytä pitää mielessä lamellirepeilyn riski. Sitä voidaan ehkäistä vähentämällä alalaipan yläpintaan kohdistuvaa kohtisuoran suunnan mukaista vetojännitystä. Myös hitsauksen muotoilulla ja rakenteella, kuten myös hitsauksen suoritusjärjestyksellä voidaan pienentää lamellirepeilyn todennäköisyyttä. [4, s. 221 ja 470.]

#### 4.3.5 WQ-paarteen taivutuskestävyys ja sitä pienentävät tekijät

Taivutuskestävyyden laskeminen y-akselin suunnassa riippuu siitä, missä laajuudessa poikkileikkauksessa tapahtuva paikallinen lommahdus rajoittaa sen kestävyyttä ja kiertymiskykyä. Teräslitoseurokoodin mukaan yläpaarteen tulee kuulua vähintään poikkileikkausluokkaan 2. Tällöin siihen voi kehittyä plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyys, mutta paikallinen lommahdus rajoittaa sen kiertymiskykyä. [10, s. 127.]

WQ-profiilin taivutusvastus lasketaan ensin plastisen taivutusteorian mukaisesti:

$$W_{pl} = b_{f1}t_{f1} \left( h - z_0 - \frac{t_{f1}}{2} \right) + b_{f2}t_{f2} \left( z_0 - \frac{t_{f2}}{2} \right) + 2 \left( t_w(h - z_0) \left( \frac{h - z_0}{2} \right) \right) + 2(t_w(z_0 - t_{f2}) \left( z_0 - t_{f2} - \frac{z_0 - t_{f2}}{2} \right)) \quad (17)$$

missä plastisuusteorian puhtaan taivutuksen mukainen neutraaliakseli lasketaan seuraavasti:

$$z_0 = \frac{2t_w(t_{f2} + h) + b_{f1}t_{f1} - b_{f2}t_{f2}}{4t_w} \quad (18)$$

Plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden laskenta tapahtuu seuraavasti:

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl}f_y}{\gamma_{M0}} \quad (19)$$

On kuitenkin otettava huomioon, että taivutuskestävyyden lopulliseen arvoon vaikuttavat niin vääntö, leikkausvoima kuin poikittainen taivutus. Nämä kolme tekijää voivat saada aikaan sen, että taivutuskestävyyttä joudutaan pienentämään. Myös normaalivoiman vaikutus taivutuskestävyyttä vähentävänä tekijänä tulee huomioida. [3, s. 16; 4, s. 221.]

Poikittainen taivutus voi omalta osaltaan vähentää WQ-yläpaarteen taivutuskestävyyttä, joka lasketaan tällöin alalaipan pienennetyn myötörajan avulla. On myös tarkistettava, vähentääkö leikkausvoima uumien teräksen myötörajaa. Eurokoodissa on annettu tarkistusehto, jossa tarkastetaan, onko leikkausvoiman suuruus puolet paarteen plastisesta leikkauskestävyydestä:



$$V_{Ed} \geq 0,5V_{pl.Rd} \quad (20)$$

Jos edellä mainittu ehto toteutuu, pienennetään uumien myötörajaa seuraavalla tavalla:

$$f_{y.red} = (1 - \rho)f_y \quad (21)$$

missä:

$$\rho = \left( \frac{2V_{Ed}}{V_{pl.Rd}} - 1 \right)^2 \quad (22)$$

Tämän jälkeen taivutusvastuksen kestävyys osalta huomioidaan puristuksen vaikutus taivutuskestävyyteen:

$$M_{N.Rd} = M_{pl.Rd} * \frac{1-n}{1-0,5*a_w} \quad (23)$$

missä

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl.Rd}} \quad (24)$$

$$a_w = \frac{A_{wq} - (b_{f1} + 2t_w) * t_{f1} - b_{f2} * t_{f2}}{A_{wq}} \leq 0,5 \quad (25)$$

missä  $M_{pl.Rd}$  on joko pienennetty tai pienentämätön taivutuskestävyys riippuen siitä, vähentävätkö leikkausvoima ja/tai poikittainen taivutus WQ-profiilin taivutuskestävyyttä.

Kaavassa esiintyvä  $A_{wq}$  tarkoittaa koko WQ-profiilin pinta-alaa. Poikkileikkauksen taivutuskestävyydestä vähennetään siis puristuksen alainen osuus, jolloin taivutuskestävyyden laskenta tapahtuu poikkileikkauksen kokonaisvetovoiman tai kokonaispuristusvoiman funktiona momenttivarten. Eurokoodissa asia on tulkittu siten, että molemmat uumat osallistuvat kokonaan aksiaalisen voiman välittämiseen. Kyseessä on yksinkertaistus, missä oletetaan vain ylä- ja alalaipan osallistuvan taivutukseen. Tällöin saatu tulos on varmalla puolella. Uumien osuuden huomioiva taivutuskestävyyden laskenta-esimerkki on esitetty liitteessä 3. Lisäksi liitteessä 4 on esitetty suorakaiteen muotoisen

puristetun ja taivutetun kappaleen taivutuskestävyyden laskenta yksinkertaisena esimerkkinä helpottamaan liitteen 3 ymmärtämistä. [3, s. 17; 4, s. 182; 5, s. 58–59.]

#### 4.3.6 Yhdistetty puristus- ja taivutuskestävyys

Yläpaarteeseen osalta tulee tarkistaa, että yläpaarteeseen kestävä puristuksen ja taivutuksen yhteisvaikutuksen. Useimmiten yhteisvaikutus on yläpaarteeseen kestäväyyden kannalta määräävä tekijä. Teräseurokoodi SFS-EN 1993-1-1 antaa tähän kaksi tapaa, joista tässä esitellään yksinkertaisempi menetelmä 2. Tässä kohtaa eurokoodia joudutaan tarkistelemaan hyvinkin tarkasti, sillä eurokoodin yhdistetyn puristuksen ja taivutuksen kaavojen taustalla olevat kaavat perustuvat rakenneputkille, I- ja HEB-profiileille tehtyihin GMNIA-laskenta-analyysiin. GMNIA on lyhenne sanoista Geometrically and Materially Nonlinear Analysis, missä on huomioitu materiaalin ominaisuudet sekä valmistuksesta johtuvat profiilien epätäydellisyydet. Eurokoodien kaavojen perusteella tehtävä yhdistetyn puristuksen ja taivutuksen kestäväyyden tarkistus voidaan suorittaa, kunhan huomioidaan että ilmiöt kohdistuvat nyt koko WQ-profiiliin. [7, s. 151–152.]

Koska yläpaarteeseen kohdistuu kuormaa vain y-akselin suhteen, tarkistetaan yhdistetyn taivutuksen ja aksiaalisen puristuksen ehto eurokoodin mukaan seuraavasti:

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (26)$$

Kaavan perässä oleva numero 1 tarkoittaa, että puristusvoiman, y- ja z-akselin suuntaiset momentin sekä näiden akselien suunnassa painopisteakselin siirtymästä aiheutuvan lisämomenttien aikaansaama käyttöaste saa olla enintään 100 prosenttia WQ-profiilin kestävyteen nähden. [4, s. 196–197.]

Kaavaa voidaan edelleen sieventää, kun huomioidaan, että z-akselin suuntaista kuormaa ei ole. Myöskään painopisteakselin akselin suhteen siirtymisestä aiheutuvia momenteja ei esiinny, koska kyseessä ei ole poikkileikkausluokka 4:n mukainen poikkileikkaus. Kaavaa tutkimalla voidaan havaita, että taivutuskestävyydellä tarkoitetaan puhdasta taivutusta. Tämä ehto ei tarkalleen ottaen päde WQ-profiilille, sillä sen molemmille alalajoille kohdistuu samanaikaisesti epäkeskeisiä kuormituksia. Yhteisvaikutusta

laskettaessa tulee huomioida mahdolliset alalaipan poikittaisen taivutuksen sekä leikkausvoiman ja väännön lisäleikkausjännityksen aiheuttamat pienennykset WQ-profiilin taivutuskestävyyden laskennassa.

Kaava sievenee seuraavanlaiseen muotoon:

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (27)$$

missä:

$$N_{Rk} = A_{wq} f_y \quad (28)$$

$$M_{y,Rk} = W_{pl,y,wq} f_y \quad (29)$$

$$\chi_y = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr,y}}} \quad (30)$$

$$\chi_{LT} = 1 \quad (31)$$

Syynä kiepahduskertoimen  $\chi_{LT}$  kertoimen arvoon 1 on, että WQ-paarre ei ole altis kiepahdukselle. [5, s. 65 ja 70.]

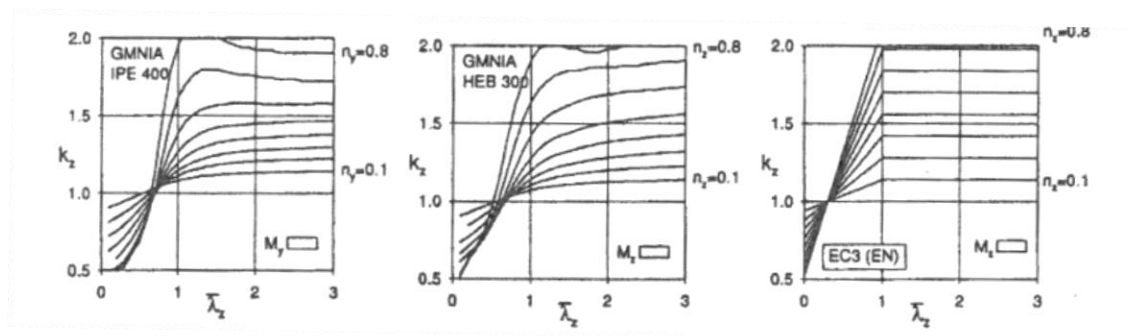
Yhteisvaikutuskerroin  $k_{yy}$  lasketaan seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$k_{yy} = C_{my} \left( 1 + (\lambda_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \leq C_{my} \left( 1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \quad (32)$$

missä  $C_{my}$  riippuu momenttipinnan muodosta. [5, s. 86–87.]

Todettakoon, että nyt käytettävät eurokoodin SFS-EN 1993-1-1 yhteisvaikutuskertoimet ovat linearisoituja, kuten kuvasta 13 voidaan havaita. Kuvassa on näytetty  $k_z$ -kertoimen arvot eri tilanteissa, kun laskenta-analyysit on tehty IPE 400- ja HEB 300 -profiileille sekä

oikealla eurokoodin mukaiset arvot. Saadut tulokset eivät siis vastaa täysin materiaalien todellista rasituksen alaista käyttäytymistä. [7, s. 151.]



Kuva 13. Yhteisvaikutuskaavat on johdettu GMNIA-laskenta-analyysojen tuloksista. [7, s. 152.]

Mikäli saatu tulos on 1 tai sen alle, on tulos hyväksyttävissä. Jos tulos on yli yhden, pitää WQ-paarteen profiilien vahvuuksia vahvistaa. Paksujen profiilien osalta on syytä huomioida lamellirepeilyn riski.

#### 4.4 Rakenneputkesta tehdyn alapaarteen ja diagonaalisauvojen mitoitus

Rakenneputkien osalta mitoitus suoritetaan normaalisti eurokoodin osan SFS-EN 1993-1-1 mukaan. Valitun profiilin osalta tarkistetaan, että profiilin vetokestävyys kestää alapaarteessa suurimman vaikuttavan vetovoiman:

$$N_{t.Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} \quad (33)$$

Vedettyjen diagonaalisauvojen osalta iteroidaan sopiva profiili ja tarkistetaan että valittu profiili kestää siihen kohdistuvan vedon:

$$N_{t.Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} \quad (34)$$

Vedetty diagonaalisauva voi kuulua eurokoodin mukaan poikkileikkausluokkiin 1–4, koska koko poikkileikkaus toimii tehollisena eikä vedossa poikkileikkauksen hoikkuudella ole merkitystä. Poikkileikkauksen hoikkuudella on väliä puristuksessa, missä riskinä voi

olla teräsrakenteen paikallinen lommahtaminen. Tästä syystä teräslitoseurokoodi SFS-EN 1993-1-8 asettaa ehtoja vain puristetuille sauvoille. Puristettujen diagonaalisauvojen tulee kuulua vapaavälisessä K-liitoksessa joko poikkileikkausluokkaan 1 tai 2 ja limityksessä K-liitoksessa poikkileikkausluokkaan 1. [1, s. 637 ja 639 sekä 677; 5, s. 52; 10, s. 127.]

Lisäksi tulee tarkastaa puristetun sauvan tapauksessa sen nurjahduskestävyys. Nurjahduskestävyyden tarkistuksessa nurjahduspituutena voidaan käyttää aiemmin mainittua 90 %:n osuutta solmuvälien etäisyydestä. Vaihtoehtoisesti diagonaalisauvan kiinnitysten voidaan ajatella toimivan nivelellisesti ja tällöin solmuvälin pituutena käytetään diagonaalisauvan omaa pituutta. Tällöin ollaan nurjahduskestävyyden kannalta varmallalla puolella. [5, s. 89.]

Nurjahduskestävyyden osalta huomioidun puristetun diagonaalisauvan kestävyys tarkistetaan seuraavalla tavalla:

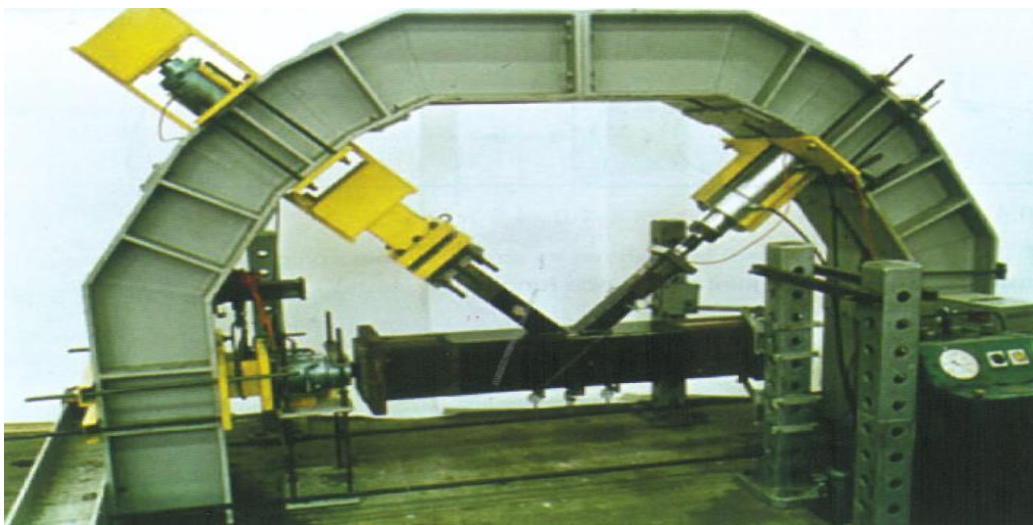
$$N_{b.Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \quad (35)$$

missä  $\chi$  on nurjahduskestävyyden pienennystekijä. Materiaalin säästämiseksi voidaan ristikon reunoilla käyttää isompia ja keskellä ohuempia profiileja, sillä diagonaalisauvoissa suurimmat voimat vaikuttavat tuen vieressä. Alapaarteessa suurin vaikuttava voima löytyy ristikon keskikohdalta. [5, s. 61.]

## 5 WQ-yläpaarteisen teräsristikon liitosten mitoitus

Ristikon mitoituksessa on syytä huomioida, että liitosten mitoituksia käsittelevässä eurokoodin osassa SFS-EN 1993-1-8 käsiteltävät liitokset koskevat vain liitoksia suorakaitteen muotoisten ja pyöreiden rakenneputkien välillä sekä näiden liitoksia I-, H- ja U-profiileihin. Teräslitoseurokoodin kaavat pohjautuvat kansainvälisen rakenneputkien kehitys- ja koulutuskomitea CIDECT'n (Comité International pour le Développement et l'Étude de la Construction Tubulaire) tutkimuksiin, joissa liitosten kestävyuden määrittämissä kriteereinä oli paarteiden pinnan myötääminen. Kuten kuvasta 14 voidaan havaita,

ristikkoliitosten murtumismääritykset suoritettiin koneellisesti. [10, s. 110; 11, s. 122; 12, s. 104 ja 106]



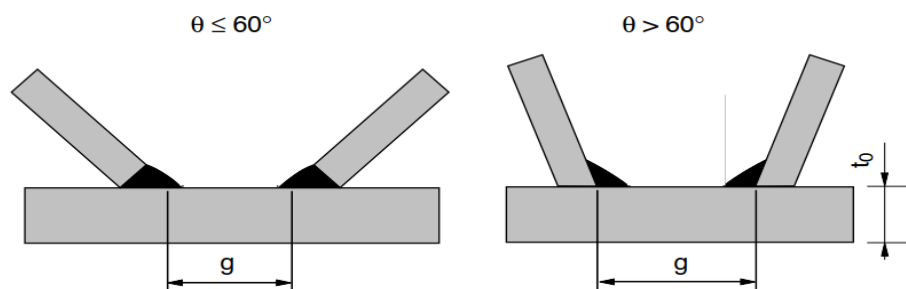
Kuva 14. Rakenneputkiliitoksen murtumismuodon määrittäminen käynnissä. [12, s. 99.]

Vaatimuksena eurokoodin yhtälöiden pätemiselle on, että liitoksissa käytettävien diagonaalisauvojen ja paarteen myötöraja on enintään  $460 \text{ N/mm}^2$ . Käytettävien diagonaalisauvojen ja rakenneputkesta tehdyn alapaarteen nimellisen paksuuden tulee olla vähintään  $2,5 \text{ mm}$  ja enintään  $25 \text{ mm}$ . Perusteena enimmäispaksuudelle on lamellirepeilyn estäminen. Paksumpien rakenneosien käyttö vaatii erikoistoimenpiteitä niiden toimivuuden varmistamiseksi. [10, s. 110; 12, s. 103.]

Mikäli käytetyn teräksen myötölujuus on yli  $355 \text{ N/mm}^2$ , huomioidaan teräslitoseurokoodin laskukaavojen antamasta kestävydestä vain  $90 \%$ . Tälle perusteluna on se, että ristikkoliitostestit on tehty pääasiassa teräslajin S355 teräksille ja tätä lujemmille teräslajeille on olemassa sangen vähän koetuloksia. Mikäli käytetään standardin SFS-EN 1993-1-2 mukaisia korkealujuuksisia teräksiä (S500–S700), huomioidaan ristikkoliitoksen kaavojen antamasta kestävyden tuloksesta vain  $80 \%$ . Näillä kertoimilla otetaan samalla huomioon liitosten suuret muodonmuutokset, jos paarteen pinta tai sen poikkileikkaus plastisoituu. [10, s. 110; 11, s. 122, 12, s. 66–67; 13, s. 8.]

Liitettävän diagonaalisauvan kulman tulee olla vähintään  $30^\circ$  ja enintään  $90^\circ$ . On syytä myös huomata, että diagonaalisauvojen asennot vaikuttavat liitoksen kestävyden

lisäksi niiden hitsaustapaan ja samalla vapaavälin mitan tulkintaan. Mikäli sauva on liitetty paarteeseen alle 60 asteen kulmassa, tarkastellaan hitsausliitosta päittäishitsinä. Liittymiskulma ei saa olla kuitenkaan alle 30 astetta, jotta se pystytään hitsaamaan luotettavasti paarteeseen kiinni. 60–90-asteinen liitos käsitellään pienahitsattuna liitoksena. Sauvojen liittymiskulmia on havainnollistettu kuvassa 15 periaatetasolla kuvattuna. Hitsausliitosten toteutukselle kohdistuvia vaatimuksia käsitellään tarkemmin omassa luvussa. [14, s. 145–146.]



Kuva 15. Diagonaalisauvan liittymiskulman vaikutus vapaavälin tulkintaan sekä hitsaamistapaan. [1, s. 638.]

Mikäli diagonaalisauvan pituus  $L$  ja liitoksen epäkeskeisyys  $e$  täyttävät alla esitetyissä kaavoissa 36 ja 37 esitetyt ehdot, ei liitoksen epäkeskeisyydestä aiheutuvia momentteja ja liitosten kiertymisjäykkyydestä aiheutuvia sekundäärisiä momentteja tarvitse ottaa huomioon diagonaalisauvojen ja vedetyn alapaarteen mitoituksessa:

$$L \geq 6h \quad (36)$$

$$-0,55h_0 \leq e \leq 0,25h_0 \quad (37)$$

missä

$h$  on tarkasteltavan diagonaalisauvan poikkileikkauksen korkeus.

$h_0$  on paarteen poikkileikkauksen korkeus. Puristetun yläpaarteen osalta epäkeskeisyydestä aiheutuvat momentit otetaan aina huomioon jakamalla epäkeskinen momentti liitoskohdan molemmiin puoliin WQ-paarretta jäykkyyksilukujen  $I/L$  -suhteessa, missä  $L$  on yläpaarteen solmuvälipituus. [1, s. 170; 10, s. 56–57.]

Vapaaväliselle K-liitokselle epäkeskeisyys määritetään seuraavasti:

$$e = \left( \frac{h_1}{2\sin\theta_1} + \frac{h_2}{2\sin\theta_2} + g \right) \frac{\sin\theta_1\sin\theta_2}{\sin(\theta_1+\theta_2)} - \frac{h_0}{2} \quad (38)$$

missä:

$h_1$  on puristetun diagonaalisauvan 1 poikkileikkauksen korkeus

$h_2$  on vedetyn diagonaalisauvan 2 poikkileikkauksen korkeus

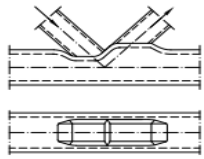
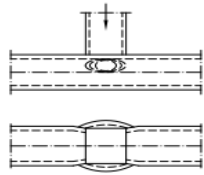
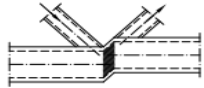
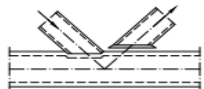
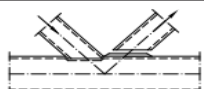
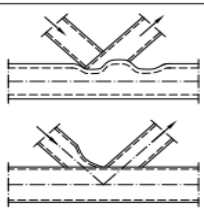
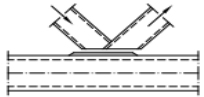
$g$  on vapaavälin leveys

$\theta_1$  ja  $\theta_2$  ovat liittyvien diagonaalisauvojen kulmien suuruudet. Epäkeskeisyyden laskentakaavaa ei kuitenkaan esitetä teräsliitoseurokoodissa, vaan kaava haetaan CIDECT'n Hollow Sections in Structural Applications- tai SSAB Domex Tube Rakenneputket -käsikirjasta. [1, s. 170; 12, s. 66.]



## 5.1 Liitosten murtumistavat teräsristikossa

Kuvassa 16 on esitetty liitosten erilaiset murtumistavat kootusti.

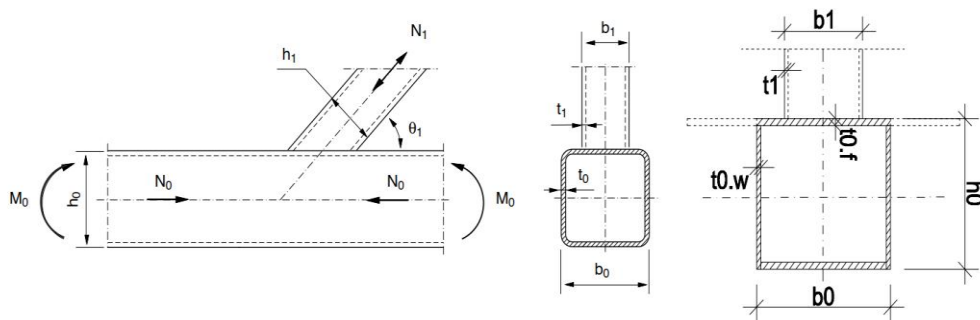
Murtotapa		Rakenne, jolla murtotapa on mahdollinen
Paarteen pinnan plastinen murtuminen tai paarteen koko poikkileikkauksen murtuminen plastisoitumalla		Ohutseinäinen paarre ja pieni uumasauvan leveys verrattuna paarteen leveyteen
Paarteen uuman murtuminen myötäämällä tai lommahtamalla uumasauvan puristuksesta johtuen		Korkea ja ohutseinäinen paarre sekä samanlevyiset paarre ja uumasauva
Paarteen leikkausmurtuminen		Matala ja ohutseinäinen paarre
Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen		Ohutseinäinen ja leveä paarre, uumasauva hieman paarretta kapeampi
Uumasauvan tai hitsin murtuminen		Ohutseinäinen uumasauva ja paksuseinäinen paarre
Uumasauvan tai paarresauvan paikallinen lommahdus		Paarre: Ohutseinäinen ja leveä  Uumasauva: Ohutseinäinen ja suuri sivumitta
Uumasauvojen leikkautuminen paarteesta		Limitetty liitos, kun limityksen suuruus $\lambda_{qv} > \lambda_{qv,lim}$ tai kun uumasauvojen $h_1 < b_1$ tai $h_2 < b_2$

Kuva 16. Liitosten mahdolliset murtumistavat. [1, s. 168.]

Kuten kuvasta voidaan havaita, on paarteen ja uumasauvan poikkileikkauksen mitoilla sekä seinämäpaksuuksilla iso merkitys liitoksen murtumismuodon kannalta. Onkin siis syytä huomioida, että vaihdettaessa esimerkiksi uumasauvan riittämättömän liitoksetävyden takia profiilia isompaan voi myös liitoksen murtumistapa vaihtua. Y- ja vapaavälisen K-liitoksen murtumismuodot esitellään seuraavissa luvuissa kohta kohdalta.

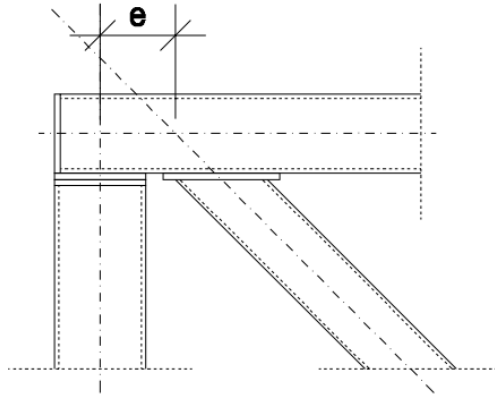
## 5.2 Vahvistamaton Y-liitos

Y-liitosta käytetään teräsristikon reunatuella, missä yksittäinen vedetty rakenneputki liittyy WQ-profiiliseen yläpaarteeseen. Tätä liitostyyppiä on tämän työn mukaisessa teräsristikossa yhteensä kaksi kappaletta, yksi molemmilla reunoilla. Eurokoodin mukaisen Y-liitoksen liitosparametrien soveltamista on havainnollistettu kuvassa 17. WQ-profiilista huomioidaan sen suorakaiteen muotoinen osa, sillä tämä osa yläpaarteesta osallistuu ristikkoliitoksen voimien välittämiseen. Kuvassa on näytetty liitosanalogian avulla, miten WQ-paarretta voidaan käyttää liitoksen mitoituksessa.



Kuva 17. Y-liitos, jossa vaikuttaa momentti ja normaalivoima. Kuvassa näytetty liitosparametrien analogia. Oikeanpuoleisin kuva: Mikko Kähkönen. [1, s. 636.]

Kuten edellä on mainittu, tulee liitoksille asetettujen yleisten vaatimusten lisäksi tarkistaa, että liitoksen epäkeskisyys on sallituissa rajoissa. Y-liitoksessa tarkasteltava epäkeskisyys on tukipilarin/seinän painopisteen akselin ja diagonaalisauvan painopisteen akselin välinen etäisyys. Epäkeskisyys lisääntyy, mikäli yläpaarteen painopiste akseli on sen poikkileikkauksen puoltaväliä alempana. Tätä on havainnollistettu kuvassa 18.



Kuva 18. Epäkeskeisyys Y-liitoksessa. Mitä suurempi epäkeskeisyys, sitä suurempi on siitä aiheutuva taivutusmomentti. Kuva: Mikko Kähkönen.

Jotta liitos voidaan hitsata turvallisesti paikalleen, tarkistetaan neliön ja suorakaiteen muotoisille uumasauvoille asetetut hitsausliitosten pätevyysrajat:

$$\frac{b_1}{b_0} \geq 0,25 \quad (39)$$

$$\frac{b_1}{t_1} \leq 35 \quad (40)$$

$$\frac{h_1}{t_1} \leq 35 \quad (41)$$

$$0,5 \leq \frac{h_1}{b_1} \leq 2,0 \quad (42)$$

missä:

$b_1$  on uumasauvan leveys

$h_1$  on uumasauvan korkeus

$t_1$  on uumasauvan seinämäpaksuus

$b_0$  on WQ-yläpaarten suorakaiteen muotoisen osan leveys. [1, s. 637; 10, s. 127.]

Esitetyt merkinnät siis tarkoittavat, että uumasauvan leveyden suhde paarteen leveyteen tulee olla vähintään 25 % ja että uumasauvan leveyden sekä korkeuden suhde sen seinämäpaksuuteen saavat olla enintään 35-kertaisia. Viimeinen tarkistusehdote tarkoittaa, että uumasauvan korkeuden suhde sen omaan leveyteen pitää olla vähintään puolet ja enintään kaksinkertainen omaan leveyteensä nähden. Korkeuden ja leveyden mitat riippuvat sauvan asentamistavasta. Yläpaarteen Y-liitoksessa ei vedetylle uumasauvalle ei ole asetettu poikkileikkausluokan ehtoa, sillä vedossa sauvan lommahtaminen ei ole vaarana.

Paarteelle asetetut hitsausliitosten pätevyysrajat ovat seuraavanlaiset:

$$\frac{b_0}{t_{0,f}} \leq 35 \quad (43)$$

$$\frac{h_0}{t_{0,w}} \leq 35 \quad (44)$$

$$0,5 \leq \frac{h_0}{b_0} \leq 2,0 \quad (45)$$

missä:

$b_0$  on WQ-profiilin suorakaiteen muotoisen osan leveys

$h_0$  on yläpaarteen poikkileikkauksen korkeus

$t_{0,f}$  on WQ-profiilisen yläpaarteen alalaipan paksuus

$t_{0,w}$  on yläpaarteen uuman paksuus. [1, s. 637; 10, s. 127.]

Tarkistamisen periaate on sama kuin edellä. Annetuilla ehdoilla tarkistetaan, että WQ-suorakaiteen leveys suhteessa alalaipan paksuuteen sekä sen korkeuden suhde uuman paksuuteen ovat enintään 35-kertaisia ja että paarteen korkeus on vähintään puolet leveydestä. Kuitenkin profiili saa olla korkeudeltaan enintään kaksinkertainen WQ-suorakaiteen leveyteen nähden. Esimerkiksi jos WQ-paarre on 200 millimetriä leveä sen suorakaiteen muotoiselta osalta, saa yläpaarteen korkeus olla enintään 400 millimetriä.

Minimissään profiilin korkeuden tulee siis olla 100 millimetriä. Lisäksi WQ-yläpaarteeseen tulee kuulua poikkileikkausluokkaan 1 tai 2.

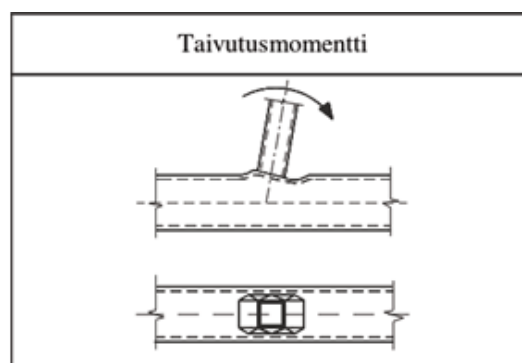
Tämän jälkeen liitokselle lasketaan uumasauvan leveyden suhde paarteeseen halkaisijaan seuraavasti:

$$\beta = \frac{b_1}{b_0} \quad (46)$$

Kuten aiemmin on todettu, uumasauvan leveyden suhteella WQ-paarteeseen suorakaiteosan leveyteen on kriittinen vaikutus siihen, miten liitoksen murto tapahtuu.

### 5.2.1 Yläpaarteeseen pinnan myötääminen Y-liitoksessa

Yläpaarteeseen pinnan myötäämistä Y-liitoksen tapauksessa on havainnollistettu kuvassa 19. Vedetyn sauvan tapauksessa murtuminen tapahtuu taivutusmomentin vaikutuksesta.



Kuva 19. Paarteeseen pinnan myötääminen havainnollistettuna. [10, s. 115.]

Kun suhdeluku  $\beta$  on enintään 0,85 (eli uumasauvan leveys on enintään 85 % paarteeseen leveydestä), tulee tarkistaa liitoksen enimmäiskestävyys yläpaarteeseen pinnan myötäämistä vastaan. Tällä tarkoitetaan siis enimmäisnormaalivoimaa, jolla yläpaarrelitosta voidaan kuormittaa ennen kuin WQ-profiilin alalaippa alkaa myötäämään. Liitoksen kestävyys tätä murtumismuotoa vastaan tarkistetaan seuraavasti:

$$N_{1.Rd} = \frac{k_n f y_0 t_0 f^2 \left( \frac{2\eta}{\sin\theta_1} + 4\sqrt{1-\beta} \right)}{(1-\beta)\sin\theta_1 \gamma_{M5}} \quad (47)$$

missä:

$f y_0$  on yläpaarteen myötöraja

$\beta$  on uumasauvan leveyden suhde paarteen leveyteen. [1, s. 637; 10, s. 130.]

Eurokoodi antaa kaksi eri ehtoa kertoimen  $k_n$  laskemiselle, joka ottaa huomioon paarteen kohdistuvan puristuksen ja taivutuksen ristikkoliitoksen kestävyttä heikentävän vaikutuksen. Puristetun yläpaarteen tapauksessa liitoksen kestävyden pienennyskerroin  $k_n$  lasketaan seuraavasti:

$$k_n = 1,3 - \frac{0,4|n|}{\beta} \leq 1,0 \quad (48)$$

Lausekkeessa esiintyvä kerroin  $n$  tarkoittaa paarteessa vaikuttavan normaalivoiman ja momentin yhdessä aiheuttaman puristusjäännityksen suhdetta myötölujuuden mitoitusarvoon. Se lasketaan seuraavasti:

$$n = \frac{N_{0.Ed}}{A_0 f y_0 / \gamma_{M5}} + \frac{M_{0.Ed}}{W_{el.0} f y_0 / \gamma_{M5}} \quad (49)$$

missä:

$A_0$  on koko WQ-profiilin poikkileikkauksen pinta-ala

$W_{el.0}$  on WQ-paarteen kimmoinen taivutusvastus. [1, s. 637; 10, s. 17, 112 ja 130.]

Yhtälöllä tarkistetaan, ettei yläpaarteeseen synny voimien yhteisvaikutuksesta pysyviä muodonmuutoksia. Mikäli näiden yhteisvaikutuksesta aiheutuva jäännitys ylittäisi myötörajan mitoitusarvon suuruuden, syntyisi yläpaarteeseen pysyviä muodonmuutoksia. Vedetyn alapaarteen tapauksessa kertoimen  $k_n$  arvona käytetään 1, sillä tällöin normaalivoima ja taivutusmomentti eivät heikennä liitoksen kestävyttä.

Kaavassa 49 esiintyvän kimmoteorian mukainen taivutusvastus lasketaan seuraavasti:

$$W_{el,0} = \frac{I_{y,el}}{z_{el}} \quad (50)$$

missä  $I_{y,el}$  on kimmoteorian mukainen jäyhyysmomentti ja  $z_{el}$  on kimmoteorian mukainen neutraaliakseli. Nyt laskettava taivutuskestävyys on siis puhtaan taivutuksen mukainen.

Tässä huomioidaan siis koko WQ-paarteen poikkileikkauksen jäyhyys sellaisenaan. Tekijän  $n$  osalta tulee tarkistaa, ettei normaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutusjännitys ylitä käytetyn teräslajin myötörajaa:

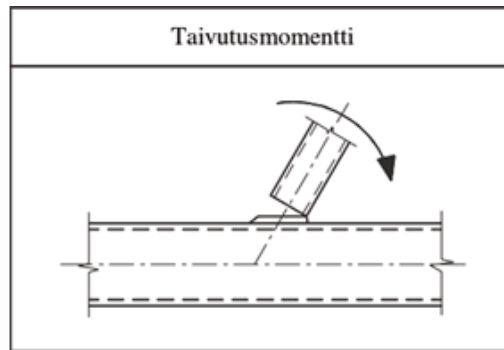
$$\frac{n}{f_{y0}/\gamma_{M5}} \leq 1,0 \quad (51)$$

Kaavassa 49 esitetty termi  $n$  on paarteessa vaikuttavan normaalivoiman ja momentin aiheuttaman puristusjännityksen suhde myötölujuuden mitoitusarvoon. Voidaankin siis todeta, että mitä suurempi normaalivoima ja taivutusmomentti yläpaarteessa vaikuttavat yhtäaikaisesti, sitä pienempi on myös uumasauvan liitoksen kestävyys.

Jos liitoksen kestävyys on liian pieni tai teräksen myötörajakestävyys liitosalueella ylittyy, voidaan liitoksen kestävyyttä parantaa metallisella vahvistuslevyllä. Vahvistetulle Y-liitokselle on esitetty teräslitoseurokoodissa omat laskentakaavat. Vaihtoehtoisesti WQ-profiilin alalaippaa voidaan paksuntaa. Muita liitoksen kestävyiden parantamiskeinoja ovat WQ-profiilin osien paksuntaminen kasvattaa tai teräslajia vaihtaminen lujempaan, mikäli profiili ei kestä sille tulevia voimien yhteisvaikutuksia. Profiilin kokoa kasvatettaessa tulee huomioida sen vaikutus poikkileikkauksen painopisteakselin sijaintiin ja siitä aiheutuvaan liitosten epäkeskeisyyteen. Myös teräksen lamellirepeilyn riski tulee huomioida paksujen osien osalta. Myös diagonaalisauvan liitoskulman vaihtaminen loivempaan lisää liitoksen kestävyttä. [1, s. 668-669; 10, s. 137.]

### 5.2.2 Uumasauvan myötääminen

Uumasauvan myötäämistä Y-liitoksen tapauksessa on havainnollistettu kuvassa 20. Tässä murtumismuodossa säröjä voi syntyä joko uumasauvaan tai hitsiin.



Kuva 20. Uumasauvan myötääminen havainnollistettuna. [10, s. 115.]

Suhdeluvun  $\beta$  ollessa yli 0,85 tulee tarkistaa, miten suurella voimalla liitosta voidaan kuormittaa ennen kuin uumasauva alkaa myötäämään:

$$N_{1,Rd} = \frac{f_{y1} t_1 (2h_1 - 4t_1 + 2b_{eff})}{\gamma_{M5}} \quad (52)$$

missä  $b_{eff}$  on tehollinen leveys. Tehollinen leveys tarkoittaa sitä, miten iso osa diagonaalisauvan leveydestä osallistuu liitoksen aksiaalisten voimien välittämiseen. Nelinkertaisen seinämänpaksuuden ( $4t_1$ ) vähentäminen perustuu siihen, ettei liitoksen voimakestävyyden laskennassa huomioida diagonaalisauvan kulmia kahdesti. Tehollinen leveys lasketaan seuraavasti:

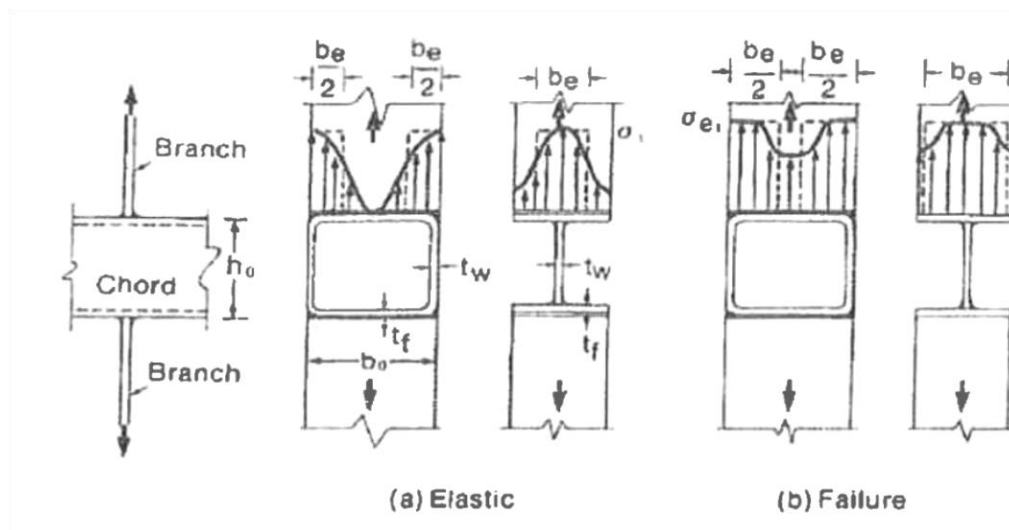
$$b_{eff} = \frac{10}{b_0/t_{0,f}} * \frac{f_{y0} t_{0,f}}{f_{y1} t_1} * b_1 \leq b_1 \quad (53)$$

Kuten kaavaa tutkimalla voidaan havaita, ei uumasauvan tehollisen leveyden arvo voi olla suurempi kuin mitä uumasauvan profiilin leveys on. Liitoskestävyyttä voidaan parantaa myös WQ-yläpaarteen alalaipan paksuutta lisäämällä tai käyttämällä metallista vahvistelevyä alalaipan pinnassa. Kuitenkin paksu alalaippa antaa tehollisen leveyden arvoksi yli-isoja tuloksia. Tämä johtuu siitä, että kaava on määritetty rakenneputkesta tehdyn paarteen pinnan myötäämistä ajatellen. Vaihtoehtoisesti uumasauva voidaan



vaihtaa isompiin profiiliin, käyttämällä paksumpiseinäistä uumasauvaa tai käyttämällä lujempaa teräslajia. [1, s. 637; 10, s. 130; 12, s. 105.]

Mainittakoon, että tämä kaava pohjautuu kansainvälisen putkirakenteiden kehitys- ja koulutuskomitea CIDECT'n (Comité International pour le Développement et l'Etude de la Construction Tubulaire) tutkijan Rolloos:n vuonna 1969 tekemiin laippaliitostutkimuksiin ja saman organisaation tutkijan Jaap Wardenierin vuonna 1981 suorittamiin täydennystutkimuksiin. Tutkimuksissa testattiin rakenneputkeen ja I-profiiliin hitsatun lattateräksen avulla, miten jännitykset jakautuvat kimmoisella ja plastisoituneella alueella. Koejärjestelyjä on havainnollistettu kuvassa 21. Kuvassa a näkyy kimmoisen alueen jännitykset, jotka ovat korkeimmillaan uumien kohdalla. Kuvassa b näkyy plastisoituneen rakenteen jännitys jakauma, jossa jännitys kohdistuu merkittävässä määrin myös laipoille. [15, s. 35.]

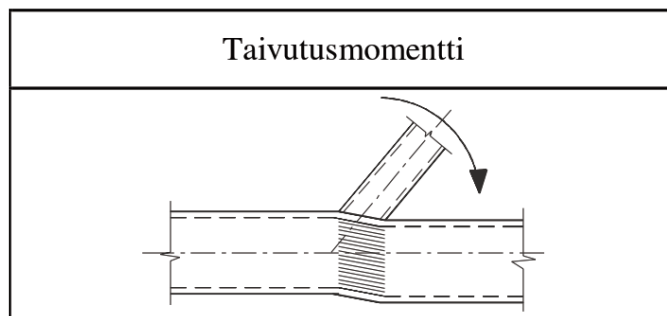


Kuva 21. Tutkimuksissa käytettiin rakenneputkeen hitsattua kahta lattaterästä, joita kumpaakin vedettiin eri suuntiin. [15, s. 35.]

Tutkimusten perusteella päädyttiin käyttämään yhtälössä kerrointa 10 korjaamaan tehollisen leveyden tulosta, jotta laippaliitokseen ei kohdistu äkillisen vaurion vaaraa. Kuten kaavasta 45 voidaan todeta, tutkimustulokset on varmistettu tapauksille, jossa paarteen korkeus on vähintään puolet ja enintään kaksinkertainen sen omaan leveyteen nähden [15, s. 37.]

### 5.2.3 Murtumismuodon lineaarinen interpolointi

Mikäli suhdeluku  $\beta$ :n arvo on yli 0,85 mutta alle 1, tulee käyttää lineaarista interpolointia ristikkoliitoksen murtumistavan selvittämiseksi. Interpolointi tapahtuu paarteen pinnan myötäämisen ja seuraavista pienimmän arvon antavan välillä: yläpaarteen uuman myötääminen/lommahtaminen tai paarteen leikkautuminen. Y-liitoksen mukaista paarteen leikkautumista on havainnollistettu kuvassa 22, missä se aiheutuu vedetyn sauvan aikaansaaman taivutusmomentin vaikutuksesta.



Kuva 22. Paarteen leikkausmurtuminen Y-liitoksessa. [10, s. 115.]

Paarteen leikkautumisen osalta on tarkistettava liitoksen kestävyys suurimmalle diagonaalisauvan normaalivoimalle sekä paarteen normaalivoimakestävyys liitoksen vapaa välillä, jonka poikkileikkauksesta on vähennetty leikkausvoiman välittämiseen osallistuvien uumien osuus. Teräslitoseurokoodia tutkimalla voidaan havaita, että paarteen leikkauskestävyyden mitoitusarvoa ei käsitellä Y-liitoksessa, vaan leikkausmurtumisen on katsottu kuuluvan K- ja N-liitoksen riskeiksi ristikkoliitoksen geometrian perusteella. [10, s. 131.]

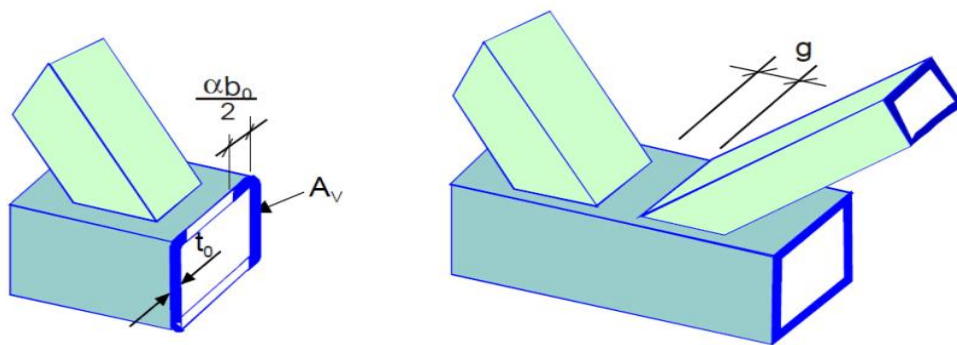
Liitoksen suurimman vetovoiman kestävyys tarkistetaan seuraavasti:

$$N_{1,Rd} = \frac{f_{y0} A_{v0}}{\sqrt{3} \sin \theta_1 \gamma_{M5}} \quad (54)$$

missä paarteen leikkauspinta-ala  $A_{v0}$  laskettaisiin rakenneputken tapauksessa seuraavasti:

$$A_{v0} = (2h_0 + \alpha b_0)t_0 \quad (55)$$

Kaavassa 55 esiintyvä termi  $\alpha$  on laskentaparametri, jonka suuruus riippuu rakenneputkea käytettäessä vapaavälin  $g$  ja alapaarteen seinämän  $t_0$  suhteesta. Tällä otetaan pie-nehkön rakenneputkipoikkileikkauksen tapauksessa huomioon laipan osallistuminen leikkausvoiman välittämiseen, missä uumien välit ovat pienet eivätkä uumat itsessään riitä leikkausvoiman välitykseen. Nyt kuitenkin huomataan, että kaava olettaa paarteen seinämänpaksuuksien olevan samanlaisia molemmin puolin. Tämä voidaan todeta tutkimalla kuvaa 23, missä vasemmalla on esitetty puoliksi katkaistu vapaavälinen K-liitos. Vapaavälinen liitos esitetään kuvassa oikealla määritelmän ymmärtämisen helpottamiseksi. [1, s. 639; 10, s. 131. 12, s. 106.]



Kuva 23. Alkuperäinen rakenneputkelle tarkoitettu paarteen leikkauspinta-alan  $A_{v0}$  määritelmä. [12, s. 123.]

Nyt kaavaa voidaan soveltaa WQ-paarteen tapauksessa seuraavasti:

$$A_{v0} = 2 * (h - t_{f1} - t_{f2}) * t_{0,w} \quad (56)$$

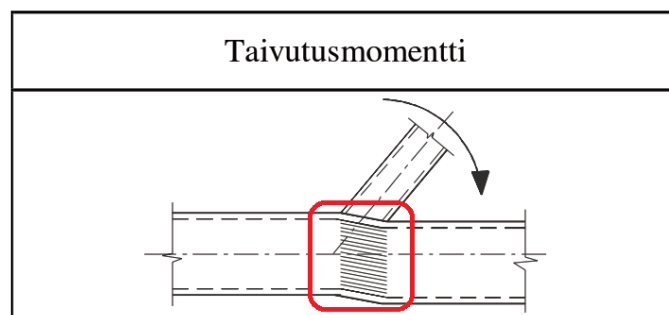
missä:

$t_{0,w}$  on WQ-yläpaarteen uuman paksuus

$t_{0,f}$  on yläpaarteen alalaipan paksuus.

On syytä huomioida, että tämä on varmalla puolella oleva oletus, missä ajatellaan vain WQ-profiilin uumien osallistuvan leikkausvoiman välittämiseen. Samalla tässä oletuksessa jätetään pois mahdollinen laipan osuus leikkausvoiman välittämisestä, sillä laipan huomioiminen olisi tutkimustiedon puutteessa liitoksen kestävyyskannalta merkittävä epävarmuustekijä. Tässä liitostyyppissä lasketaan siis enimmäisvoima, mikä uumasauvasta voi enimmillään kohdistua paarteeseen, ennen kuin parre taipuu leikkausvoiman vaikutuksesta alas.

Lisäksi paarteen leikkautumisen osalta tulee tarkastaa, ettei parre murru leikkausvoiman ja normaalivoiman yhteisvaikutuksesta. Havainnollistetaan tätä Y-liitoksen osalta korostamalla kuvassa 24 tätä murtumisaluetta punaisella viivalla.



Kuva 24. Paarteen leikkausmurtuminen leikkausvoiman ja normaalivoiman yhteisvaikutuksesta. [10, s. 115.]

Yläpaarteeseen kohdistuvan normaalivoiman suuruus lasketaan seuraavasti:

$$N_{0,gap.Ed} = |N_{0.Ed}| - N_{1.Ed} * \cos(\theta_2) \quad (57)$$

WQ-yläpaarteen normaalivoimakestävyys lasketaan seuraavasti:

$$N_{0,gap.Rd} = \frac{(A_0 - A_{v0})f_{y0} + A_{v0}f_{y0} \sqrt{1 - \left(\frac{V_{0,gap.Ed}}{V_{pl0.Rd}}\right)^2}}{\gamma_{M5}} \quad (58)$$

missä:

$A_0$  on WQ-yläpaarteen kokonaispinta-ala

$A_{v0}$  on yläpaarteen leikkauspinta-ala

$V_{0.gap.Ed}$  on yläpaarteeseen vedetystä diagonaalisauvasta kohdistuva leikkausvoima va-paavälin kohdalla:

$$V_{0.gap.Ed} = |N_{1.Ed} * \sin(\theta_1)| \quad (59)$$

Kaavassa huomioidaan, ettei koko poikkileikkaus osallistu normaalivoiman välitykseen poikkileikkauksessa vaikuttavan leikkausvoiman takia vaan ainoastaan osa siitä. [1, s. 639; 10, s. 131; 12, s. 106.]

Yläpaarteen leikkausvoimankestävyys lasketaan eurokoodin SFS-EN 1993-1-1 kohdan 6.2.6. mukaisesti:

$$V_{pl.0.Rd} = \frac{f_{y0} A_{v0}}{\sqrt{3} \gamma_{M5}} \quad (60)$$

Vertailemalla leikkausvoimankestävyyden kaavaa uumasauvan paarteen leikkautumis-kestävyyden kaavaan voidaan havaita, että kummatkin kaavat perustuvat aiemmin mainittuun von Mises'n myötöehtoon. Tämä johtuu yhtälöissä esiintyvistä luvusta  $\sqrt{3}$ . Tätä myötöehtoa käsitellään tarkemmin käyttörajatilatarkastelujen yhteydessä. [1, s. 639; 5, s. 54]

Tämän jälkeen suoritetaan lineaarinen interpolointi arvojen välillä seuraavasti:

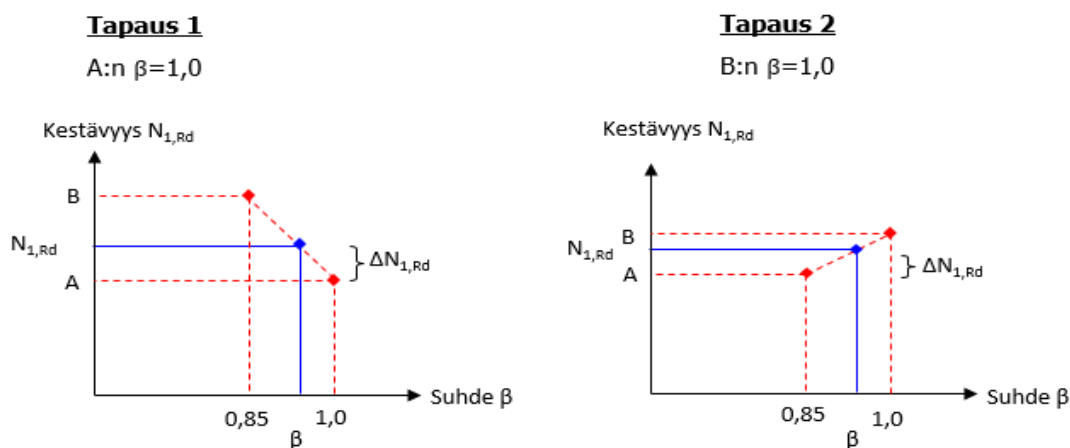
$$A = \min(N_{1.Rd.paarteenmyötö}; N_{1.Rd.leikkautuminen}; N_{0.gap.Rd}) \quad (61)$$

$$B = \max(N_{1.Rd.paarteenmyötö}; N_{1.Rd.leikkautuminen}; N_{0.gap.Rd}) \quad (62)$$

$$\text{Tapaus 1: } N_{1.Rd} = A + \Delta N_{1.Rd} = A + \frac{(B-A)(1-\beta)}{1-0,85}, \text{ kun } A: n \beta = 1,0 \quad (63)$$

$$\text{Tapaus 2: } N_{1.Rd} = A + \Delta N_{1.Rd} = A + \frac{(B-A)(\beta-0,85)}{1-0,85}, \text{ kun } B: n \beta = 1,0 \quad (64)$$

A:n arvoksi valitaan pienin liitoksen kestävyysarvo ja B:n arvoksi suurin liitoksen kestävyysarvo. Erona liitoskestävyysskaavojen 63 ja 64 välillä on, että kaavan 63 mukainen uumasauvan liitoskestävyys tarkistetaan silloin, kun ehtoalinnan A:n beeta-arvo  $\beta$  on 1,0. Kaavassa 64 interpolointi liitoksen kestävyydelle suoritetaan tapauksessa, jossa ehtoalinta B:n beeta-arvo  $\beta$  on 1,0. Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 25.

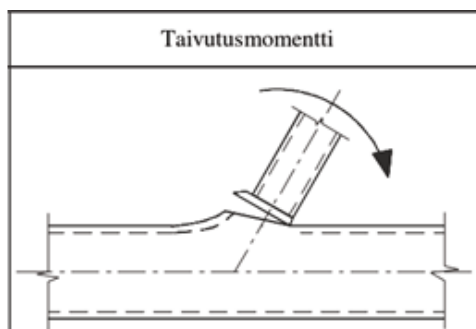


Kuva 25. Diagonaalisauvan leveyden suhteen ollessa välillä 0,85–1,0 liitoksen kestävyysarvo interpoloidaan lineaarisesti. [16.]

Saatava tulos ottaa huomioon sen tosiasian, että nyt liitoksen murtumistapa ei ole niin selkeä ja että liitoksen murtumismuoto voi olla paarteiden pinnan myötämisen ja uuman välillä. Vaihtoehtoisesti murtumismuoto voi olla uumasauva voi leikkautua yläpaarteesta irti tai WQ-profiili ei kestä normaalivoiman ja leikkausvoiman yhteisvaikutusta. Murtumismuodosta riippuen tulee joko alalaippaa tai WQ-profiilin seiniä vahvistaa aiemmissä luvuissa mainituin keinoin. Vahvistuslevyn tapauksessa on huomioitava, että liitoksen laskeutustapa muuttuu riippuen siitä, mihin kohtaan liitosta vahvistuslevy asennetaan.

#### 5.2.4 Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen

Paarteen pinnan lävistysleikkautumisessa hitseihin tai diagonaalisauvoihin voi syntyä säröjä, jotka aiheuttavat diagonaalisauvan irtoamisen WQ-paarteesta. Paarteen pinnan lävistysleikkautumista Y-liitoksen tapauksessa on havainnollistettu kuvassa 26.



Kuva 26. Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen havainnollistettuna. [10, s. 115.]

Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen tulee tarkistaa, jos seuraava ehto toteutuu:

$$0,85 \leq \beta \leq 1 - \frac{1}{\gamma} \quad (65)$$

Kaavassa esiintyvä nimittäjä  $\gamma$  lasketaan seuraavasti:

$$\gamma = \frac{b_0}{2t_{0,f}} \quad (66)$$

missä:

$b_0$  on WQ-yläpaarteen suorakaiteen muotoisen osan leveys

$t_{0,f}$  on WQ-profiilin alalaipan paksuus. Kyseessä on siis suhdeluku, joka on WQ-paarteen puolikkaan suorakaiteen leveyden suhde sen alalaipan paksuuteen. Mikäli uumasauvan leveyden suhde paarteeseen on kaavan 65 mukaisella välillä, tulee tarkistaa liitoksen kestävyys paarteen lävistysleikkautumista vastaan seuraavasti:

$$N_{1.Rd} = \frac{\frac{f_{y0}t_0}{\sqrt{3}\sin\theta_1} \left( \frac{2h_1}{\sin\theta_1} + 2b_{e.p} \right)}{\gamma_{M5}} \quad (67)$$

missä tekijä  $b_{e.p}$  on uumasauvan tehollinen leveys. Tehollisella leveydellä tarkoitetaan liitokseen toimintaan osallistuvan diagonaalisauvan leveyden osuutta. [1; s. 637, 10, s. 130.]

Tekijä  $b_{e.p}$  lasketaan seuraavasti:

$$b_{e.p} = \frac{10}{b_0/t_{0,f}} b_1 \leq b_1 \quad (68)$$

missä  $t_{0,f}$  on alalaipan paksuus. [1, s. 637; 10, s. 130.]

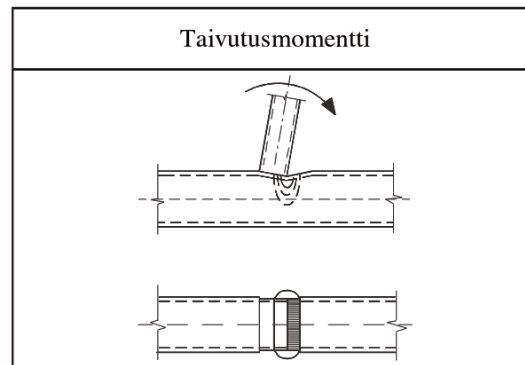
Kaavan perässä oleva rajoitus  $b_1$  tarkoittaa, että uumasauvan poikkileikkauksen leveydestä voi vaikuttaa liitoksessa enintään koko poikkileikkauksen leveys tai osa siitä. Arvo ei saa siis ylittyä, koska tällöin tulos ei olisi validi eikä liitoslaskelma olisi pätevä.

Kun liitoskestävyydet on laskettu, suoritetaan interpolointi. Mikäli liitos ei kestä, on kiinnitettävä huomiota sen murtotapaan. Tällöin ratkaisuna voi olla murtotavasta riippuen joko WQ-paarten alalaipan tai uuman vahvikelevyllä vahvistaminen. Vahvikelevyn osalta tulee muistaa lamellirepeilyn riski, mikäli levyn paksuus on yli 25 millimetriä. Vahvistettu Y-liitos on esitelty tarkemmin teräslitoseurokoodissa SFS-EN 1993-1-8 vaatimuksineen. Huomionarvoista on, että tällöin liitoskestävyysyhtälöiden laskentaperiaatteet muuttuvat ja uumasauvan leveyttä verrataan paarten leveyden sijasta vahvikelevyn leveyteen. [1, s. 668–671; 10, s. 137.]



### 5.2.5 WQ-yläpaarteen uuman lommahtaminen tai myötääminen

Rakenneputkesta tehdyn paarteen uuman lommahtamista tai myötäämistä on havainnollistettu kuvassa 27. Kuten kuvasta voidaan havaita, Y-liitoksessa tämä murtuminen tapahtuu taivutusmomentin vaikutuksesta.



Kuva 27. Havainnollistus paarteen uuman lommahtamisesta tai myötäämisestä. [10, s. 115.]

Mikäli diagonaalisauva on yhtä leveä kuin parresauva, on suhdeluku  $\beta$  tällöin 1. Nyt liitoskestävyyttä rajoittavana tekijänä on paarteen uuman lommahtaminen tai myötääminen. Yläpaarrelitoksen kestävyys paarteen uuman lommahtamista tai myötäämistä vastaan tarkistetaan tällöin seuraavalla tavalla:

$$N_{1.Rd} = \frac{f_b t_{0.w} \left( \frac{2h_1}{\sin\theta_1} + 10t_0 \right)}{\gamma_{M5}} \quad (69)$$

missä  $t_{0.w}$  on yläpaarteen uuman paksuus. [1, s. 637; 10, s. 130.]

Paarteen uuman nurjahduslujuus  $f_b$  lasketaan seuraavasti:

$$f_b = \chi f_{y0} \quad (70)$$

Kaavassa esiintyvä  $\chi$  on WQ-paarteen uuman nurjahduksen pienennyskerroin, joka lasketaan seuraavasti:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} \quad (71)$$

missä esiintyvä laskentaparametri  $\Phi$  lasketaan seuraavasti:

$$\Phi = 0,5 \left[ 1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] \quad (72)$$

WQ-profiilin uuman nurjahduskäyrä määritetään hitsattuna koteloprofiilin rajaehtojen mukaisesti. Nurjahduskäyränä käytetään  $c$ :tä. WQ-yläpaarteen uuman hoikkuus määritetään seuraavasti:

$$\lambda = 3,46 \frac{\left(\frac{h_0}{t_{0,w}} - 2\right) \sqrt{\frac{1}{\sin\theta_1}}}{\pi \sqrt{\frac{E}{fy_0}}} \quad (73)$$

missä:

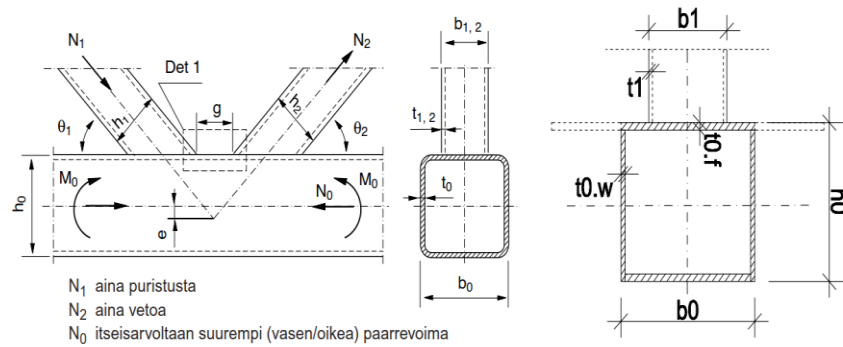
$h_0$  on WQ-profiilin korkeus

$t_{0,w}$  on WQ-paarteen uuman paksuus. [1, s. 637; 10, s. 130.]

Yläpaarteen uuman nurjahduserkkyyttä voidaan vähentää käyttämällä matalampaa koteloprofiilia, paksumpaa uumaa, lujempaa teräslajia ja/tai muuttamalla diagonaalisauvan liittymäkulmaa. Vaihtoehtoisesti WQ-profiilin kylkeen voidaan asentaa metallinen vahvistuslevy. Tällöin Y-liitoksen laskentatapa muuttuu. [1, s. 670-671; 10, s. 138.]

### 5.3 Vahvistamaton vapaavälinen K-liitos

Vapaavälistä K-liitosta käytetään ristikon keskiosassa. Tässä liitostyyppissä diagonaalisauvat kiinnitetään yläpaarteeseen siten, että ne ovat tietyn etäisyyden sisällä toisistaan. Liitoksen nimi johtuu sen K-kirjainta muistuttavasta muodosta. WQ-ristikon liitosparametrien soveltamista alun perin rakenneputkille laadituille liitosyhtälöille on havainnollistettu kuvassa 28. Kuvassa sauva N1 on aina puristettu ja N2 aina vedetty. Paarteessa vaikuttava normaalivoima N0 on suurempi liitoksen joko oikealla tai vasemmalla puolella vaikuttavista voimista.



Kuva 28. Vapaavälinen K-liitos havainnollistettuna. Oikeanpuoleisin kuva: Mikko Kähkönen. [1, s. 638.]

Liitos käsitellään eurokoodin mukaan vapaavälisenä K-liitoksena, kun kaikki seuraavat kolme ehtoa täyttyvät:

$$g \geq t_1 + t_2 \quad (74)$$

$$\frac{g}{b_0} \geq 0,5(1 - \beta) \quad (75)$$

$$\frac{g}{b_0} \leq 1,5(1 - \beta) \quad (76)$$

missä:

$g$  on liitoksen vapaaväli

$b_0$  on WQ-paarteen suorakaiteen muotoisen osan leveys.

Mikäli kaavassa 74 esitetty ehto täytyy mutta kaavan 76 ehto ei täyty, on diagonaalien sauvojen välinen etäisyys liian suuri ja tällöin liitosta käsitellään kahtena erillisenä Y-liitoksena. Lisäksi kaavan 74 ehdolla tarkistetaan, että vapaaväli ei ole liian pieni, jotta uumasauvat pystytään hitsaamaan paarteeseen luotettavasti kiinni. [1, s. 639; 10, s. 127.]

Lisäksi tulee tarkistaa teräslitoseurokoodissa SFS-EN 1993-1-8 vapaaväliselle K-liitokselle asetetut hitsausliitosten pätevyysrajat. Näiden tulee täytyä, jotta voidaan

varmistua, että liitoksen hitsaukset toimivat luotettavasti. Pätevyysrajat ovat suorakaiteen ja neliön muotoisille uumasauvoille seuraavanlaiset:

$$\frac{b_i}{b_0} \geq 0,35 \quad (77)$$

$$\frac{b_i}{b_0} \geq 0,1 + 0,01 * \frac{b_0}{t_{0,f}} \quad (78)$$

$$0,5 \leq \frac{h_i}{b_i} \leq 2,0 \quad (79)$$

$$\frac{b_i}{t_i} \leq 35 \quad (80)$$

$$\frac{h_i}{t_i} \leq 35 \quad (81)$$

missä  $t_{0,f}$  on WQ-paarteen alalaipan paksuus.

Edellä asetetut ehdot siis tarkistavat, että uumasauvan ja parresauvan leveyksien suhde on vähintään 35 % ja että ne täyttävät myös toisen uumasauvan ja parresauvan suhteelle asetetun vaatimuksen. Voidaan havaita, että tämä vaatimus on 10 prosenttiyksikköä Y-liitokselle asetettua vastaavaa vaatimusta isompi. Lisäksi erona Y-liitokseen on kaavan 78 mukainen tarkistusehto. Paarteelle asetetut hitsausliitosten pätevyysrajat ovat samat kuin Y-liitoksessa esitetyt kaavat 43–45. Poikkileikkausluokkavaatimukset eivät eroa Y-liitoksen vaatimuksista. [1, s. 639; 10, s. 127.]

Vapaavälisen K-liitoksen osalta kerroin  $\beta$  lasketaan seuraavalla tavalla:

$$\beta = \frac{b_1+b_2+h_1+h_2}{4b_0} \quad (82)$$

$b_0$  on WQ-paarteen suorakaiteen muotoisen osan leveys. [1, s. 639; 10, s. 17.]

Termi  $\beta$  huomioi liitoksessa olevien uumasauvojen leveydet ja korkeudet, joiden summasta muodostetaan suhdeluvun aritmeettinen keskiarvo jakamalla summa yhtä monella yläpaarteen leveyden mitalla. Tätä laskentaparametria tarvitaan vapaavälisen K-

liitoksen osalta vain yhden liitoskestävyyden tarkistamisen rajaehtona. Tämän perusteella voidaan havaita, ettei liitoksen murtumismuoto ole niin helposti pääteltävissä uumasauvan ja paarresauvan leveyksien suhdeluvun avulla. Tämän seurauksena joudutaan tarkistamaan ristikkoliitoksen eri murtumismuodot, joista pienimmän kestävyys antava on määräävä.

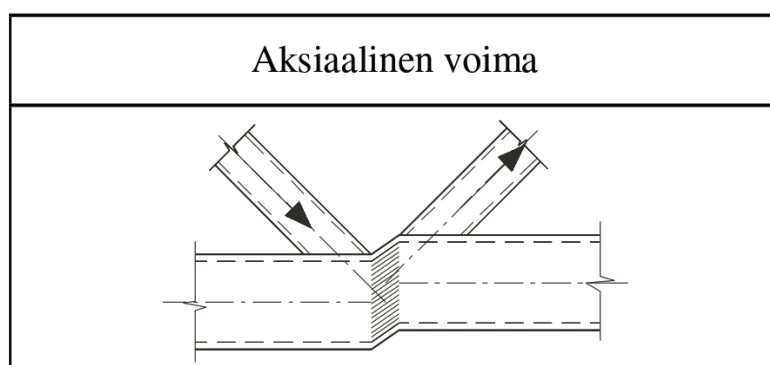
Vapaavälisen K-liitoksen mahdolliset murtumismuodot ovat:

- Paarteen leikkautuminen
- Paarteen pinnan myötääminen
- Uumasauvan myötääminen
- Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen tietyin ehdoin.

Paarteen leikkautumisessa tarkistetaan diagonaalisauvan kestävyys paarteesta leikkautumiselle. Tähän vaikuttaa merkittävästi diagonaalisauvan liittymiskulma.

### 5.3.1 WQ-yläpaarteen leikkausmurtuminen

Vapaavälisessä K-liitoksessa paarteen leikkausmurtuminen voi tapahtua joko diagonaalisauvojen aksiaalisten voimien vaikutuksesta tai WQ-yläpaarteen normaalivoimakestävyyden pettäessä. Tätä leikkausmurtumisilmiötä on havainnollistettu kuvassa 29.



Kuva 29. Vapaavälisen K-liitoksen paarteen leikkausmurtuminen tapahtuu aksiaalisten voimien vaikutuksesta. [10, s. 115.]

Vapaavälisessä K-liitoksessa tarkistetaan kaksi asiaa. Ensimmäisenä tarkistetaan, miten suuri aksiaalinen voima liitokseen voi diagonaalisauvalta kohdistua, ennen kuin paarre leikkausmurtuu. Tämän jälkeen tarkistetaan, mikä on suurin normaalivoima minkä WQ-profiili kestää, kun siihen samanaikaisesti kohdistuu leikkausvoimaa.

Liitoksen aksiaalisen voiman kestävyys tarkistetaan seuraavasti:

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} A_{v0}}{\sqrt{3} \sin \theta_i \gamma_{M5}} \quad (83)$$

Voidaan havaita, että loivassa kulmassa (esimerkiksi 35 astetta) liittyvän sauvan leikkauskestävyys on parempi kuin jos sauva liittyisi esimerkiksi 70 asteen kulmassa. Kestävyydet tarkistetaan molemmille sauvoille erikseen, mikäli niiden profiili ja/tai liittymiskulma ovat erilaiset. Kaavassa esiintyvä leikkauspinta-alan termi  $A_{v0}$  tulisi laskea eurokoodin mukaan rakenneputkelle seuraavan kaavan mukaisesti:

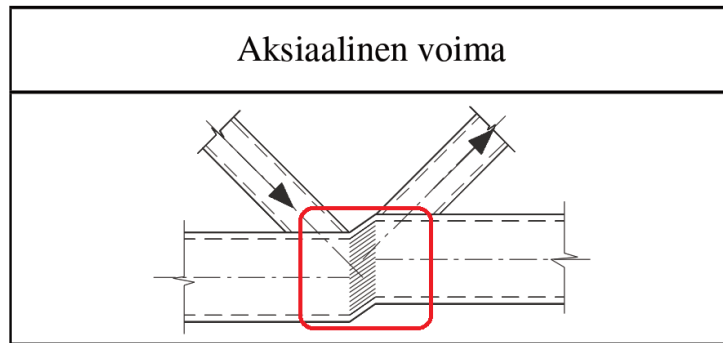
$$A_{v0} = (2h_0 + ab_0)t_0 \quad (84)$$

Kuten aiemmin todettiin, ei ole olemassa tutkimustuloksia, jolla voitaisiin todistaa WQ-profiilin alalaipasta minkään osan osallistuvan välittämiseen. Tähän varmalla puolella olevana ratkaisuna on olettaa vain uumien vastustavan paarteen leikkausmurtumista:

$$A_{v0} = 2 * (h - t_{f1} - t_{f2}) * t_{0,w} \quad (85)$$

missä  $t_{0,w}$  on WQ-profiilin uuman paksuus.

Tämän lisäksi tulee tarkistaa myös yläpaarteen normaalivoiman kestävyys liitoksen vapaavälillä sille puristetulta diagonaalisauvalta tulevan leikkausvoiman ja normaalivoiman yhteisvaikutukselle. Ehdolla siis tarkistetaan, ettei paarre taivu alaspäin vapaavälin kohdalla näiden voimien yhteisvaikutuksesta. Tätä ilmiötä on korostettu kuvassa 30 punaisella viivalla.



Kuva 30. Paarteen leikkasmurtuminen normaalivoiman ja leikkausvoiman vaikutuksesta. [10, s. 115.]

Koska osa yläpaarteen poikkileikkauksesta osallistuu leikkausvoiman välittämiseen, tulee jäljelle jäävän poikkileikkauksen välittää siinä vaikuttava aksiaalinen voima. K-liitoksen vapaavälillä vaikuttavan normaalivoiman suuruus lasketaan seuraavasti:

$$N_{0, gap.Ed} = |N_{0.Ed}| - N_{2.Ed} * \cos(\theta_2) \quad (86)$$

Kaavassa huomioidaan vedetyn diagonaalisauvan paarteen normaalivoimaa vähentävä vaikutus. Vaikka tässä esitetyt termit ovat samat kuin Y-liitosta käsittelevässä luvussa esitetyssä kaavassa 57, ovat kuitenkin vaikuttavan normaalivoiman ja vedetyn diagonaalisauvan voimat suuruudeltaan erilaiset vapaavälisessä K-liitoksessa. Voimien suuruudet riippuvat tarkasteltavasta liitoksesta. Paarteen normaalivoimakestävyys tarkistetaan seuraavasti:

$$N_{0, gap.Rd} = \frac{(A_0 - A_{v0})f_{y0} + A_{v0}f_{y0} \sqrt{1 - \left(\frac{V_{0, gap.Ed}}{V_{pl,0.Rd}}\right)^2}}{\gamma_{M5}} \quad (87)$$

missä esiintyvä termi  $V_{0, gap.Ed}$  lasketaan aiemmin esitellyn kaavan 59 mukaisesti, kuitenkin huomioiden, että liitokseen kohdistuvat voimat riippuvat tarkasteltavasta liitoskohdasta. Kyseessä on paarteen vapaavälin kohdalla vaikuttava leikkausvoima. [1, s. 180 ja 639; 10, s. 131; 12, s. 106.]

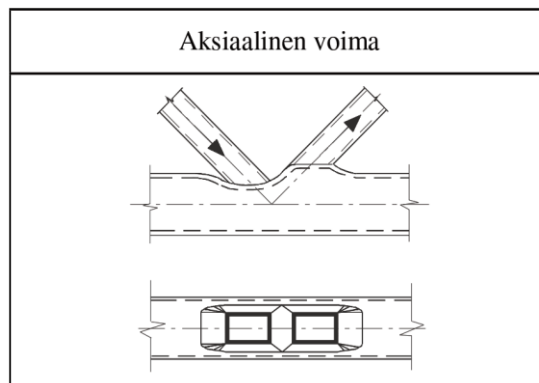
Leikkausvoimakestävyys lasketaan eurokoodin SFS-EN 1993-1-1 kohdan 6.2.6. mukaisesti:

$$V_{pl.0.Rd} = \frac{f_{y0} A_{v0}}{\sqrt{3} \gamma_{M5}} \quad (88)$$

missä  $A_{v0}$  lasketaan WQ-profiilin tapauksessa kaavan 85 mukaisesti. Mikäli yläpaarteen kapasiteetti ei tässä murtumismuodossa riitä, voidaan profiilin kylkiin asentaa sen kestävyttä parantavat metalliset vahvistelevyt. Vaihtoehtoisesti profiilin uumaa voidaan paksuntaa. [5, s. 54.]

### 5.3.2 Yläpaarteen pinnan myötääminen vapaavälisessä K-liitoksessa

Vapaavälisen K-liitoksen yläpaarteen pinnan myötäämistä on havainnollistettu kuvassa 31, missä se voi tapahtua diagonaalisauvojen aksiaalisten voimien vaikutuksesta.



Kuva 31. Paarteen pinnan myötääminen havainnollistettuna. [10, s. 115.]

Koska vapaavälisessä K-liitoksessa ei voida liitoksen murtumismuotoa päätellä pelkästään uumasauvan ja parresauvan leveyden suhdeluvun perusteella, tulee tarkistaa myös, kuinka suuri normaalivoima liitoksessa voi vaikuttaa ennen kuin paarteen pinta alkaa myötäämään seuraavalla tavalla:

$$N_{i.Rd} = \frac{8,9\sqrt{\gamma} k_n f_{y0} t_{0.f}^2}{\sin\theta_i} * \beta \quad (89)$$

Missä  $t_{0.f}$  on WQ-paarteen alalaipan paksuus. [1, s. 639; 10, s. 131.]

Kerroin  $\gamma$  lasketaan seuraavasti:



$$\gamma = \frac{b_0}{2t_{0,f}} \quad (90)$$

Kyseessä on WQ-profiilin suorakaiteen puolikkaan leveyden suhde alalaipan paksuuteen. Tästä voidaan päätellä, että liitoksen kestävyyttä saadaan parannettua tämän kertoimen osalta kasvattamalla paarteiden leveyttä suhteessa alalaipan paksuuteen.

Kaavassa esiintyvä liitoksen kestävyuden pienennyskerroin  $k_n$  lasketaan puristetulle yläpaarteelle seuraavasti:

$$k_n = 1,3 - \frac{0,4|n|}{\beta} \leq 1,0 \quad (91)$$

Kaavassa oleva rajoitus 1,0 tarkoittaa, että pienennyskerroin ei voi suurentaa liitoksen kestävyyttä vaan se voi olla arvoltansa enintään 1. Edellä mainitussa tilanteessa ei tällöin liitoksen kestävyuden pienennystä tosin tapahdu. [1, s. 639; 10, s. 129.]

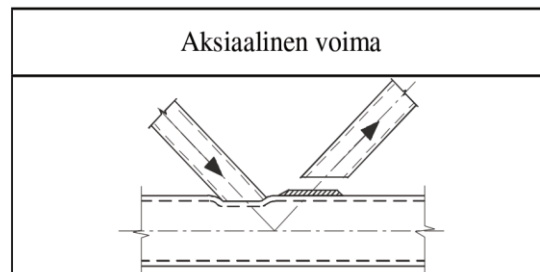
Liitoksessa esiintyvä termi  $n$  lasketaan seuraavasti:

$$n = \frac{N_{0,Ed}}{A_0 f_{y0} / \gamma_{M5}} + \frac{M_{0,Ed}}{W_{el,0} f_{y0} / \gamma_{M5}} \quad (92)$$

Missä  $W_{el,0}$  on WQ-paarteiden kimmoteorian mukainen puhtaan taivutuksen mukaan laskettu taivutusvastus. Tämän laskeminen on esitelty aiemmin Y-liitoksen mitoitusta käsittelevässä luvussa. Jos liitos ei kestä, on diagonaalisauvan liitoskestävyyttä mahdollista parantaa asentamalla sauva loivemmassa kulmassa tai vaihtoehtoisesti käyttämällä paarteiden pinnassa vahvikelevyä. Vahvistetun liitoksen laskentaa on käsitelty tarkemmin teräslitoseurokoodissa. Liitoksen pienemmän kallistuskulman pitää kuitenkin olla vähintään 30 astetta. Jos kallistuskulman vaihtaminen ei riitä, pitää sauvan profiilia vaihtaa isompaan tai WQ-profiilin paarteiden pintaa vahvistaa metallilevyllä. [1, s. 639 ja 672-673; 10, s. 112 ja 138.]

### 5.3.3 Uumasauvojen myötääminen

Uumasauvojen myötäämistä vapaavälisessä K-liitoksessa on havainnollistettu kuvassa 32. Kuten aiemmin todettiin, tässä murtumismuodossa joko hitsiin tai uumasauvoihin voi syntyä säröjä.



Kuva 32. Uumasauvojen myötäämistä havainnollistava kuva. [10, s. 115.]

Liitoksen kestävyys osalta on määritettävä myös, kuinka suuri normaalivoima liitokseen voi kohdistua ennen kuin uumasauvat alkavat myötäämään. K-liitoksen kestävyys tätä ilmiötä vastaan määritetään seuraavasti:

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{yi}t_i(2h_i - 4t_i + b_i + b_{eff})}{\gamma_{M5}} \quad (93)$$

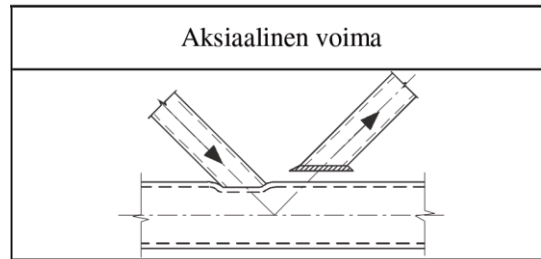
Kaavassa esiintyvä kerroin  $b_{eff}$  lasketaan seuraavasti:

$$b_{eff} = \frac{10}{b_0/t_{0,f}} * \frac{f_{y0}t_{0,f}}{f_{yi}t_i} * b_i \leq b_i \quad (94)$$

Laskentatapa on siis sama kuin Y-liitoksessa. Jos liitoksessa on profiililtaan kaksi erilaista sauvaa, tarkistetaan liitoksen kestävyys molemmille sauvoille erikseen. Näistä pienimmän kestävyys antava tulos on samalla liitoksen kestävyys uumasauvojen myötäämistä vastaan. Jos uumasauva ei kestä sille tulevia kuormia, pitää diagonaalisauvan profiili vaihtaa joko paksuseinäisemmäksi tai profiililtaan isommaksi. Kolmas vaihtoehto on käyttää lujemman teräslajin diagonaalisauvaa. [1, s. 639; 10, s. 131.]

### 5.3.4 Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen

Paarteen pinnan lävistymisleikkautumisen murtumismuotoa vapaavälisen K-liitoksen tapauksessa on havainnollistettu kuvassa 33.



Kuva 33. Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen vapaavälisessä K-liitoksessa. [10, s. 115.]

Vapaavälisessä K-liitoksessa täytyy tarkistaa lisäksi neljäntenä mahdollisena murtumismuotona liitoksen kestävyys paarteen pinnan lävistysleikkautumista vastaan, jos seuraava ristikon sivusuhteelle asetettu ehto täyttyy:

$$\beta \leq 1 - \frac{1}{\gamma} \quad (95)$$

missä  $\gamma$  on paarteen pinnan myötäämisen murtumisehdon yhteydessä laskettu termi. Mikäli ehto täyttyy, liitoksessa voi tapahtua paarteen pinnan myötääminen tai vaihtoehtoisesti lävistysleikkautuminen, kun uumasauvat ovat riittävän kapeita paarteen leveyteen nähden. Ehdon toteutuessa tarkistetaan liitoksen kestävyys paarteen pinnan lävistysleikkautumista vastaan seuraavasti:

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} t_{0,f} \left( \frac{2h_i}{\sqrt{3} \sin \theta_i} + b_i + b_{e,p} \right)}{\gamma_{M5}} \quad (96)$$

missä  $t_{0,f}$  on WQ-profiilin alalaipan paksuus. Voidaankin siis todeta, että WQ-alalaipan paksuudella on merkitystä paarteen pinnan lävistymisleikkautumisen kannalta. Vaikka paksuhkon alalaipan osalta lävistysleikkautuminen ei ole riskinä, on tällöin vaarana lisääntynyt lamellirepeilyn riski. Vaara johtuu hitsausten kohtisuorista vetovoimista alalaipan pintaan nähden. [1, s. 639; 10, s. 131.]

Paarteen pinnan lävistymisleikkautumisen kaavassa esiintyvä uumasauvan tehollisen leveyden ilmaiseva termi  $b_{e,p}$  lasketaan seuraavasti:

$$b_{e,p} = \frac{10}{b_0/t_{0,f}} b_i \leq b_i \quad (97)$$

missä  $t_{0,f}$  on lävistymisleikkautumisilmiössä vaikuttavan WQ-profiilin alalaipan paksuus. [1, s. 639; 10, s. 131.]

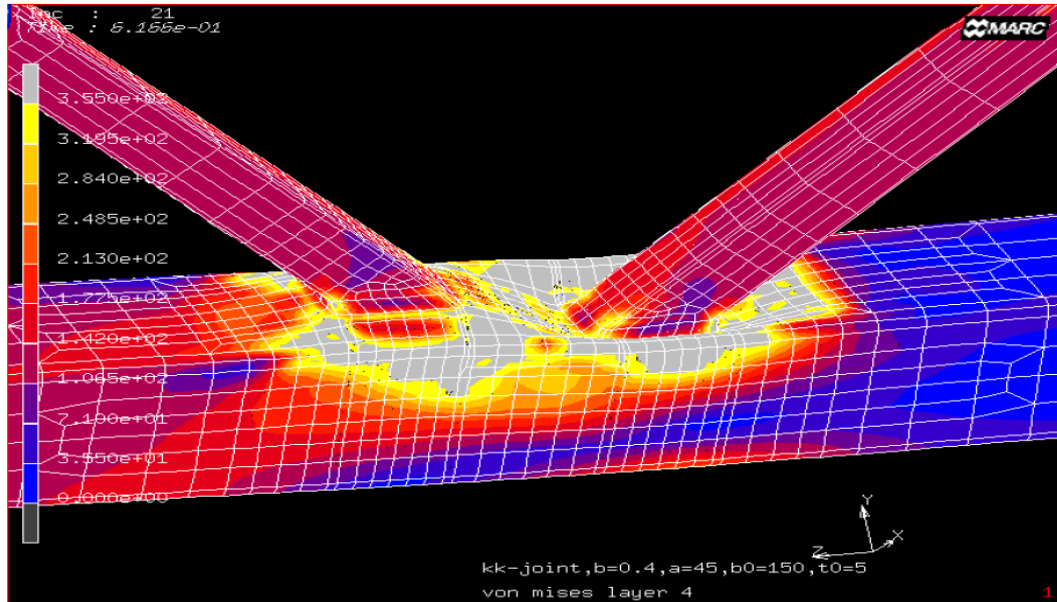
Vertailemalla Y- ja vapaavälisen K-liitoksen kaavoja keskenään voidaankin havaita, että murtumismuoto määräytyy kummallakin liitoksella eri tavalla. Murtumisten erilaisuus johtuu siitä, että K-liitoksessa on kaksi diagonaalisauvaa ja Y-liitoksessa vain yksi. Y-liitoksen lävistymisleikkautumisessa huomioidaan uumasauvan tehollinen leveys kaksinkertaisena vaikutuksena, mikä johtuu uumasauvan sijainnista ja kuormituksesta.

Mikäli liitos ei kestä liittymiskulmaa ja/tai diagonaalisauvan profiilia vaihtamisen jälkeen, voidaan sitä vahvistaa asentamalla alalaipan pintaan metallinen vahvistuslevy. Tällöin ristikon paino kasvaa vähemmän WQ-profiilin alalaipan paksuntamiseen nähden. Myös lujemman teräslajin profiilien käyttäminen ristikkoliitoksessa on yksi vaihtoehto. [1, s. 672–673; 10, s. 138.]

Loppukaneettina vapaavälisen K-liitoksen kaavojen osalta todettakoon, että ne perustuvat rakenneputkikomitea CIDECT'n Jaap Wardenierin vuonna 1982 suorittamiin rakenneputkien ristikkoliitostutkimuksiin. Tutkimuksissa liitoksien kestävyudet määritettiin paarteen pinnan plastisoitumisen avulla. Mitään paarteen pinnan taipuman rajoitusehtoa tutkimukset eivät kuitenkaan asettaneet. CIDECT'n vuonna 2010 julkaistussa Hollow Sections in Structural Applications -kirjassa on asetettu liitoskestävyyksien rajaehdoksi paarteen pinnan muodonmuutos saa olla enintään 3 % sen seinämänpaksuudesta. Suositusarvo muodonmuutoksen määrälle on 1 %.

Uudessa kaavasuosituksessa paarteen pinnan myötäämisen liitoskestävyyden tekijän  $8,9\gamma^{0,5}$ :n arvo (kaava 89) on tämän perusteella muutettu  $14\gamma^{0,3}$ :ksi. Lisäksi myös normaalivoiman ja momentin yhteisvaikutuksen laskentaperiaatetta on muutettu samasta syystä. Uudessa laskentatavassa voidaan hyödyntää paarteen pinnan hallittua taipumista edellä mainitun ehdon mukaisesti. Nämä muutokset ovat tämän insinööriyön

kirjoitushetkellä luonteeltaan suosituksia. Paarteen pinnan taipumisen laskenta-analyysia on havainnollistettu kuvassa 34. Kuten kuvasta voidaan havaita, tämä murtumismuoto on mahdollinen ohuen uumasauvan ja leveän, ohutseinäisen paartesauvan liitoksessa. [12, s. 106 ja 110.]



Kuva 34. Paarteen pinnan taipumisen laskenta-analyysi meneillään. [12, s. 127.]

#### 5.4 Neliömuotoisten diagonaalisauvojen erityisehdot

Mikäli ristikkoliitoksen diagonaalisauvat ovat profiililtaan neliön muotoisia ja täyttävät kuvan 35 mukaiset ehdot, riittää, että tarkistetaan liitoksen kestävyyksistä vain uumasauvan murtuminen ja paarteen pinnan murtuminen.

Uumasauva	Liitostyyppi	Liitosparametrit	
Neliön muotoinen rakenneputki	T, Y tai X	$b_1/b_0 \leq 0,85$	$b_0/t_0 \geq 10$
	Vapaavälinen K tai N	$0,6 \leq \frac{b_1 + b_2}{2b_1} \leq 1,3$	$b_0/t_0 \geq 15$

Kuva 35. Mikäli diagonaalisauvoille esitetyt ehdot täyttyvät, riittää että tarkistetaan ristikkoliitoksen kestävyyksistä uumasauvan murtuminen ja paarteen pinnan murtuminen. [10, s. 128.]

Kuvassa esitetyt merkinnät tarkoittavat seuraavaa:

$b_0$  on WQ-profiilin suorakaiteen muotoisen osan leveys

$b_i$  on diagonaalisauvan 1 tai 2 leveys

$b_1$  ja  $b_2$  ovat diagonaalisauvojen 1 ja 2 leveydet.

$t_0$  on tässä yhteydessä WQ-profiilin alalaipan paksuus  $t_{0,f}$ . [10, s. 16–17.]

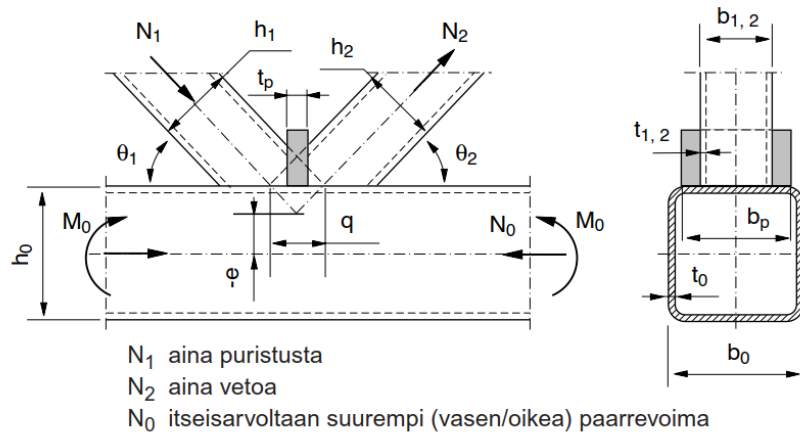
Liitoksen kestävyys tarkistetaan joko yhdelle tai kahdelle diagonaalisauvalle riippuen ristikkoliitostyyppistä. Käytettäessä kahta sauvaa valitaan saaduista tuloksista pienempi diagonaalisauvan normaalivoiman kestävyuden mitoitusarvoksi. [10, s. 128.]

## 5.5 Alapaarteen liitosten mitoitus

WQ-ristikossa voidaan käyttää alapaarteena joko eurokoodin mukaista rakenneputkea tai lattaterästä. Seuraavassa luvussa esitellään rakenneputkesta tehty alapaarre, jonka liitostyyppi on vahvistettu limitetty K-liitos. Lisäksi sitä seuraavassa luvussa esitellään kaksi tutkimusta, joissa tutkittiin lattateräksen käyttöä alapaarteena sekä eurokoodien yhtälöiden paikkansapitävyyttä tälle liitostyypille. Syynä lattateräksen käyttöön on, että sillä halutaan minimoida ristikon alapaarteessa esiintyvää epäkeskeisyyttä ja vähentää ristikon painoa.

### 5.5.1 Vahvistettu limitetty K-liitos, kun alapaarteena rakenneputki

Kun rakenneputkea käytetään alapaarteena, näyttää vahvistettu limitetty K-liitos kuvan 36 mukaiselta.



Kuva 36. Vahvistettu limitetty K-liitos, kun alapaarteena rakenneputki. [1, s. 676.]

Kyseessä on vapaavälisestä K-liitoksesta johdettu ratkaisu, jota käytetään, kun liitos ei kestäisi ilman vahvikelevyä. Toinen syy vahvikelevyn käyttöön on liitoksen epäkeskeisyyden poistaminen, mikä lisää liitoksen kestävyyttä. Vahvistetulle limitetylle liitoksen suorakaiteen ja neliön muotoisille uumasauvoille asetetaan seuraavat hitsausliitosten pätevyysrajat, joista jokaisen tulee täytyä:

$$\frac{b_i}{b_0} \geq 0,25 \quad (98)$$

$$0,5 \leq \frac{h_i}{b_i} \leq 2,0 \quad (99)$$

$$0,75 \leq \frac{b_i}{b_p} \leq 1,0 \quad (100)$$

$$\frac{t_i f_{yi}}{t_p f_{yp}} \leq 1,0 \quad (101)$$

missä:

$b_0$  on rakenneputken leveys

$t_p$  on vahvikelevyn paksuus

$f_{yi}$  on diagonaalisauvan 1 tai 2 myötölujuus, joka voi olla molemmilla samansuuruinen tai erisuuruinen

$f_{yp}$  on vahvikelevyn myötöraja. [1, s. 677; 10, s. 127.]

Kuten kaavoista voidaan siis nähdä, tulee molempien liittyvien diagonaalien sauvojen leveyden suhde paarteeseen olla vähintään 25 %. Kuten Y- ja vapaavälisessä K-liitoksessakin, ei uumasauvan korkeuden ja leveyden suhde saa olla alle puolet eikä yli kaksinkertainen, jotta nurjahduserot eivät olisi liian suuria. Nyt uutena tarkistusehtona on kaava 100, missä diagonaalisauvan leveyden tulee olla vähintään 75 % vahvikelevyn leveydestä ( $b_p$ ) ja se saa olla enintään yhtä leveä kuin vahvikelevy. Tällä varmistetaan, että liitos toimii luotettavasti. Lisäksi kaavalla 101 tarkistetaan, että diagonaalien sauvojen voimakapasiteetti on enintään vahvikelevyn voimakapasiteetin mukainen. Kuten aiemmin todettiin, pitää limitetyssä K-liitoksessa puristetun sauvan kuulua poikkileikkausluokkaan 1. [10, s. 127.]

Paarteelle asetetaan seuraavat ehdot hitsausliitosten pätevyysrajojen suhteen:

$$\frac{b_0}{t_0} \leq 35 \quad (102)$$

$$\frac{h_0}{t_0} \leq 35 \quad (103)$$

$$0,5 \leq \frac{h_0}{t_0} \leq 2,0 \quad (104)$$

Nämä ehdot eivät poikkea yläpaarteen liitoksia käsittelevässä luvussa olevista vaatimuksista. [1, s. 677; 10, s. 127.]

Vahvikelevylle kohdistuu kaksi vaatimusta, joiden tulee täyttyä, että vahvikelevy toimii liitoksen vahvistavana osana:



$$f_{yp} \geq f_{y0} \quad (105)$$

$$t_p \geq 2t_i \quad (106)$$

missä:

$f_{yp}$  on vahvikelevyn myötöraja

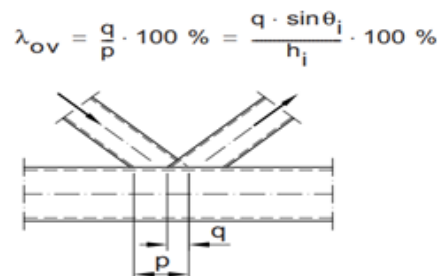
$t_p$  on vahvikelevyn paksuus. [1, s. 677; 10, s. 139.]

Ehdot tarkoittavat, että vahvikelevyn teräslajin tulee olla vähintään samaa tai vahvempaa kuin paarteessa käytettävän teräksen. Tämä on looginen vaatimus, koska kyseessä on liitosta vahvistava osa. Toinen ehto vaatii, että vahvikelevyn tulee olla paksuudeltaan vähintään kaksinkertainen diagonaalisauvan seinämäpaksuuteen nähden, jotta vahvikelevy parantaa liitoksen kestävyttä. Mikäli liitoksessa käytetään profiileiltaan erilaisia diagonaalisauvoja, on isomman profiilin seinämäpaksuus näistä määräävä.

Lisäksi limitysasteen ehto on seuraava:

$$25 \% \leq \lambda_{ov} < 80 \% \quad (107)$$

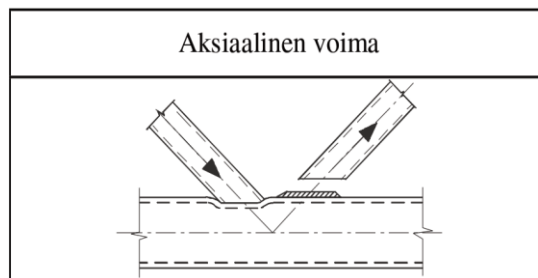
missä  $\lambda_{ov}$  on limitetyn liitoksen limitysaste, jota on havainnollistettu kuvassa 37. Kuvassa esitetty termi  $q$  tarkoittaa limitetyn liitoksen osuutta ja termi  $p$  limittävän sauvan poikki-leikkauksen viisteen pituutta paarteeseen nähden kohtisuorassa suunnassa [1, s. 677; 10, s. 129.]



Kuva 37. Limitetyn liitoksen periaate. [1, s. 634.]

Toisin sanoen on katsottu, että limitetty liitos toimii turvallisesti, jos sen paarteeseen hitsattavaa tartuntapintaa on poikkileikkauksalasta vähintään 25 % ja enintään 79 %. Asetetusta ehdosta voi todeta, että kun kyljen suuntainen sivu on leveysuuntaista sivua pituudeltaan pienempi, ei poikkileikkauksen kylkihitsi ole kovin pitkä. Tämä ehto tarkoittaa diagonaalisauvan kannalta pienempää kapasiteettia paarteesta irti leikkautumista vastaan. Pienempi liitoskestävyys johtuu siitä, että päätyhitsillä on huonompi muodonmuutoskyky kylkihitsiin nähden. Tällöin hitsin murtuminen tapahtuu ennalta varoittamatta hauraasti, mikä on erittäin vaarallista.

Limitetyssä ja vahvistetussa K-liitoksessa liitoksen murtumismuoto on uumasauvan murtuminen myötämällä, mitä on havainnollistettu kuvassa 38. Voidaan havaita, ettei teräslitoseurokoodi SFS-EN 1993-1-8 esitä erillistä vaurioitumiskuvaa tälle liitostyypille. [1, s. 677; 10, s. 129.]



Kuva 38. Uumasauvan murtuminen myötämällä. [10, s. 115.]

Liitoksen kestävyys suurimmalle aksiaaliselle voimalle tarkistetaan liitoksen limitsasteesta riippuen seuraavasti:

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{yi} t_i (b_{eff} + b_{e.ov} + \frac{\lambda_{ov}}{50} * 2h_i - 4t_i)}{\gamma_{M5}}, \text{ kun } 25 \% \leq \lambda_{ov} \leq 50 \% \quad (108)$$

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{yi} t_i (b_{eff} + b_{e.ov} + 2h_i - 4t_i)}{\gamma_{M5}}, \text{ kun } 50 \% \leq \lambda_{ov} < 80 \% \quad (109)$$

missä:

$$\lambda_{ov} = \frac{q_i * \sin \theta_i}{h_i} * 100 \% \quad (110)$$

$$b_{eff} = \frac{10}{b_o/t_o} * \frac{f_{yo}t_o}{f_{yi}t_i} * b_i \leq b_i \quad (111)$$

$$b_{e.ov} = \frac{10}{b_p/t_p} * \frac{f_{yp}t_p}{f_{yi}t_i} * b_i \leq b_i \quad (112)$$

missä:

$\lambda_{ov}$  on limitetyn liitoksen limitsaste

$b_{eff}$  on uumasauvan tehollinen leveys paarteeseen liityttäessä

$b_{e.ov}$  päällä olevan (limittävän) diagonaalisauvan tehollinen leveys, kun se liittyy limitettyyn (alla olevaan) diagonaalisauvaan. [1, s. 677; 10, s. 129 ja 139.]

Mikäli liitokseen kohdistuva voima on tätä suurempi, alkaa uumasauva myötäämään. Mikäli jommankumman tai molempien uumasauvojen korkeus on niiden leveyttä pienempi, tulee lisäksi tarkastaa diagonaalisauvojen paarteesta irti leikkautuminen.

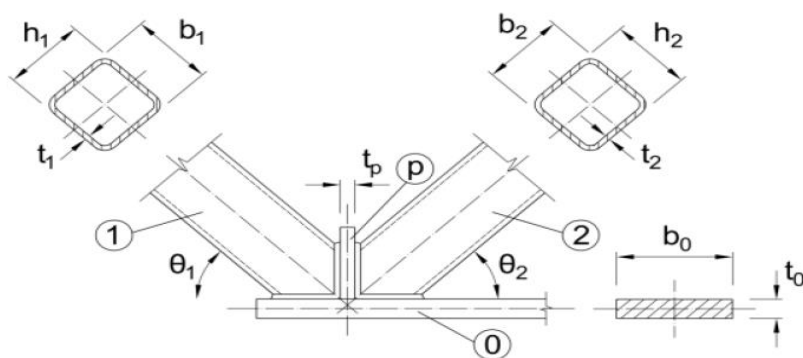
Kuten kaavoja tutkimalla voidaan havaita, limitsaste muuttaa liitoksen kestävyuden tarkistusta jonkin verran. Saatu tulos on diagonaalisauvan 1 tai 2 kestävyys, riippuen kummalle tulos on laskettu. Liitoksen kestävyyttä voidaan parantaa paksuntamalla vahvikelevyä, kunhan huomioidaan paksuhkon vahvikelevyn lamellirepeilyn mahdollisuus. Lisäksi, kuten kaavat  $f_{yi}$  ja  $t_i$  indikoivat, saadaan uumasauvan kestävyyttä limitetyssä liitoksessa parannettua käyttämällä isompaa profiilia ja/tai lujempaa teräslajia. Kuitenkin lujemman teräslajin osalta on huomioitava, että vahvikelevyn teräslajin tulee olla vähintään yhtä luja kuin alapaarteessa käytetyn teräslajin. Ristikon nurkkaliitos toteutetaan samalla periaatteella kuin muissa alapaarteiden liitoksissa, mutta ristikon alapaarteiden ajatellaan jatkuvan lopustaan.

Myös edellä mainittu rajaehto perustuu kansainvälisen rakenneputkirakenteiden kehitys- ja koulutuskomitea CIDECT'n teettämiin tutkimuksiin. Näissä tutkimuksissa havaittiin, että liitoksen limitsasteen ollessa 0 % ja 25 % välillä voi seurauksena olla ristikkoliitoksen ennen aikaista murtumista ja siten heikompaa liitoskestävyyttä. Ristikkoliitos voi murtaa ennen aikaisesti, jos limitetty (paarteeseen kiinnitetty) sauva on limittävää

(paarteeseen ja diagonaalisauvaan kiinnitettyä) sauvaa paljon leveämpi. Tämä murtuminen johtuu näiden muodostaman liitoksen suuremmasta jäykkyydestä verrattuna limitetyn diagonaalisauvan ja paarteen välisen liitoksen jäykkyyteen. [12, s. 107.]

### 5.5.2 Vahvistettu limitetty K-liitos, kun alapaarteena lattateräs

Lattateräs on tyypillisesti 20–60 millimetriä paksu ja 200–250 millimetriä leveä metallilevy. Yleensä lattateräksen paksuutena käytetään 40 millimetriä. Tätä liitostyyppiä on havainnollistettu kuvassa 39. Kuvassa numero 0 tarkoittaa lattaterästä ja 1 sekä 2 tarkoittavat diagonaalisauvoja. Merkintä  $p$  tarkoittaa vahvikelevyä. Kuten kuvasta voidaan havaita, liitoksessa ei esiinny epäkeskeisyyttä, sillä diagonaalisauvojen painopisteakselit leikkaavat lattateräksen painopisteakselilla.



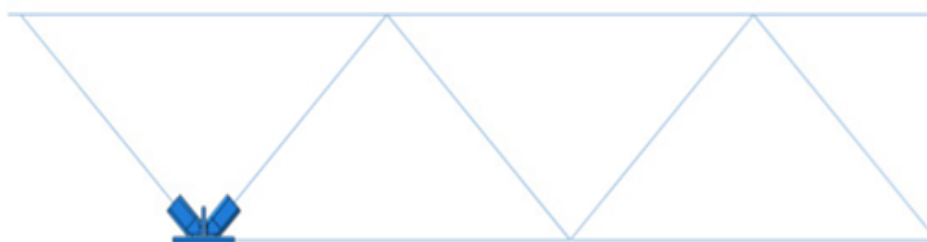
Kuva 39. Lattateräs havainnollistettuna. [17, s. 3.]

Rakenneputkeen nähden lattateräs on rakenteellisesti yksinkertainen. Rakenneputken liitoskestävyyttä alapaarteena rajoittaa puristavan diagonaalisauvan aiheuttama paarteen mahdollinen seinämän myötääminen tai lävistyminen. Tätä ongelmaa lattateräksellä ei ole. Lattateräksen käyttöä WQ-ristikossa puoltaa myös sen edullinen hinta. Toisaalta rakenneputkella on suurempi taivutusjäykkyys. Lattaterästä käytettäessä tilanne muuttuu hivenen mutkikkaammaksi, sillä kuten edellisessä luvussa osoitettiin, eurokoodin liitoskaavoja ei ole laadittu lattateräслиitoksia ajatellen.

Lattateräksisen alapaarrelliitoksen kestävyyttä ovat tutkineet Aalto-yliopistossa Jaak Kadak ja Oulun yliopistossa Anssi Jurmu. Tutkimuksissa selvitettiin laskentamallin avulla, miten sauvojen liittymiskulmat, vahvikelevyn paksuus ja lattateräksen paksuus

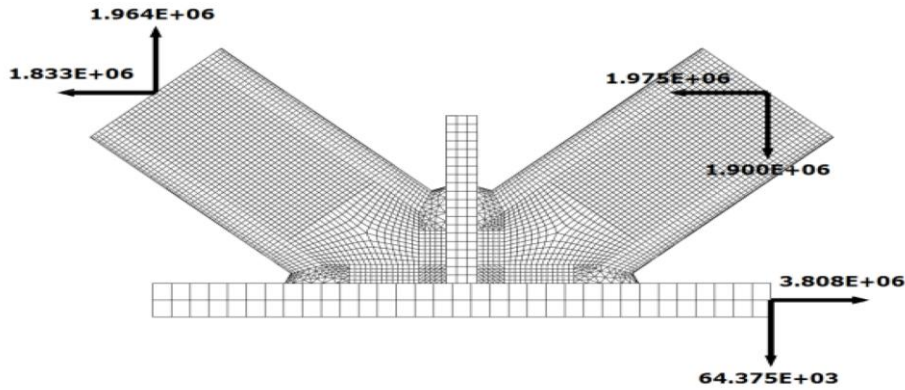
vaikuttavat lattateräksisen liitoksen kestävyys ja miten ne täsmäävät eurokoodin laskentakaavojen antamiin tuloksiin. Jurmu tutki liitoksen kestävyttä käyttäen tutkimuksissaan teräslajeja S355 ja S420, kun taas Kadak käytti teräslajeja S460 ja S550. Syynä lujempien teräslajien käyttöön on, että tällöin on mahdollista päästä kevyempiin ja näin ollen myös taloudellisempiin ratkaisuihin kuin jos käytettäisiin ristikossa teräslajia S355. [15, s. 58; 17, s. 1.]

Anssi Jurmu tutki yhteensä 14:ää eri tapausta ja Jaak Kadak 15:tä eri tapausta. Molemissa tutkimuksissa malli tehtiin siten, että tutkittava rakenne mallinnettiin osarakenteena. Koko WQ-ristikkoa ei siis mallinnettu tarkasti, vaan muu osa ristikosta mallinnettiin sauvarakenteena. Tämän avulla tutkimustyötä saatiin nopeutettua. Muille yksinkertaistetuille osille annettiin profiilin parametrit laskentaa varten. Tätä on havainnollistettu kuvassa 40. [15, s. 66; 17, s. 51.]



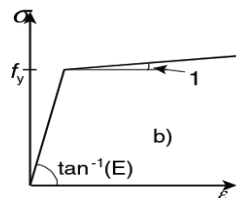
Kuva 40. Jaak Kadakin käyttämä WQ-ristikon tutkimusmalli. [17, s. 29.]

Lattateräksestä laadittua laskentamallia siinä vaikuttavine voimasuureineen on havainnollistettu kuvassa 41. Kuvassa voimat on jaettu vaaka- ja pystysuuntaisiin voimiin. Kuvassa vasen diagonaalisauva on vedetty ja oikeanpuoleinen puristettu. Kuvan lattateräksessä vaikuttaa 64 kilonewtonin suuruinen leikkausvoima sekä 3808 kilonewtonin suuruinen vetävä normaalivoima. Ristikkoliitoksessa vaikuttavan leikkausvoiman vähäisyyden takia Kadak jätti sen huomioimatta analyyseissään, sillä sen suuruus on vain noin 1,7% normaalivoimaan nähden. Liitokseen on mallinnettu myös hitsit. [17, s. 41.]



Kuva 41. Lattateräslitoksen laskentamalli lähtökuormineen. [17, s. 42.]

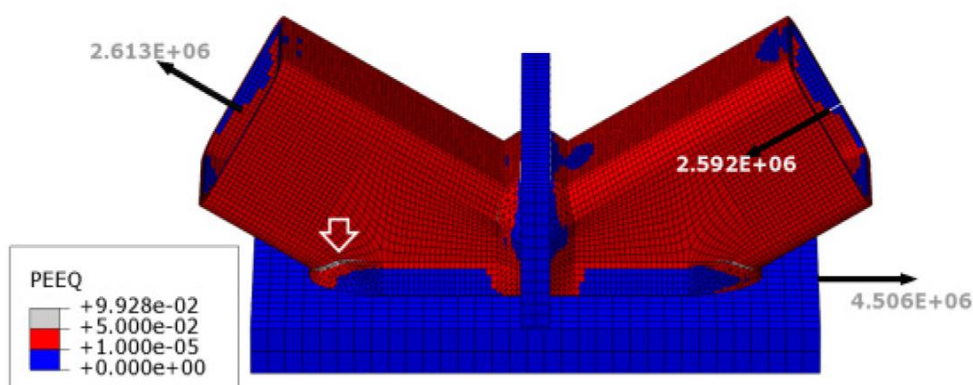
Kummassakin tutkimuksessa käytettiin kimmoplastista materiaalimallia, jossa teräksen käyttäytymistä jännityksen ja venymän suhteen on linearisoitu. Kyseisessä materiaalimallissa jännityksen ja venymän suhde on lineaarinen myötörajaan asti. Tämän jälkeen kulmakerroin muuttuu ja jännitys ja venymä jatkavat kasvuaan, mutta nyt venymiseen tarvitaan suhteellisesti vähemmän työtä. Kimmo-plastista materiaalimallia on havainnollistettu kuvassa 42. Materiaalimallin valinnalla on vaikutusta laskenta-ajan lisäksi saatuihin tuloksiin ja niiden tarkkuuteen. [6, s. 52; 9, s. 3; 15, s. 58; 17, s. 32.]



Kuva 42. Teräslevyrakenteiden eurokoodin SFS-EN 1993-1-5 mukainen kimmoplastinen materiaalimalli. Merkintä b) kuvassa tarkoittaa, että kyseessä on yksi neljästä valittavissa olevista materiaalmalleista. [6, s. 52.]

Liitoksen toimintaa tutkittiin liittämällä rakenneputket liitokseen 30°, 45° ja 60° kulmissa. Alapaarteiden paksuutena käytettiin kummassakin tutkimuksessa 20 mm ja 40 mm. Käytettävien vahvikelevyjen paksuudet olivat 25 millimetriä ja 35 millimetriä, ja kummassakin tutkimuksessa käytettiin uumasauvoina sekä 150x150x10- että 250x150x10 -profiilin rakenneputkia. Lisäksi Jurmu tutki, miten lattateräs kestää pientä 10 millimetrin suuruista epäkeskeisyyttä. [15, s. 66; 17, s. 51.]

Liitoksen murtumiskriteerinä käytettiin levyrakenteita käsittelevän eurokoodin SFS-EN 1993-1-5 FEM-laskelmille opastavaa suhteellista 5 % plastisen myötäämisen raja-arvoa. Laskenta-analyysi keskeytettiin, kun edellä mainittu myötäämisen raja-arvo oli tapahtunut 300–400 mm<sup>2</sup> kokoisella alueella. Tätä on havainnollistettu kuvassa 43, missä venymäraja on ylitetty ensimmäisenä vedetyn sauvan kylkihitsin reunassa. Venymäkohta on merkitty harmaalla ja sen sijaintia on korostettu valkoisella nuolella. [6, s. 53; 15, s. 63; 17, s. 45.]

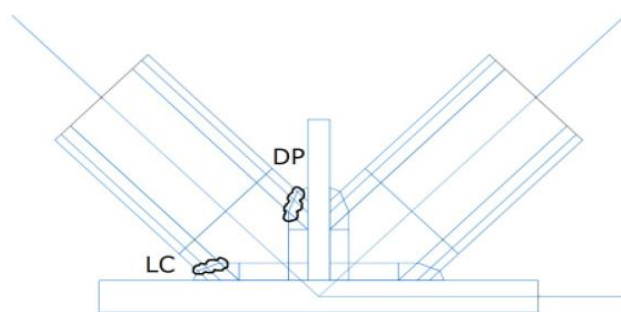


Kuva 43. Eurokoodin SFS-EN 1993-1-5 mukainen ohjeellinen viiden prosentin venymäraja ylittyi ensimmäisenä vedetyn diagonaalisauvan juuressa. [17, s. 53.]

Tutkimuksissa havaittiin, että pienestä 10 millimetrin epäkeskeisyydestä ei ole haittaa liitoksen toiminnalle. Lisäksi huomattiin, että alapaarteen paksuus ja diagonaalisauvan liittymiskulma vaikuttivat liitoksen kestävyys ja samalla myös liitoksen murtumistaan. [15, s. 99.]

Lisäksi tutkimuksissa tehtiin havainto, että käytettäessä 45 asteen liitoskulmaa, 20 millimetrin paksuista lattaterästä sekä 25 millimetrin vahvuista vahvikelevyä saatiin kummankin lattaterästyypin osalta kaikkein pienimmät liitoskestävyydet. Kuitenkin isoimmat liitoskestävyydet saatiin näissä tutkimuksissa käyttämällä 30 asteen liittymiskulmassa olevaa diagonaalisauvaa, 40 millimetrin lattaterästä ja 35 millimetrin paksuista vahvikelevyä. Erot johtuvat siitä, että lattateräksen ollessa ohuempi välittyvät voimat jäykemmän vahvikelevyn kautta osien jäykkyyksien suhteessa. Laskenta-analyysien missään vaiheessa ei havaittu diagonaalisauvan vahvikelevystä irti leikkautumista. [15, s. 101–103.]

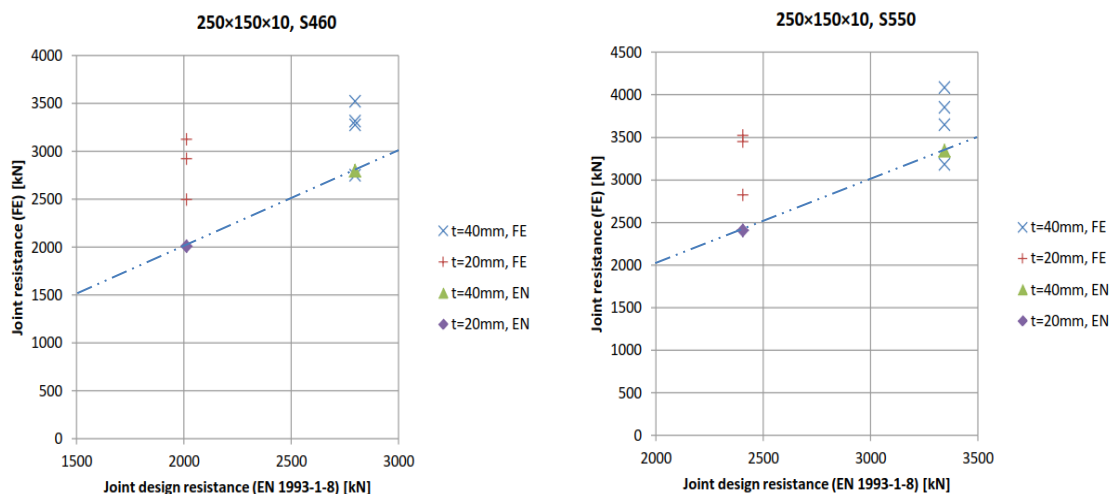
Tutkimuksissa todettiin myös, että käytettäessä teräslajeja S355 ja S420 oli uumasauvan liitoskapasiteetin käyttöaste 70 %–80 %:n välillä eurokoodin yhtälöiden antamiin kaavoihin nähden. Vaihtelu johtuu diagonaalisauvan liittymiskulmasta. Huomioitavaa kuitenkin on, että vahvikelevyllä varustetun limitetyn K-liitoksen tapauksessa eurokoodin kaavat eivät huomioi ollenkaan sauvojen liittymiskulmien vaikutusta liitoksen kestävyysasteeseen. Lisäksi Kadak havaitsi, että liitoksen kestävyysasteen 5 %:n myötöraja-arvo ylittyi ensimmäisenä aina vedetyn sauvan pääty- tai kylkihitsissä. Joissain tapauksissa plastiset venymät syntyivät molemmissa yhtäaikaisesti. Myötörajan ylitymispaikkoja on havainnollistettu kuvassa 44, missä DP tarkoittaa vahvikelevyä (division plate) ja LC lattateräksistä alapaarretta (lower chord). [15, s. 103; 17, s. 80.]



Kuva 44. Lattateräslitoksen murtuminen tapahtui aina vedetyn sauvan pääty- tai kylkihitsissä. [17, s. 80.]

Tutkimuksissaan Jaak Kadak totesi, että käytettäessä lujuusluokkien S460 ja S550 terästä ja 150x150x10-diagonaalisauvoja olivat eurokoodin laskentakaavojen antamat tulokset vielä varmallalla puolella eurokoodin laskentakaavojen antamiin kestävyysasteisiin nähden. Kun tutkimusmallin ristikkoliitoksessa käytettiin teräslajia S460 sekä diagonaalisauvan profiilina 250x150x10 ja 40 millimetrin lattaterästä, Kadak havaitsi, että eurokoodin liitoskaavat yliarvioivat joissain tapauksissa liitoksen kestävyysasteen. Tämä voidaan havaita kuvan 45 vasemmanpuoleisesta kuvaajasta, missä on esitetty tutkimusmallien tulokset. Kuvaajassa tulokset ovat eritelty siten, että rakenneputkiprofiili ja lattateräksen paksuus pysyvät samana mutta diagonaalisauvan liitoskulma sekä vahvikelevyn paksuus vaihtelevat. Sama ilmiö toistui, kun ristikkoliitoksessa käytettiin teräslajia S550. Sen liitoskestävyystulokset on esitetty oikeanpuoleisessa kuvassa, missä tulosten esityspeiraate on sama. [17, s. 81.]





Kuva 45. Käytettäessä diagonaalisauvaprofiilia 250x150x10 ja 40 millimetriä paksua lattaterästä eurokoodi yliarvioi joissain tapauksissa liitoksen kestävyttä. [17, s. 79.]

Tulosten eroavaisuudet johtuvat siitä, että tutkimuksissa vaihdeltiin vahvikelevyn paksuutta sekä diagonaalisauvojen liitoskulmia, jotta tutkimuksissa nähtäisiin, miten paljon saadut tulokset ovat yhteen pitäviä eurokoodin laskentakaavojen kanssa. Eurokoodin antamat yhtenäiset tulokset näille kahdelle lattateräkselle johtuvat siitä, että teräslitoseurokoodi SFS-EN 1993-1-8 ei huomioi lainkaan vahvistetussa ja limitetyssä K-liitoksen laskentakaavoissa diagonaalisauvan liittymiskulmaa. Lisäksi kuvaan on lisätty katkoviiva kuvaamaan liitoskestävyyden kasvua, kun lattaterästä paksunnetaan. [1, s. 677; 10, s. 129; 17, s. 77.]

Näiden tutkimusten osalta todettakoon, että nämä ovat kirjoittajan tietämyksen mukaan kirjoitushetkellä olevat ainoat viralliset tutkimukset tästä ristikkoliitostyyppistä. Näiden luotettavuutta rajoittaa se, että tutkimuksissa käytettiin vain kahta teräsprofiilia. Liitosten tulisi kestää, kun käytetään hyvinkin erilaisia profiileja. Nyt asiaa ei ole kuitenkaan tutkittu kattavasti. Ei voida siis luotettavasti osoittaa, että eurokoodin yhtälöillä voidaan mitoittaa lattateräslitot kaikissa eri tapauksissa.

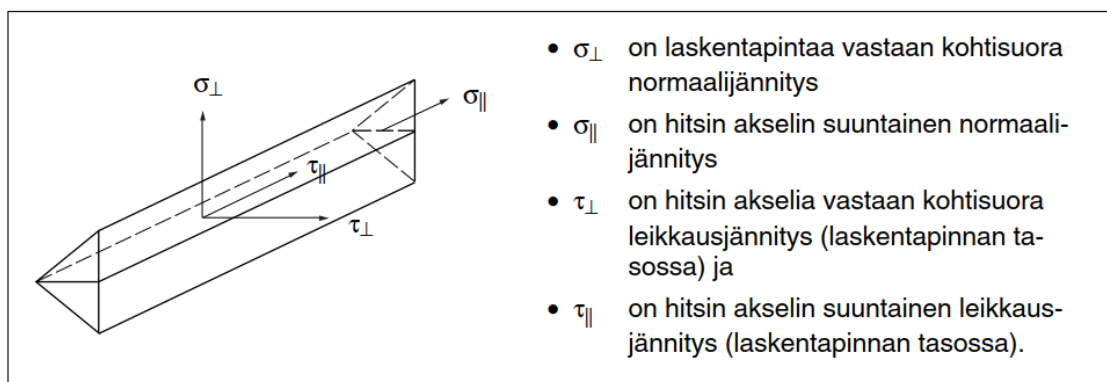
Tämän pohjalta ei voida antaa ohjeistusta WQ-ristikon suunnittelijalle muilta osin kuin, että suhteellisen paksun lattateräksen sekä vahvikelevyn käyttö liitoksessa on suositeltavaa, sillä tällöin liitos pystyy välittämään suurempia voimia. Tämän insinööriyön kirjoittajan ehdottama varoitoimenpide on teräslajien S460 ja S550 tapauksessa ottaa

eurokoodin mukaisesta liitoksen kestävydestä huomioon 90% eurokoodin omien varokertoimien lisäksi, jolloin mahdollisesti vältetään liitosten kestävyden yliarvioinnilta. Tällöin välttytään epätaloudellisilta liitosratkaisuilta. Lattateräksen vaadittu paksuus riippuu mm. liitoksissa vaikuttavista voimasuureista ja diagonaalisauvojen liittymiskulmista.

## 5.6 Hitsausliitokset

Hitsausliitoksen on oltava riittävän kestävä, jotta sillä on riittävä muodonmuutoskyky. Hitsi ei siis saa murtua ennen kuin viereiset rakenneosien materiaalit alkavat myötäämään ja sen tulee sallia epätasaiset jännitysjaakaumat. Kuitenkaan hitsi ei saa olla liian paksu, jotta vältetään teräksen lamellirepeilyn riskiltä. Rakenneputken muotoilukäsittelystä aiheutuvia jäännösjännityksiä ei tarvitse hitsauksen kestävyyttä määriteltäessä ottaa huomioon. Hitsiliitoksiin kohdistuu myös tasalujuusvaatimus. Tällöin käytettävän hitsiaineen on oltava yhtä lujaa kuin liitettävän perusaineen. [1, s. 199; 4, s. 343; 10, s. 117.]

Hitsimitoitus voidaan mitoittaa joko komponenttimenetelmällä, missä hitsiin vaikuttava voima jaetaan eri jännityskomponentteihin. Näitä ovat laskentapintaa vastaan kohtisuora normaalijännitys, hitsin akselin suuntainen normaali- ja leikkausjännitys sekä hitsin akselia vastaan kohtisuora leikkausjännitys. Komponenttimenetelmässä voiman suunta on tunnettava. Komponenttimenetelmää on havainnollistettu kuvassa 46. [1, s. 203.]



Kuva 46. Pienahitsin laskentapinnassa vaikuttavat jännitykset. [1, s. 203.]

Pienahitsin komponenttimenetelmän kaksi mitoitusehtoa ovat seuraavat:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad (113)$$

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{0,9f_u}{\gamma_{M2}} \quad (114)$$

missä

$\beta_w$  on teräksen lujuusluokasta riippuva hitsin lujuuskerroin

$f_u$  on hitsausliitoksen heikoimman liitettävän osan murtolujuus. [1, s. 204; 4, s. 349; 10, s. 46.]

Yksinkertaistetussa menetelmässä oletetaan voiman aiheuttavan hitsin laskentapintaan aina pelkkää leikkausta riippumatta siitä, mistä suunnasta voimaresultantti todellisuudessa vaikuttaa hitsiin nähden. Tällöin tarvittava hitsin paksuus voidaan määrittää seuraavasti:

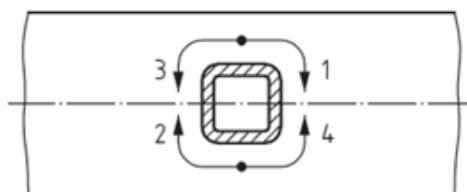
$$a \geq \frac{\sqrt{3} * f_{w.Ed} * \beta_w * \gamma_{M2}}{f_u} \quad (115)$$

Tuloksena on hieman ylimitoitettu hitsi, jonka suuruus riippuu tarkasteltavasta suunnasta.

WQ-ristikon mitoituksessa tulee huomioida, että diagonaalisauvat eivät ole liian lähellä toisiaan ja että niiden asennuskulma on vähintään 30°. Tätä alemmassa kulmassa olevaa diagonaalisauvaa ei välttämättä voida hitsata luotettavasti paikalleen. On myös huomioitava rakennuskohteen toteutusluokan asettamat vaatimukset hitsausluokalle ja sen laadulle. Mikäli liitetään eri lujuusluokan teräksiä toisiinsa, valitaan hitsausaine tällöin yleensä alemman teräslajin mukaan. [1, s. 199; 10, s. 110; 14, s. 47.]

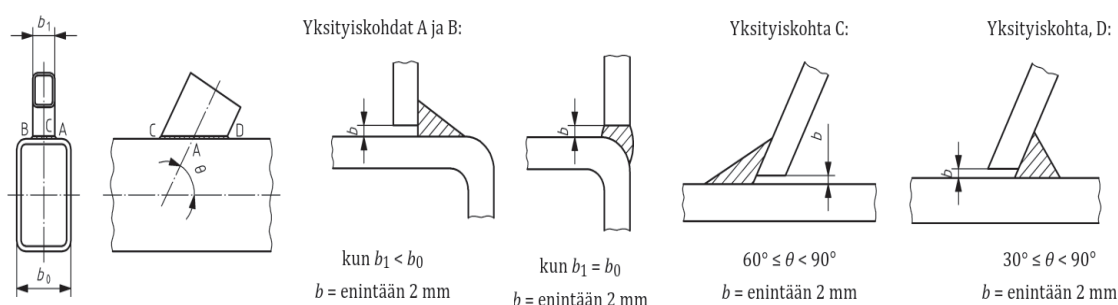
Ristikon liitosten hitsauksessa ja sovituksessa on huomioitava teräsrakenteiden teknistä toteutusta käsittelevän standardin SFS-EN 1090-2 vaatimukset. Diagonaalisauvan ja paarteen välistä liitoksen hitsausta ei saa aloittaa eikä lopettaa liitoskohtien nurkista tai niiden läheisyydestä. Hitsaus aloitetaan kuvan 47 mukaisesti diagonaalisauvan kyljen keskeltä, hitsaten ensin rakenneosan kyljen pituudesta neljäsosa yhdeltä puolelta ja sen

jälkeen neljäosan verran vastakkaiselta puolelta. Sen jälkeen hitsataan samalla periaatteella toinen puoli diagonaalisauvasta kiinni paarteeseen. [14, s. 142.]



Kuva 47. Diagonaalisauvan hitsaaminen kiinni paarteeseen. Pisteet tarkoittavat hitsauksen aloituskohtaa, nuoli osoittaa hitsaussuunnan ja numerot osoittavat hitsausjärjestyksen. [14, s. 142.]

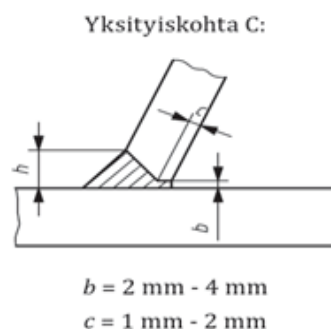
Lisäksi on huomioitava hitsauksen ilmaraon suuruudelle kohdistuva vaatimus. Tätä on havainnollistettu kuvassa 48 merkinnällä  $b$ . Kuten kuvasta voidaan havaita, voi ilmaraon suuruus olla kaikissa tapauksissa enintään 2 millimetriä.



Kuva 48. Liitoksissa voi olla ilmarakoa enintään kahden millimetrin verran. Kuvassa ilmaraoko on merkitty kirjaimella  $b$ . [14, s. 146.]

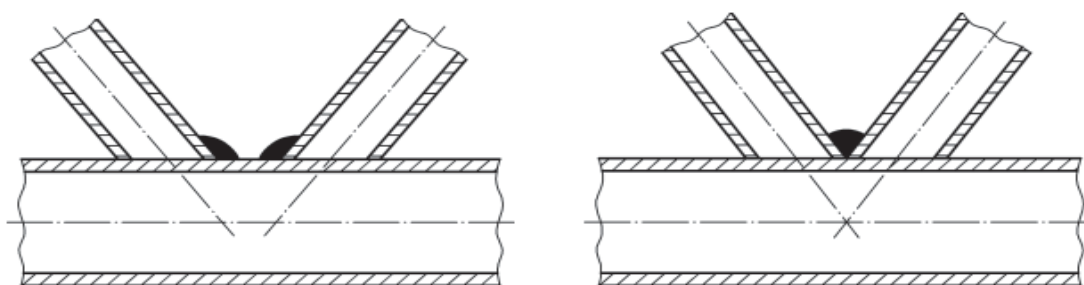
Huomionarvoista yksityiskohdassa C on, että jos diagonaalisauvan liittymäkulma on alle 60 astetta ja sauvan liittymäkulma on hitsistä poispäin, tulee sauva tällöin liittää paarteeseen kuvassa 49 esitetyn päittäishitsin vaatimuksen mukaisesti. Nyt ilmaraon  $b$  on oltava vähintään 2 millimetriä ja enintään 4 millimetriä. Lisäksi liitokselle kohdistuu vaatimus juuripinnan korkeudelle  $c$ , jonka on oltava vähintään 1 millimetriä ja enintään 2 millimetriä. Yksityiskohta D:n ollessa kyseessä, jossa sauvan liittymiskulma on hitsiin nähden sisäänpäin, ei läpihitsautumista vaadita. Ehtona on, että hitsin tehollinen paksuus on riittävä. Tällöin hitsi kestää siihen kohdistuvat voimat. Näillä vaatimuksilla varmistetaan

hitsausliitoksen toimivuus ja että ilmaraon ollessa riittävä pääsevät hitsin kaasut purkautumaan turvallisesti pois rakenteesta hitsaustyön aikana. [14, s. 146.]



Kuva 49. Diagonaalisauvan hitsaus kiinni paarteeseen, kun sauvan liittymiskulma on alle 30 astetta. [14, s. 145.]

Lisäksi standardissa SFS-EN 1090-2 esitetään, miten vapaavälinen K-liitos voidaan toteuttaa. Diagonaalisauvoja ei saa liittää yhteen siten, että niillä olisi yksi yhteinen hitsi sauvojen päiden liittymäkohdassa. Tällöin hitsin pettäessä molempien sauvojen liitökkestävyys heikkenisi merkittävästi. Kuvassa 50 on vasemmalla esitetty sallittu tapa diagonaalisauvojen liitoksen sovitukselle paarteeseen ja oikealla vältettävä tapa. WQ-yläpaarteeseen osalta on huomioitava mahdollisen painopiste akselin poikkeavuuden tuoma liisäepäkeskeisyys liitokseen.



Kuva 50. Kahden uumasauvan paarteeseen sovitus havainnollistettuna. Kuvassa oikealla standardin suosittelema tapa ja vasemmalla vältettävä tapa. [14, s. 147.]

Vahvistetussa ja limitetyssä K-liitoksessa hitsaus suoritetaan siten, että ensin hitsataan vahvikelevy paarteeseen kiinni sen molemmilta puolilta. Tällöin liitoksessa on yhtä lailla huomioitava sen tasalujuus, eli hitsausaineen on oltava lujuudeltaan vähintään samaa

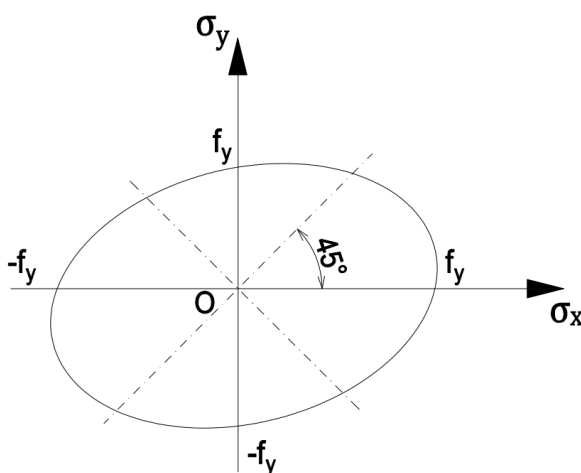
luokkaa heikoimman liitettävän osan kanssa. Tämän jälkeen diagonaalisauvat hitsataan paarteeseen ja vahvikelevyyn kiinni soveltaen kuvan 47 mukaista hitsaustapaa.

## 6 Käyttörajatilatarkastelut WQ-paarteiselle teräsristikkorakenteelle

WQ-yläpaarteisessa teräsristikkorakenteessa tarkistetaan käyttörajatilassa kaksi asiaa: ettei alalaippa ala myötäämään ja että esisuunnitteluvaiheen mukainen ristikon taipuma pysyy sallituissa rajoissa. Alalaipan käyttörajatilatarkasteluissa käytetään von Mises'n myötöehtoa, joka esitellään seuraavaksi.

### 6.1 Von Mises'n myötöehto

Kuten eurokoodin leikkauskestävyyttä ja leikkautumista käsittelevissä kaavoja tarkasteltaessa voitiin havaita, esiintyy kaavassa luku  $\sqrt{3}$ . Edellä esitelty luku on johdettu von Mises'n myötöehdosta, joka huomioi x- ja y-suuntaisen jännityksen ja leikkausjännityksen vaikutuksen rakenteen myötökestävyyteen. Jos raja-arvo ylittyy, teräs alkaa myötäämään. Myötöehdolla varmistetaan teräksen pysyminen kimmoisella alueella. Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 51.



Kuva 51. Von Mises'n myötöehto havainnollistettuna. Jos voimien suuruudet ylittävät teräksen myötölujuuden  $f_y$ , alkaa teräs myötäämään. Kuva: Mikko Kähkönen.

Voidaan todistaa hyvin yksinkertaisesti, että luku  $\sqrt{3}$  perustuu von Mises'n myötöehtoon. Tarkastellaan poikkileikkausta, missä vaikuttaa vain leikkausjännitys. Tarkasteltaessa von Mises'n ehdon mukaista kaksiulotteista jännitystapausta lähtötilanne on siis seuraava:

$$f_y = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x * \sigma_y + 3\tau^2} \quad (116)$$

missä  $\sigma$  kuvaa x- ja y-akselien jännitysten sekä leikkausjännityksen muodostamaa yhteisjännitystä.

Poikkileikkauksessa vaikuttaa siis vain leikkausjännitystä eikä siinä esiinny normaalijännityksiä:

$$\sigma_x = \sigma_y = 0 \quad (117)$$

$$f_y = \sqrt{0^2 + 0^2 - 0 * 0 + 3\tau^2} \quad (118)$$

Kaavassa esiintyvä  $f_y$  kuvaa teräslajin myötörajaa. Kaava supistuu nyt muotoon:

$$f_y = \sqrt{3\tau^2} \quad (119)$$

Ratkaistaan tästä leikkausjännitys:

$$\tau = \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad (120)$$

Yhtälön ratkaisusta voidaan havaita, että kappale kestää puhdasta leikkausjännitystä vain noin 58 % siitä kuin mitä se pystyy vastustamaan myötäämistä. Voidaankin siis todeta, että tämä myötöehto on integroitu hyvin huomaamattomasti osaksi eurokoodin kaavoja. Tätä myötöehtoa käytetään WQ-profiilin alalaipan käyttörajatilajännityksiä tarkastettaessa.

## 6.2 Alalaipan käyttörajatilajännitykset

Kuten aiemmin on todettu, von Mises'n myötöehtoa tarvitaan WQ-profiilin alalaipan poikisuuntaisten jännityksien tarkistamisessa. Tällä tarkistetaan, ettei alalaippaan kohdistuvat jännitykset ole niin suuria, että alalaippa alkaisi myötäämään. Suunnittelussa onkin siis syytä huomioida, että plastisuusteorian mukaan mitoitettu WQ-profiili tulee toimia käyttörajatilassa kimmoisella jännitysalueella. Laippojen käyttörajatilan mukainen tarkistelu suoritetaan seuraavalla kaavalla:

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau^2} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M.ser}} \quad (121)$$

missä:

$\sigma_x$  on taivutuksesta aiheutuva normaalijännitys y-akselin suhteen sekä aksiaalisesta voimasta aiheutuva normaalijännitys x-akselin suhteen. Näiden suurimmat arvot löytyvät ristikon keskivaiheilta.

$\sigma_y$  on poikittaisen taivutuksen aiheuttama normaalijännitys x-akselin suhteen

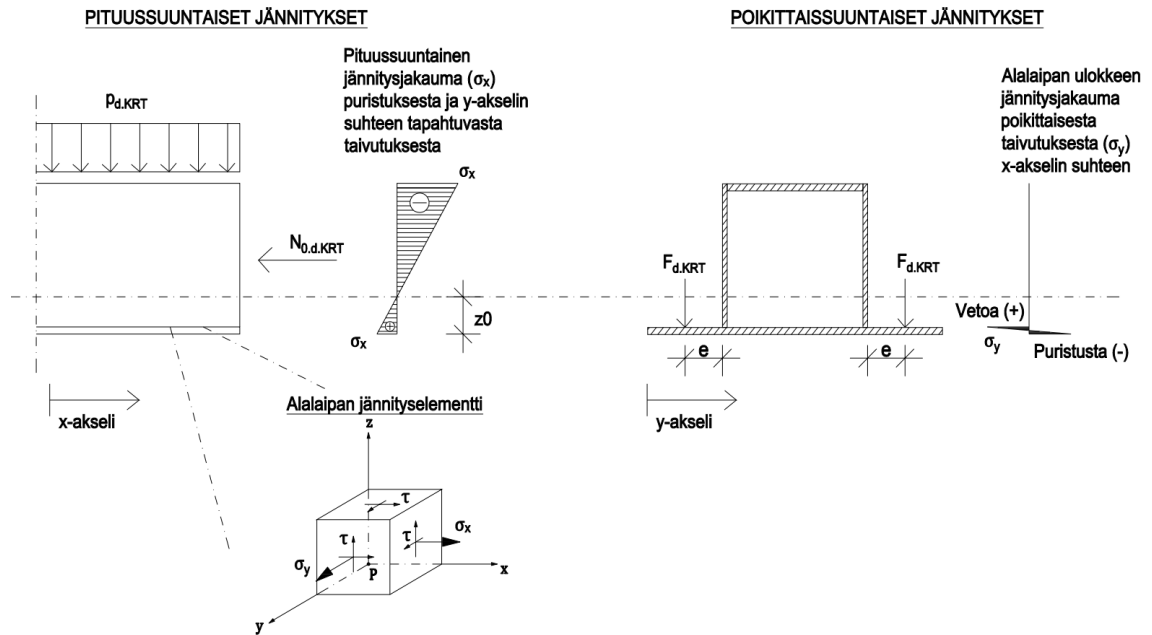
$\tau$  on väännöstä ja leikkausvoimasta aiheutuva leikkausjännitys

$\gamma_{M.ser}$  on kestävyuden osavarmuusluku käyttörajatilassa.

$f_y$  on WQ-profiilin alalaipan myötöraja. [3, s. 22; 4, s. 221.]

WQ-yläpaarten jännitys jakaumia on havainnollistettu kuvassa 52. Kuvassa ei ole esitetty alalaipassa vaikuttavaa leikkausjännitystä sen pienuudesta johtuen.





Kuva 52. Alalaipan käyttörajatilatarkastelu havainnollistettuna. Kuva: Mikko Kähkönen.

Alalaipan poikittaisesta taivutuksesta aiheutuvat jännitykset lasketaan seuraavasti:

$$\sigma_y = \frac{F_{d,KRT} * e}{W_{el}} \quad (\text{alareuna}) \quad (122)$$

$$\sigma_y = -\frac{F_{d,KRT} * e}{W_{el}} \quad (\text{yläreuna}) \quad (123)$$

missä  $F_{d,KRT}$  on käyttörajatilan yhdistelmä palautuville kuormille ja joka yhden metrin matkalla vaikuttavasta ontelolaatan tai kuorilaatan tukireaktiosta:

$$F_{d,KRT} = p_{d,KRT} * 1m = 1,0 * G_{k,sup} + 1,0 * \Psi_{1,1} * Q_{k,1} + 1,0 * \sum \Psi_{2,i} * Q_{k,i} \quad (124)$$

Kyseessä on siis käyttörajatilan mukainen yhdistelmä palautuville kuormille. Tekijä  $e$  on uuman kyljestä mitattu tukireaktion epäkeskeisyys. Sen suuruus riippuu siitä, onko kyseessä ontelolaatta vai kuorilaatta. Näiden laskenta on esitetty aiemmin alalaipan poikittaisen taivutuskestävyyden laskennan yhteydessä.

Alalaipan taivutusvastus lasketaan seuraavasti:

$$W_{el} = 1000 \text{ mm} * \frac{t_{f2}^2}{6} \quad (125)$$

Pituus 1000 millimetriä tulee siitä, että alalaipan taivutusvastusta tutkitaan yhden metrin matkalta. [4, s. 221.]

Poikkileikkauksessa vaikuttava leikkausjännitys lasketaan seuraavasti:

$$\tau = \frac{3}{2} * \frac{F_{d.KRT}}{A_{alalaippa}} \quad (126)$$

missä:

$F_{d.KRT}$  on aiemmin esitetty ontelolaatan tai kuorilaatan sekä hyötykuormien tukireaktio.

$A_{alalaippa}$  on alalaipan pinta-ala 1 metrin matkalta:

$$A_{alalaippa} = 1000\text{mm} * t_{f2} \quad (127)$$

missä  $t_{f2}$  on WQ-profiilin alalaipan paksuus.

Käyttörajatilatarkistuksessa on muistettava, että leikkausjännitys vaikuttaa alalaipan keskellä, ei sen ylä- tai alaosassa. Alalaipan käyttörajatilatarkastelun kriittisin piste sijaitsee ristikon keskimmäisen puristetun sauvan kohdalla. Tässä kohtaa jännitysrasitus on suurimmillaan WQ-profiilin uuman juurella, missä alalaipan jännitykset koostuvat poikittaisen taivutuksen sekä y-akselin suhteen tapahtuvan taivutuksen sekä puristavan diagonaalisauvan aiheuttamasta alapinnan puristusjännityksestä sekä leikkausvoiman ja väännön aiheuttamasta leikkausjännityksestä.

### 6.3 Ristikon taipuma, kun alapaarteena rakenneputki

Suunnittelussa on huomioitava myös ristikon taipuma, joka ei saa ylittää Suomen kansallisessa liitteessä teräsrakenteille asetettuja taipumarajoituksia. Rajoitus on tiukempi välipohjarakenteelle ( $L/400$ ) kuin kattorakenteelle ( $L/300$ ). Mikäli analyysimallia ristikosta ei ole vielä laadittu, voidaan ristikon alustava taipuma arvioida esisuunnitteluvaiheessa. [18, s. 19.]

Ristikon jäyhyysmomentti voidaan laskea likimääräisesti ottamalla huomioon vain pariteiden vaikutus:

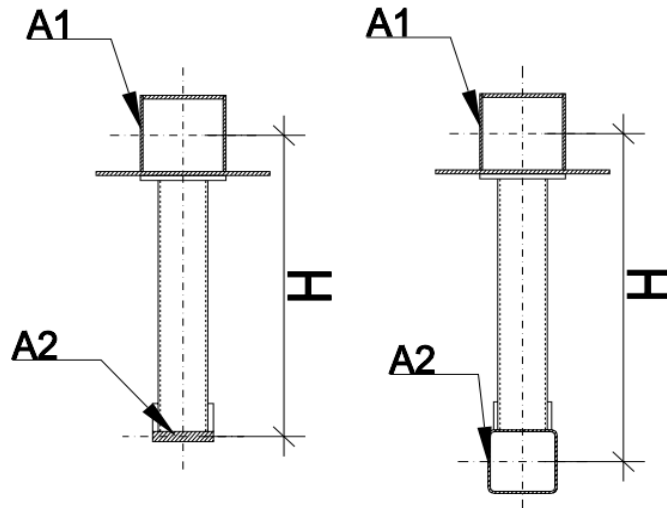
$$I = A_1 H^2 \left[ \frac{\frac{A_2}{A_1}}{1 + \frac{A_2}{A_1}} \right]^2 + A_2 H^2 \left[ \frac{1}{1 + \frac{A_2}{A_1}} \right]^2 \quad (128)$$

missä:

$A_1$  on WQ-yläpaarten koko poikkipinta-ala

$A_2$  on joko rakenneputkesta tai lattateräksestä tehdyn alapaarten koko poikki-pinta-ala

$H$  on yläpaarten ja alapaarten painopisteakseliä välinen etäisyys. Laskentaparametreja on havainnollistettu kuvassa 53, jossa vasemmalla alapaarre on tehty rakenneputkesta ja oikealla lattateräksestä. Kuvassa WQ-profiilin painopisteakseli on keskellä, mutta se voi olla myös alempanakin. Laskettavat pinta-alat on merkitty kuvaan rasteroinnilla. [1, s. 442.]



Kuva 53. Ristikon esisuunnitteluvaiheen taipuman arvioinnissa käytettävät laskentaparametrit havainnollistettuna. Kuva: Mikko Kähkönen.

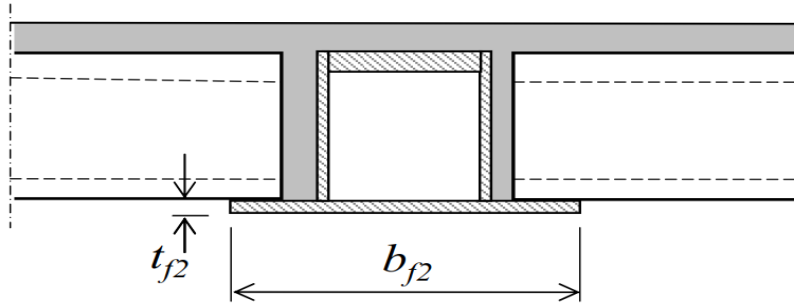
Taipuma lasketaan seuraavasti:

$$\Delta_{max} = \frac{5qL^4}{384EI} \quad (129)$$

Tämän jälkeen tulosta verrataan raja-arvoon ja tarvittaessa profiileja kasvatetaan, jos taipuma ylittyy. Saatua tulos on vain suuntaa antava, sillä ristikkoliitoksien joustamisen vuoksi voi todellinen taipuma vapaavälisillä liitoksilla olla 12–15 % laskettua tulosta suurempi. Tarkat taipuma-arvot ristikolle saadaan laskentamallista. Ristikon taipumaa voidaan vähentää esikorotuksen avulla. [1, s. 442.]

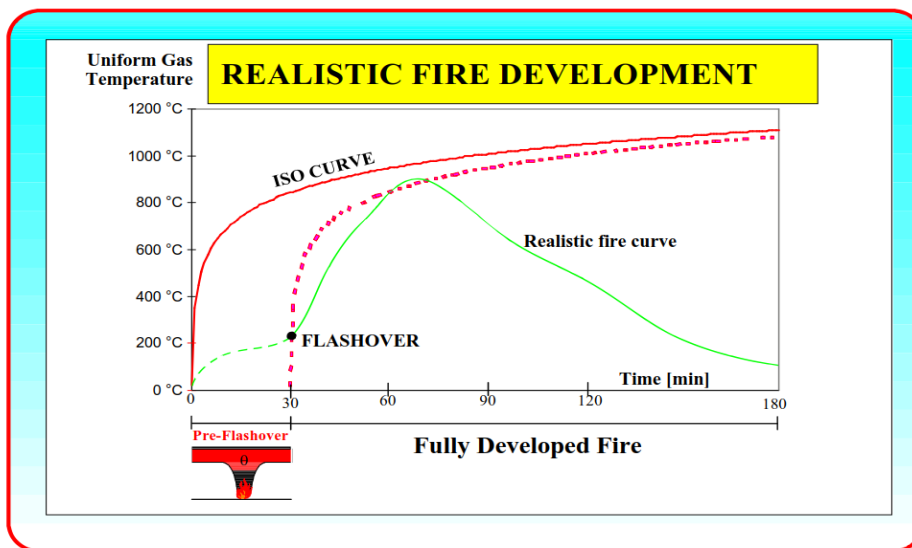
## 7 WQ-profiililla varustetun teräsristikkorakenteen palomitoitus

WQ-ristikkoa palomitoitettaessa tulee huomioida sekä teräksen palomitoitusta käsittelevän standardin SFS-EN 1993-1-2:n asettamat vaatimukset, että Teräsnormikortti 21:n WQ-profiilia koskevat vaatimukset. Teräsnormikortin palomitoituksellinen lähtökohta WQ-profiilille on, että sitä käytetään palkkirakenteena ja vain profiilin alaosa altistuu tulipalolle. Teräsnormikortin mukaista tilannetta on havainnollistettu kuvassa 54. Teräsnormikorttia voidaan käyttää palomitoituksessa, kunhan huomioidaan, että nyt WQ-profiili on teräsristikon yläparre.



Kuva 54. Teräsnormikortti 21:n käsittelemä WQ-paarteen palomitoitustilanne. [3, s. 32.]

Teräksen lämpötilan kehitys määritetään standardipalon yhtälön mukaisesti, joka kuvaa palokaasun lämpötilan nousua ajan funktiona. Yhtälö perustuu ISO 834 -standardiin. Standardipalon mukaisen ja todellisen palotilanteen lämpötilan kehitystä on havainnollistettu kuvassa 55, jossa "ISO CURVE" on standardipalon mukainen palokäyrä. [19, s. 22.]



Kuva 55. Standardipalon kaavalla lasketun palotilanteen ja todellisen tulipalokehityksen välinen ero. [20, s. 5.]

Standardipalon laskentakaava on seuraava:

$$\theta_g(t) = 20 + 345_{\log}(8t + 1) \quad (130)$$

missä:

$\theta_t$  on ajasta riippuvainen kaasun lämpötila palotilassa [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$t$  on palotilanteen kulunut aika. [1, s. 340; 4, s. 479; 20, s. 108; 21, s. 40.]

Kuten kuvaa tutkimalla voidaan havaita, nousee standardipalon lämpötila koko ajan riippumatta siitä, onko kyseisessä palotilassa ylipäättänsä palokuormaa ja väheneekö sen määrä ajan kuluessa. Lisäksi todellinen palo voi olla standardipalon käyrään nähden lievempi tai rankempi. Se ei myöskään ota huomioon palotilan geometriaa, siinä olevia aukkoja tai palotilassa olevan hapen määrää. SFS-EN 1993-1-2 -standardia ei ole tarkoitettu jatkuvasti korkeassa lämpötilassa oleville teräsrakenteille. [19, s. 22 ja 32.]

### 7.1 Palotilanteen kuormat

WQ-ristikon osalta palotilanteen kuormat riippuvat ristikon käyttötarkoituksesta. Jos ristikkoo käytetään välipohjarakenteena esimerkiksi toimistoissa ja kokoontumistiloissa, käytetään tällöin hyötykuormille yhdistelykerrointa  $\psi_{2.1}$ . Mikäli ristikolle tulevat pääasialliset muuttuvat kuormat ovat jää-, lumi ja tuulikuormaa, käytetään yhdistelykerrointa  $\psi_{1.1}$ .

Palotilanteen kuormien pienennyskerroin lasketaan toimisto- ja kokoontumistiloissa seuraavasti:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{2.1} Q_{k.1}}{\gamma_G G_k + \gamma_Q Q_{k.1}} \quad (131)$$

Kattorakenteen palonaikaisten kuormien pienennyskerroin saadaan seuraavalla tavalla:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{1.1} Q_{k.1}}{\gamma_G G_k + \gamma_Q Q_{k.1}} \quad (132)$$

Palotilanteen kuorma saadaan kertomalla normaalilämpötilan tasan jakaantunut ja pistemäinen murtorajatilakuorma kertoimella  $\eta_{fi}$ . [1, s. 353; 4, s. 493; 8, s. 18–19; 20, s. 74.]

## 7.2 Palotilanteen poikkileikkausluokan laskenta

Poikkileikkausluokan palotilanteen mukaisessa määrittäyksessä tulee huomioida teräksen materiaaliominaisuuksien muuttuminen. Palotilanteessa teräksen suhteellinen muodonmuutoskyky laskee, sillä teräksen kimmokerroin muuttuu lämpötilan noustessa. Materiaaliominaisuuksien pienennys suoritetaan seuraavan kaavan mukaisesti:

$$\varepsilon_{fi} = 0,85 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (133)$$

Yhtälöä tutkimalla voidaan havaita, että teräksen suhteellinen muodonmuutoskyky laskee 15 % palotilanteessa. Kyseessä on teräksen palomitoitusta käsittelevän eurokoodin SFS-EN 1991-1-2 sallima yksinkertaistus. Edellä mainitun eurokoodin mukaan korjauskertoimen ottaa huomioon lämpötilan kohoamisen vaikutukset poikkileikkauksen ominaisuuksiin. Otettaessa huomioon kimmokertoimen ja myötörajan vaihtelu voi myös tämän kertoimen mukaan teräsrakenteen poikkileikkaus vaihdella. Edellä mainittu ilmiö mahdollistaisi teräksen lämpötilan noustessa sen kestävyuden hetkellisen kasvun. Tämä ei kuitenkaan pidä paikkaansa, sillä lämpötilan noustessa teräksen myötöraja laskee ja samalla myös sen rakenteellinen kestävyys alenee. [8, s. 27; 19, s. 38.]

## 7.3 Teräksen kriittinen lämpötila palotilanteessa

Käsitteellä kriittinen lämpötila tarkoitetaan lämpötilaa, jossa kuormitusten aiheuttama jännitys on yhtä suuri kuin teräksen tulipalon vaikutuksesta alentunut myötölujuus. Jos teräksen lämpötila ylittää kriittisen lämpötilan, rakenne pettää. Jos sauvan stabiiliutta ei tarvitse ottaa huomioon ja jos otaksutaan lämpötilan jakauman olevan poikkileikkauksessa tasainen, voidaan teräksen kriittinen lämpötila laskea seuraavalla kaavalla:

$$\theta_{a.cr} = 39,19 \ln \left[ \frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 \quad (134)$$

missä  $\mu_0$  on rakenteen hyväksikäyttöaste, joka lasketaan seuraavasti:

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d}} \geq 0,013 \quad (135)$$

Ehdon mukaisesti hyväksikäyttöasteen suuruuden on oltava vähintään 1,3 %. Ehtona tämän menetelmän käytölle on, että rakenteen staattinen malli tukireaktioineen, voimien ja kuormineen pysyy samana koko tulipalon ajan. Kriittistä lämpötilaa laskettaessa on syytä huomioida, että teräsrakenteen tehollinen myötöraja alkaa pienenemään merkittävästi, kun palotilan lämpötila on kohonnut 500 °C:een. Tällöin jäljellä on 78 % teräksen alkuperäisestä myötörajakapasiteetista. Tämän jälkeen teräksen myötöraja laskee nopeasti lämpötilan kohotessa. 1200 °C:ssa teräksen katsotaan sulaneen täysin ja tällöin teräksen myötörajan arvo on 0 N/mm<sup>2</sup>. [1, s. 343 ja 350; 4, s. 482 ja 491; 8, s. 20 ja 34; 20, s. 77.]

#### 7.4 Palolta suojaamattoman teräsrakenteen lämpötilan kehitys

Palolta suojaamattoman teräsrakenteen lämpötilan muutos määritetään seuraavasti:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} * \frac{A_m}{c_a \rho_a} * h_{net,d} * \Delta t \quad (136)$$

missä:

$k_{sh}$  on korjaustekijä varjostusvaikutukselle, joka ottaa huomioon rakenteen geometriasta johtuvan poikkileikkauksen lämpenemisen eroavaisuudet. WQ-ristikon geometriasta ja sijainnista johtuen voidaan arvona käyttää 1,0. Tällöin varjostus ei hidasta poikkileikkauksen lämpötilan nousemista. [1, s. 344; 4, s. 484; 8, s. 35; 20, s. 86.]

$A_m/V$  on suojaamattoman WQ-paarteen tai rakenneputken tai lattateräksen poikkileikkaustekijä ja se määritetään seuraavasti:

$$\frac{A_{m.wq}}{V_{wq}} = \frac{b_{f2} + 2t_{f2}}{b_{f2} * t_{f2} * 1m} \quad (137)$$

$$\frac{A_{m.rp}}{V_{rp}} = \frac{A_u}{A_{rp} * 1m} \quad (138)$$

$$\frac{A_{m.lt}}{V_{lt}} = \frac{2 * b_{lt} + 2 * h_{lt}}{b_{lt} * h_{lt} * 1m} \quad (139)$$



missä:

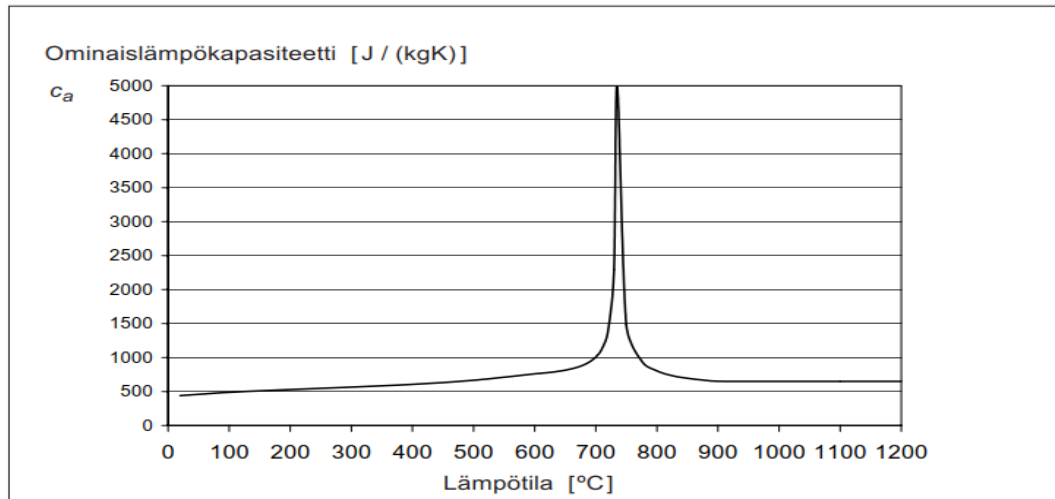
$A_{m.wq}/V_{wq}$  on WQ-paarteen poikkileikkaustekijä palomitoituksessa

$A_{m.rp}/V_{rp}$  on rakenneputken poikkileikkaustekijä palomitoituksessa

$A_{m.lt}/V_{lt}$  on lattateräsalaapaarteen poikkileikkaustekijä palomitoituksessa. [1, s. 349; 3, s. 32.]

Laskentaa on yksinkertaistettu ja laskettu vaipan pinta-alat siten, ettei ristikon liitoskoh-  
tien vaikutusta ole huomioitu.

$c_a$  on teräksen ominaislämpökapasiteetti, jonka yksikkö on [J/(kgK)]. Sen arvo vaihtelee lämpötilan mukaan. Tätä on havainnollistettu kuvassa 56. Vaihtelu johtuu siitä, että lämpötilan noustessa molekyylit saavat lisäenergiaa, jolloin ne nousevat kvanttimekaniikan mukaisesti perustilastaan viritystilaan. Tämä ilmiö taas vaikuttaa alkeishiukkasten järjestyntymiseen negatiivisesti. Lämpöenergian ylittäessä magneettisen vuorovaikutuksen energian spinien järjestykset romahtavat. Tämän tapahtuminen vaatii toteutuakseen kuitenkin erittäin paljon lämpöenergiaa. Tällöin puhutaan niin sanotusta Curie-pisteestä, jolloin teräs ferromagneettisena aineena menettää magneettisuutensa täydellisesti ja käyttäytyy tämän jälkeen paramagneettisesti. Tämän seurauksena teräksen luonnollinen magneettinen momentti on vaihtanut suuntansa. Kuten kuvasta voidaan havaita, tapahtuu tämä ilmiö teräksellä noin 735 °C:n tienoilla. Kyseessä ei ole kuitenkaan Curie-pisteen absoluuttinen arvo, vaan tapahtumalämpötila voi vaihdella. [22.]



Kuva 56. Teräksen ominaislämpökapasiteetti ei ole vakio, vaan 700–800 °C välillä sen arvo muuttuu. [4, s. 486.]

Teräksen ominaislämpökapasiteetti voidaan tämän perusteella laskea neljässä eri lämpötilaskaalassa seuraavasti:

$$c_a = 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} \cdot \theta_a - 1,69 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_a^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_a^3, \text{ kun } 20 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600 \text{ }^\circ\text{C} \quad (140)$$

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a}, \text{ kun } 600 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735 \text{ }^\circ\text{C} \quad (141)$$

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731}, \text{ kun } 735 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_a < 900 \text{ }^\circ\text{C} \quad (142)$$

$$c_a = 650 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}, \text{ kun } 900 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C} \quad (143)$$

missä  $\theta_a$  on lämpötilaskaalan mukainen teräksen lämpötila. [1, s. 345; 4, s. 485; 8, s. 24.]

Kuten kuvaa 56 ja kaavaa 140 tarkastelemalla voidaan huomata, on ominaislämpökapasiteetin alkulämpötilana huoneen lämpötila 20 °C. Teräksen lämpökapasiteetti voidaan määrittää enintään 1200 °C:seen asti, jolloin teräs on menettänyt myötölujuutensa ja kimmoisuutensa täysin sulamisen seurauksena. Vaihtoehtoisesti teräksen ominaislämpökapasiteetin arvona voidaan käyttää  $c_a = 600 \text{ J/(kgK)}$ . [1, s. 345; 4, s. 485.]

$\rho_a$  on teräksen tiheyden suure. Käytetään arvoa  $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$ . Oletuksena on, ettei teräksen tiheys muutu lämpötilan vaikutuksesta.

Kaavassa oleva tekijä  $h_{net.d}$  on tulipalolle alltiin teräsrakenteen vaipan pinta-alaa kohti laskettu nettolämpövuon mitoitussarvo [ $\text{W/m}^2$ ], joka lasketaan seuraavasti:

$$h_{net.d} = h_{net.c} + h_{net.r} \quad (144)$$

missä:

$h_{net.c}$  on kuljettumalla tapahtuvan nettolämpövuon määrä. Sen osuus lasketaan seuraavalla tavalla:

$$h_{net.c} = \alpha_c(\theta_g - \theta_m) \quad (145)$$

missä:

$\alpha_c$  on kuljettumisen lämmönsiirtymiskerroin. Standardipalossa voidaan käyttää arvoa  $\alpha_c=25/(\text{m}^2\text{K})$ .

$\theta_g$  teräsrakenteen ympärillä olevan palotilan kaasun lämpötila, yksikkönä  $^{\circ}\text{C}$ .

$\theta_m$  on teräsrakenteen pintalämpötila, yksikkönä  $^{\circ}\text{C}$ . [1, s. 345; 4, s. 485; 8, s. 35; 20, s. 87; 21, s. 38.]

Fysiikan lakien mukaisesti voidaan todeta, että palotilan lämpötilan ollessa terästä korkeampi johtuu lämpö palotilasta teräkseen. Toisaalta mikäli teräksen lämpötila olisi palotilaa korkeampi, lämmittäisi teräs johtumalla palotilaa.

Yhtälön toinen osa, säteilemällä tapahtuva nettolämpövuoto lasketaan seuraavalla tavalla:

$$h_{net.r} = \Phi * \varepsilon_m * \varepsilon_f * \sigma * [(273 + \theta_r)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (146)$$

missä:

$\Phi$  on näkyvyyskerroin. Yleisiä palokuormia käsittelevän eurokoodin SFS-EN 1991-1-2 mukaan näkyvyyskerroin voitaisiin laskea kyseisen eurokoodin liitteessä G esitetyllä tarkalla menetelmällä, joka on työläs. Kuitenkin tämän menetelmän avulla on mahdollista säästää palosuojamateriaalien kustannuksissa. Arvona voidaan yksinkertaistuksena käyttää  $\Phi=1,0$ , joka on varmallalla puolella oleva valinta. Tällöin oletetaan, että säteilevältä pinnalta lähtevästä kokonaislämpösäteilystä saapuu kaikki perille etäisyydestä ja keskinäisestä suunnasta riippumatta

$\epsilon_m$  on teräsrakenneseosan pinnan säteilykerroin. Hiiliteräkselle käytetään arvoa  $\epsilon_m = 0,7$

$\epsilon_f$  on palon säteilykerroin, jolle käytetään arvoa  $\epsilon_f = 1,0$ . Tämä arvo tarkoittaa, että palosta kohdistuu säteily täysimääräisenä teräsrakenteeseen

$\sigma$  on Stefan-Boltzmannin vakio, jonka mukaan mustan kappaleen säteilemä teho pinta-alaa kohti on suoraan verrannollinen lämpötilan neljänteen potenssiin. Käytetään arvoa  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$

$\theta_r$  on paloympäristön tehollinen säteilylämpötila, yksikkönä  $^{\circ}\text{C}$

$\theta_m$  on rakenneosan pintalämpötila, yksikkönä  $^{\circ}\text{C}$ . [1, s. 345; 4, s. 485; 20, s. 87; 21, s. 40.]

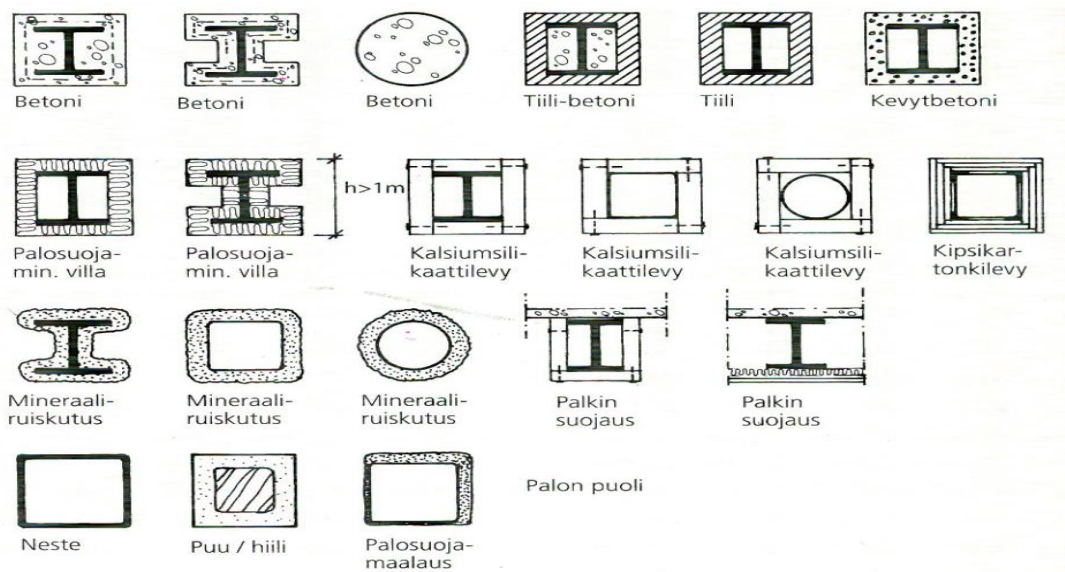
Kuten kaavaa tutkimalla voidaan huomata, ei suojaamattoman teräksen rakenteen lämpötilan muutosta voida laskea kerralla, vaan enintään viiden sekunnin askeleissa. Mitä pienemmillä väleillä lasku suoritetaan, sitä tarkempi on saatu tulos.

## 7.5 Teräksen suojaaminen tulipalolta palosuojamateriaalien avulla

Palosuojamateriaaleja käytetään rajoittamaan teräksen lämpötilan nousua, jotta teräs säilyttäisi kantavuutensa palotilanteessa sille asetetun palonkestovaatimuksen verran eikä menettäisi myötörajan alenemisen myötä kuormien kantamiskykyään. Palosuojamateriaaleja on olemassa kahta eri tyyppiä: lämpöä eristävää ja lämmönsitomiskykyä parantavaa. Lämmönsitomiskykyä parantavan eristeiden avulla lisätään teräsrakenteen

massaa. Massan lisääntymisestä seuraa, että rakenteen lämpötilan nouseminen vaatii enemmän energiaa. [1, s. 372–373; 4, s. 513.]

Teräksen palosuojaamateriaaleja on olemassa useita. Yleisesti ottaen teräs voidaan suojata palosuojamaalauksella, betonilla, kevytbetonilla tai mineraalivillalevyllä. Teräksen päälle voidaan myös levittää ruiskutuksen avulla palolta suojaava mineraalikuitukerros. Suojaus voidaan toteuttaa myös puun, kipsilevyjen, veden, kalsiumsilikaattilevyjen, muurauksen tai rappauksen avulla. Teräsrakenteiden eri palosuojaustapoja on havainnollistettu kuvassa 57. [23, s. 99.]



Kuva 57. Teräksen eri palosuojaustapoja. [23, s. 99.]

Näistä WQ-ristikon suojaukseen käytetään pääasiassa palosuojamaalia, betonia sekä mineraalikuituruiskutusta.

Betonia käytetään palosuojauksessa lämpöä sitovana materiaalina. WQ-ristikon osalta betoni suojaa WQ-profiilin yläparretta lukuun ottamatta alalaippaa, sillä tällöin osa energiasta menee betonin kemiallisten sidosten rikkomiseen. Tällöin suojarakenteen tuoman massan myötä vaaditaan myös enemmän energiaa WQ-profiilin lämpötilan nousemiseen. Betonin palonkestävyyteen vaikuttaa merkittävästi raudoituksen etäisyys betonin pinnasta. [4, s. 516.]

Palosuojamaalien käyttö perustuu siihen, että normaalissa lämpötilassa ne käyttäytyvät kuin normaalit maalit. Maalin kuivakalvon paksuus on siveltimellä, ruiskulla tai telalla levitettyä 0,2–3 millimetriä. Sen paksuus määritetään palosuojamaalin ETA-arviointikortista (European Technical Approval) kriittisen lämpötilan sekä poikkileikkaustekijän avulla. WQ-palkin poikkileikkaustekijä määritetään soveltamalla rakenneputken poikkileikkaustekijää, sillä kirjoittajan tietojen mukaan ETA-arviointikortit eivät sisällä palosuojamaalikerroksen määrittäystä tälle profiilityypille. Kyseistä arviointia käytetään osoittamaan, että rakennustuote täyttää sille lainsäädännössä asetetut vaatimukset. Kun lämpötila nousee 250–300 °C:een, alkaa palosuojamaali paisua ja vaahdota. Usean senttimetrin paksuinen vaahtokerros suojaa terästä hiiltymällä palon aikana.

Osa maalituotteista ei kestä pitkäaikaista paloa, vaan hiiltynyt maalikerros voi alkaa kuoriutumaan jo 30 minuutin kuluttua suojaavan vaahdon muodostumisesta. Palosuojamaaleja käytetään kohteissa, joissa kantavan rakenteen palonkestovaatimus on R15–R120. WQ-ristikon osalta kantavuusvaatimus on yleensä R60. Kantavuusvaatimus tarkoittaa, että ristikon täytyy toimia palotilanteessa kantavana rakenteena vähintään 60 minuutin ajan. [1, s. 375; 4, s. 515-516; 24.]

Mineraalikuluruiskutuksessa sementti ja mineraalivillakuidut ruiskutetaan veden kanssa teräksen pinnalle, jonka tukirauhoituksena ja samalla kiinnitysalustana on mahdollista käyttää sinkittyä teräsverkkoa. Ruiskutuskerroksen paksuus on yleensä 10–60 millimetriä ja sen tiheys on 220–500 kg/m<sup>3</sup>. Palosuojauksen huokoinen pinta tulee suojata mekaanista kulutusta vastaan joko sopivalla levyrakenteella, kovalla rappauksella tai lasikuitukankaalla. [1, s. 374–375; 4, s. 515.]

Suojaustapaan vaikuttavat arkkitehtoniset tekijät, kustannukset sekä käyttö- ja asennusolosuhteet. Lisäksi palosuojamateriaalin valinnassa on huomioitava sen huoltokustannukset. [1, s. 372; 4, s. 513.]

## 7.6 Palolta suojatun teräsrakenteen lämpötilan kehitys

Palolta suojatun teräsrakenteen lämpötilan muutos voidaan laskea seuraavasti:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p/d_p}{c_a\rho_a} * \frac{A_p(\theta_{g,t}-\theta_{a,t})}{V(1+\frac{\Phi}{3})} * \Delta t - \left(e^{\frac{\Phi}{10}} - 1\right) * \Delta\theta_{g,t}, \text{ mutta jos } \Delta\theta_{g,t} > 0, \text{ niin } \Delta\theta_{a,t} \geq 0 \quad (147)$$

missä:

$$\Phi = \frac{d_p(c_p\rho_p)}{c_a\rho_a} * \frac{A_p}{V} \quad (148)$$

missä:

$A_p$  on palosuojamateriaalilla eristetyn poikkileikkauksen pinnan pinta-ala metriä kohti, yksikkönä  $m^2/m$

$A_p/V$  on palosuojamateriaalilla eristetyn terässauvan poikkileikkaustekijä

$V$  on terässauvan tilavuus yhtä metriä kohden, yksikkönä  $m^3/m$

$c_a$  on teräksen lämpötilasta riippuva ominaislämpökapasiteetti, yksikkönä  $J/(kgK)$

$c_p$  on palosuojamateriaalin lämpötilasta riippumaton ominaislämpökapasiteetti, yksikkönä  $J/(kgK)$

$d_p$  on käytettävän palosuojamateriaalin paksuus, yksikkönä metri

$\theta_{a,t}$  on teräksen lämpötila ajan hetkellä  $t$

$\theta_{g,t}$  on palotilan lämpötila hetkellä  $t$  tulipalon syttymisestä

$\Delta\theta_{g,t}$  on palotilassa tapahtuva lämpötilan nousu ajanjakson  $\Delta t$  kuluessa, yksikkönä Kelvin

$\lambda_p$  on käytettävän palosuojausjärjestelmän lämmönjohtavuus, yksikkönä  $W/mK$

$\rho_a$  on teräksen tiheys  $7850 \text{ kg/m}^3$  ja jonka oletetaan pysyvän samana riippumatta palotilassa vallitsevasta lämpötilasta

$\rho_p$  on käytettävän palosuojamateriaalin tiheys, yksikkönä  $\text{kg/m}^3$ .

Kaava pätee, kun palosuojamateriaali pysyy kiinni suojattavassa rakenneosassa yhtenäisenä osana koko paloaltistusajan verran. Huomionarvoista on, että nyt käytettävä aikaväli voi olla enintään 30 sekuntia. [1, s. 346–347; 3, s. 33; 4, s. 486–487; 8, s. 37; 20, s. 89.]

## 7.7 Yhdistetyn taivutuksen ja puristuksen kestävyys palotilanteessa

WQ-yläpaarteen osalta tulee tarkistaa sen tulipalon aikainen yhdistetyn puristuksen ja taivutuksen kestävyys SFS-EN 1993-1-2 mukaan seuraavasti:

$$\frac{N_{fi.Ed}}{\chi_{min.fi} A f_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi.Ed}}{W_{pl,y} k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_z M_{z,fi.Ed}}{W_{pl,z} k_{z,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1,0 \quad (149)$$

Koska taivutus tapahtuu WQ-ristikossa y-akselin suhteen, sievenee kaava muotoon:

$$\frac{N_{fi.Ed}}{\chi_{min.fi} A f_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi.Ed}}{W_{pl,y} k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1,0 \quad (150)$$

missä:

$N_{fi.Ed}$  on palotilanteen mukainen poikkileikkaukseen kohdistuva puristava normaalivoima

$M_{y,fi.Ed}$  on palotilanteen mukainen y-akselin suhteen poikkileikkaukseen vaikuttava taivutusmomentti

$\chi_{min.fi}$  on palomitoitustilanteen mukainen taivutusnurjahduksen pienennystekijä

$k_{y,\theta}$  on palotilan lämpötilasta riippuva teräksen myötölujuuden pienennystekijä. [1, s. 360–361; 4, s. 501–502; 25, s. 28 ja 32–33.]

Kaavassa esiintyvä taivutusmomentin palotilanteen vaikutuskerroin  $k_y$  lasketaan seuraavasti:



$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{fi.Ed}}{\chi_{y,fi} A_{k_{y,\theta}} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3 \quad (151)$$

missä:

$$\mu_y = (2\beta_{M,y} - 5)\bar{\lambda}_{y,\theta} + 0,44\beta_{M,y} + 0,29 \leq 1,1, \text{ lisäksi } \bar{\lambda}_{y,20^\circ\text{C}} \leq 1,1 \quad (152)$$

missä:

$\beta_m$  on ekvivalentin tasaisen momentin tekijä

$\bar{\lambda}_{y,20^\circ\text{C}}$  on normaalilämpötilan mukainen muunnettu hoikkuus

$\bar{\lambda}_{y,\theta}$  on lämpötilan  $\theta$  mukainen WQ-profiilin muunnettu hoikkuus. Vaikutuskerroin voi siis lisätä sopivalla profiililla ja teräslajilla palotilanteen momenttia enintään kolminkertaiseksi. Esitetty yhtälö soveltuu vain poikkileikkausluokan 1 ja 2 sauvoille, mihin WQ-profiiliin on paarrerakenteena ristikon poikkileikkausluokkavaatimusten mukaisesti kuultava. [1, s. 361; 4, s. 502; 8, s. 32.]

## 8 Yhteenveto

Tässä työssä tutkittiin WQ-profiilin käyttöä yläpaarteena teräsristikkorakenteessa. Tätä ristikkorakennetyyppiä käytetään rakennusalalla yleisesti. Työssä tutkittiin, mitä asioita tulee huomioida, kun yläpaarrelliitokset mitoitetaan eurokoodin liitoskaavojen mukaisesti. Havaittiin, että eurokoodin liitosyhtälöt ovat laadittu alun perin rakenneputkille sekä I-, H- ja U-profiileille ja että nämä kaavat perustuvat kansainvälisen putkirakenteiden kehitys- ja koulutuskomitea CIDECT'n teettämiin tutkimuksiin. Niinpä yläpaarteen liitosten kaikki kaavat jouduttiin tulkitsemaan hyvinkin tarkasti liitoksessa vaikuttavan ilmiön mukaisesti, jotta yhtälöitä käytettiin oikein. Havaittiin myös, että painopisteakselin sijainti tulee huomioida ristikkoliitoksia suunnitellessa. Tehtiin havainto, että mitä lähempänä painopisteakseli on alalaippaa, sitä mielekkäämpää on toteuttaa K-liitos limitettynä. Tällöin epäkeskeisyydestä aiheutuvat momentit saadaan minimoitua. Lisäksi tehtiin havainto, että mitä alempana plastisuusteorian mukainen neutraaliakseli on, sitä pienempi on myös

liitoksen taivutuskestävyys. Kuitenkin plastisuusteorian mukaisen neutraaliakselin sekä pintakeskiön tasapainotuksessa tulee huomioida materiaalimenekki ja siitä aiheutuvat kustannukset.

Eurokoodin kaavojen osalta havaittiin, että suunnittelijan pitää ristikkoliitoksessa vaikuttavan ilmiön perusteella osata ymmärtää, mikä WQ-paarteen osa osallistuu liitoksen kestävyteen missäkin vaurioitumistavassa. Profiilin murtumisalttiiden osien todettiin olevan alalaipan keskiosa sekä molemmat uumat. Tämän todettiin helpottavan merkittävästi eurokoodin kaavojen soveltamista WQ-profiilille niin vahvistamattomissa kuin vahvistetuissa liitoksissa.

Lisäksi havaittiin, että liitoksiin osallistuu WQ-profiilin suorakaiteen muotoinen osa, sillä alalaipan ulokeosat tällöin liikkuvat mukana. Liitoskestävyyksien havaittiin määräytyvän Y-liitoksessa diagonaalisauvan ja WQ-paarteen suorakaiteen leveyksien suhteen perusteella. Myös diagonaalisauvan liitoskulmalla on suuri merkitys liitoksen kestävyteen. Vapaavälisessä K-liitoksessa ristikkoliitoksen murtumistavan ja sitä kautta liitoskestävyyden määräytyminen ei ollut niin selkeää, vaan kaikki murtumismuodot jouduttiin käymään läpi. Kuitenkin liitoksen vapaaväli tulisi pitää riittävän pienenä, ettei yläpaarteen leikkausmurtuminen muodostuisi kriittiseksi.

Lisäksi ristikkoliitosten kaavojen soveltamisesta WQ-yläpaarteen liitoksiin havaittiin, että rakenneputkille tarkoitetut tehollisen leveyden liitoskaavat (kaavat 53, 94 ja 111) antoivat diagonaalisauvalle liian suuren käyttöasteen. Liian suuri käyttöaste johtui siitä, että kaavan toimivuus on laadittu rakenneputken laipan pinnan myötämistä silmällä pitäen. Myös WQ-paarteen leikkauspinta-alan osalta tehtiin konservatiivisella puolella oleva oletus, että vain uumat osallistuvat leikkausvoiman välitykseen.

Havaittiin myös, että CIDECT'n teettämässä ristikkoliitostutkimuksissa käytettiin teräslajina S355. Mikäli ristikkoliitoksissa käytetään teräslajia, joka on lujempi kuin S355 mutta enintään S460, huomioidaan ristikkoliitoksen kestävyydestä 90 % ja teräslajeja S500–S700 käytettäessä vain 80 %. Lisäksi havaittiin, että kansainvälisen rakenneputkikomitean tutkimusaineistoa kannattaa tarvittaessa hyödyntää tulkitessa eurokoodin kaavoja, sillä näissä lähteissä on avattu auki eurokoodissa käytettyjä ristikkoliitoskaavojen alkuperäistä käyttötarkoitusta. Tällöin WQ-ristikon suunnittelun todettiin helpottuvan, kun

ymmärtää mitä asioita teräsliitoseurokoodin SFS-EN 1993-1-8 liitosyhtälöt huomioivat ja missä laajuudessa.

Lisäksi havaittiin, että liitosta voidaan vahvistaa joko käyttämällä metallista vahvistuslevyä, limitettyä liitosta ja/tai paksuntamalla WQ-profiiliin tai rakenneputkien mittoja. WQ-profiiliin osalta tulee kuitenkin huomioida painopisteakselin sijainnin mahdollinen muuttuminen ja siitä aiheutuva liitosten epäkeskeisyys. Liitosten vahvistamisen osalta todettiin, että tällöin myös niiden laskentatapa muuttuu ja että liitosten vahvistamisessa on huomioitava niiden vaikutus ristikon painoon ja sitä kautta materiaalikustannuksiin.

Palosuojauksen osalta havaittiin, että WQ-ristikon palosuojauksessa käytetään palosuojauksena palosuojamaalia. Tehtiin havainto, ettei WQ-palkille soveltuvaa ETA-arvioitua palosuojamaalia ei ole tällä hetkellä olemassa ja että sen kalvopaksuus määritetään sellaisen ETA-arvioidun palosuojamaalin avulla, jota voidaan käyttää rakenneputkille. Voitiinkin siis todeta, että saman palosuojamaalin ETA-arviointikortin avulla saadaan siis määritettyä ristikon kaikkien osien palosuojamaalin tarvittava kalvopaksuus. Lisäksi myös havaittiin, että tätä menetelmää voidaan soveltaa myös alapaarteena käytettävän lattateräksen tapauksessa.

### 8.1 Lattateräsalapaarteeseen liittyviä havaintoja

Tässä työssä tutkittiin myös lattateräksen käyttöä alapaarteena vahvikelevyllä vahvistetussa limitetyssä K-liitoksessa. Kyseistä rakennetta käytetään yleisesti WQ-ristikossa. Työn aikana löydettiin kaksi kappaletta tämän tyyppisestä rakenteesta tehtyjä tutkimuksia, joissa tutkittiin yhteensä 29 erityyppistä lattateräksestä tehtyä alapaarrelliitosta. Näissä Anssi Jurmun ja Jaak Kadakin suorittamissa tutkimuksissa käytettiin kahta eri teräsprofiilia (150x150x10 sekä 250x150x10) sekä kahta lattateräksen paksuutta (20 mm ja 40 mm) sekä kolmea eri liittymiskulmaa: 30°, 45° ja 60°. Tutkimuksissa selvitettiin liitoksen kestävyyttä ja liitoksen mitoittavana kriteerinä oli liitoksen suhteellinen 5 % plasminen venymäraja.

Tutkimuksissa havaittiin, että liitoksen murtuma tapahtui aina vedetyn sauvan nurkkapyöritys- ja päätyhitsien kohdalla. Samalla tehtiin myös havainto, että murtumisen tapahtuessa diagonaalisauvan uumat ja nurkkapyöritys toimivat 100 prosentin

käyttöasteella. Lisäksi tehtiin havainto, ettei teräsliitoseurokoodi huomioi sauvojen liittymiskulmia ollenkaan vahvistetussa limitetyssä K-liitoksessa. Tutkimuksissa havaittiin, että alapaarrelliitoksen liitoskestävyys on pienimmillään käytettäessä diagonaalisauvalle 45 asteen liittymiskulmaa 20 millimetrin paksuisessa lattateräsliitoksessa sekä ohuempaa 25 millimetrin paksuista vahvikelevyä. Syyksi tähän todettiin, että tällöin voima välittyy jäykemmän vahvikelevyn kautta, jonka voimanvälityskapasiteetti on sen geometrian takia pienempi kuin saman paksuisen lattateräksen.

Näissä tutkimuksissa 30 asteen kulmassa sauvan liittäminen 40 millimetrin lattateräkseen sekä 35 millimetrin vahvikelevyyn antoi näiden tutkimusten valossa ja tutkittujen liitoskulmien perusteella tutkituille tapauksille suurimman liitoskestävyyden. Havaittiin myös, että lattateräsliitoksen murtuminen tapahtui aina vedetyn sauvan pääty- tai kylkihitsissä.

Nykyisten tutkimusten valossa mitoitus voitaneen suorittaa eurokoodin yhtälöillä paksuhkoa lattaterästä ja teräslajia S355 ja S420 käyttäen, jolloin liitoksen todelliset käyttöasteet ovat 70-80 % eurokoodien liitosyhtälöiden antamiin tuloksiin nähden. Lisäksi tämän insinööriyön kirjoittaja havaitsi, että teräslajien S460 ja S550 eurokoodin varokertoimien lisäksi voitaisiin eurokoodin liitoskestävyyden yliarvioinnilta mahdollisesti välttyä ottamalla saadusta tuloksesta huomioon 90 %. Suuntaa-antavana suosituksena voidaan suositella suhteellisen paksun lattateräksen ja vahvikelevyn käyttöä. Tällöin on kuitenkin huomioitava lattateräksen tai vahvikelevyn lamellirepeilyn riski.

Kuitenkin tutkimusten luotettavuutta rajoittaa merkittävästi vain kahden edellä mainitun teräsprofiilin sekä vain neljän eri teräslajin (S355, S420, S460 ja S550) käyttäminen laske-analyseissa. Tutkimuksista voitiin siis todeta, että tulokset eivät ole kattavia. Tämän johtopäätökseen päädyttiin siksi, että tutkimustapauksia oli näissä tutkimuksissa vain 29 kappaletta ja tutkimukset suoritettiin käyttäen vain kahta eri paksuutta niin vahvikelevylle kuin myös lattateräkselle. Myös liitoskulmien variaatioita oli vain edellä mainitut kolme kappaletta. Kuitenkin tutkimustulokset antavat jonkinlaista osviittaa lattateräksen mitoituksessa huomioitavista asioista. Voitiinkin siis todeta, että tämän liitostyyppin osalta tarvittaisiin reilusti lisää tutkimuksia eri profiileilla ja teräslajeilla, ennen kuin voidaan antaa mitään luotettavia ohjeistuksia tämän liitostyyppin mitoituksesta.

## 8.2 Tulevaisuudessa tutkittavia asioita

Tässä työssä rajoituttiin tutkimaan vain z-akselin suhteen symmetrisen WQ-profiilin käyttöä yläpaarteena teräsristikkorakenteessa, kun siihen ei kohdistu dynaamisia kuormia. Tämän opinnäytetyön puitteissa ei laadittu ohjeistusta WQ-ristikkorakenteen kiinnityksestä teräspilariin tai betoniseinärakenteeseen, joten se on yksi mahdollinen tulevaisuudessa tutkittava asia. Tutkittavaa olisi myös sellaisessa teräsristikkorakenteessa, jossa sekä ylä- että alapaarre ovat WQ-profiileja.

Tutkittavaa olisi varmasti myös ontelolaatan leikkauskestävyydessä sen liittyessä WQ-ristikkoon. Selvitettävää olisi siinä, miten ristikon taipuma vaikuttaisi ontelolaatan päähän kohdistuviin leikkausjännityksiin ja käyttöasteeseen. Lisäksi on huomioitava ontelolaatan päälle tulevan mahdollisen pintavalun aiheuttama liittovaikutus, joka lisää ontelolaatan päähän kohdistuvia jännityksiä.

Tutkittavaa olisi myös dynaamisesti kuormitetussa WQ-ristikossa, joka liitettäisiin sen kokonsa vuoksi jatkosliitoksin kahdesta osasta yhteen. Dynaamisessa kuormituksessa kuorman suunta ja suuruus muuttuvat säännöllisesti tai epäsäännöllisesti. Tällaisia kuormia on mm. teattereissa, missä nostetaan ja lasketaan rekvisiittaa. Tutkimuksen perusteella voitaisiin laatia ohjeistus, jossa kerrottaisiin mitä asioita tämän tyyppistä ristikkoa mitoitettaessa on muistettava ottaa huomioon.

Lisäksi tutkittavaa olisi myös sellaisessa WQ-ristikossa, missä esimerkiksi katon muuttuvan korkeuden takia ristikon WQ-yläpaarteen toinen osa tehtäisiin korkeampana ja toinen matalampana ja mitä ristikon keskivaiheilla olevan korkeuseroalueen liitosten toteutuksessa tulee huomioida.

Voidaankin siis todeta, että tämän työn pohjalta on hyvä lähteä laatimaan ratkaisuja ja ohjeistusta WQ-ristikon suunnitteluun.

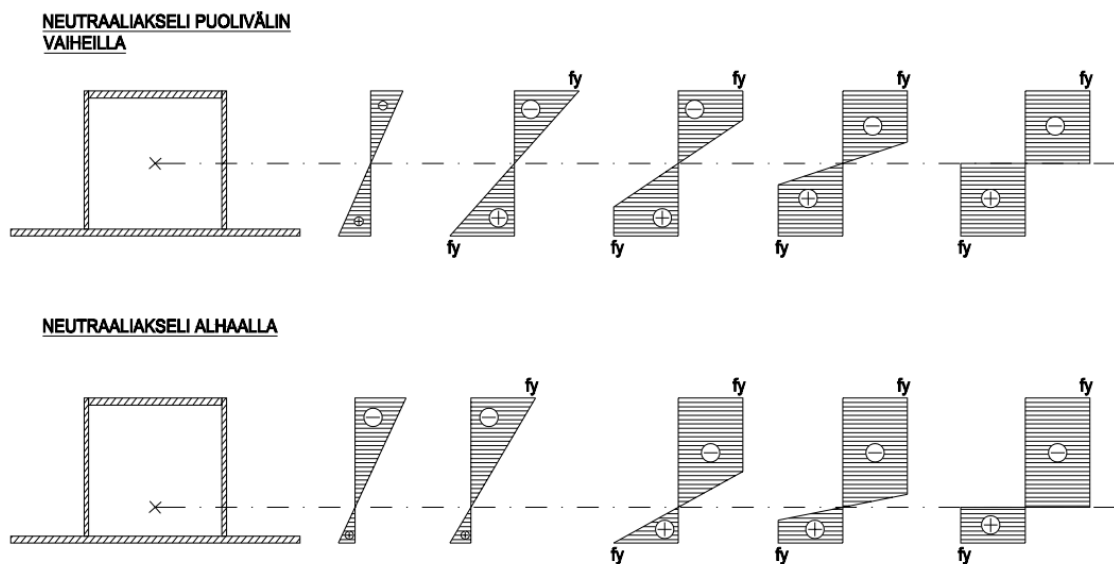
## Lähteet

- 1 SSAB Domex Tube Rakenneputket. EN 1993-käsikirja 2016. 2016. SSAB-revisio. Keuruu: SSAB Europe Oy.
- 2 WQ-palkkijärjestelmät. 2009. Peräseinäjoki: Ruukki.
- 3 Teräsnormikortti numero 21. 2009. 21/2009. Teräsrakenneyhdistys ry.
- 4 Hitsatut profiilit EN 1993-käsikirja 2010. 2010. Uudistettu 3. painos. Keuruu: Rautaruukki Oyj.
- 5 SFS-EN 1993-1-1. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. 2005. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 6 SFS-EN 1993-1-5. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. 2006. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 7 Kouhi, Jouko. 2015. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry.
- 8 SFS-EN 1993-1-2. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Rakenteen palomitoitus. 2005. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 9 Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1993 1-5 Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-5: Tasomaiset levyrakenteet. 2008. Helsinki: Ympäristöministeriö.
- 10 SFS-EN 1993-1-8. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten mitoitus. 2005. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 11 Kouhi, Jouko. 2015. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. 1-8: Liitokset. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry.
- 12 Wardenier, Jaap; Packer, Jeffrey; Zhao, Xiao-Ling; van der Vegte, Addie. 2010. Hollow Sections in Structural Applications. Geneve: CIDECT.
- 13 SFS-EN 1993-1-12. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-12: EN 1993 laajennus teräslajeihin S700 asti. 2018. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

- 14 SFS-EN 1090-2. Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus. Osa 2: Teräsrakenteiden tekniset vaatimukset. 2018. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 15 Jurmu, Anssi. 2011. WQ-ristikon alapaarteen liitoksen suunnitteluperusteet. Oulu: Oulun yliopisto.
- 16 T-, Y-, tai X-liitos, suorakaiteen muotoinen parre. Versio 1.5. SKOL laskentapohja. SKOL.
- 17 Kadak, Jaak. 2014. Effect of steel strength on the welded joint between a plate and two tubular cross-sections. Espoo: Aalto-yliopisto.
- 18 Rakenteiden lujuus ja vakaus. Teräsrakenteet. 2017. Helsinki: Ympäristöministeriö.
- 19 Kouhi, Jouko. 2015. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. 1-2: Rakenteellinen palomitoitus. Helsinki: Teräsrakeneyhdistys ry.
- 20 Vassart, Olivier; Zhao, Bin; Cajot, Louis-Guy; Robert, Fabienne; Frangi, Andrea. 2014. Eurocodes: Background & Applications. Structural Fire Design. Joint Research Centre Science and Policy Reports. Worked Examples. E-kirja. Joint Research Centre.
- 21 SFS-EN 1991-2. Eurocode1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-2. palolle altistettujen rakenteiden rasitukset. 2003. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 22 Encyclopedia Britannica. Curie point. Verkkoaineisto. <<https://www.britannica.com/science/Curie-point>>. Luettu 24.4.2019.
- 23 Siikanen, Unto. 2015. Rakennusfysiikka. Perusteet ja sovelluksia. 2. painos. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- 24 Ympäristöministeriö. Rakennustuotteiden tuotehyväksyntä – yhtenäiset kriteerit rakennustuotteiden kelpoisuuden varmistamiseksi. Verkkoaineisto. <[https://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto\\_ja\\_rakentaminen/Rakentamisen\\_ohjaus/Rakennustuotteiden\\_tuotehyvaksynta](https://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Rakentamisen_ohjaus/Rakennustuotteiden_tuotehyvaksynta)>. Luettu 24.4.2019.

## Liite 1. Neutraaliakselin sijainnin vaikutus plastisoitumiseen

Neutraaliakselin sijainnin vaikutusta plastisoitumiseen on havainnollistettu kuvassa 1.

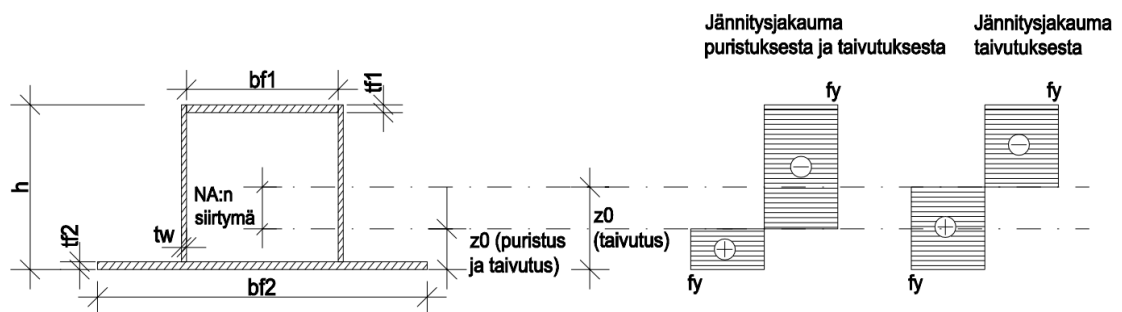


Kuva 1. Neutraaliakselin sijainnin vaikutus plastisoitumiseen. Kuva: Mikko Kähkönen.



## Liite 2. WQ-profiilin plastisuusteorian mukainen neutraaliakseli

Puristetun ja taivutetun WQ-profiilin neutraaliakseli lasketaan ensin taivutusteorian mukaan. Plastisuusteorian mukaista taivutetun rakenteen jännitys jakaumaa on havainnollistettu kuvassa 1 oikeanpuolimmaisella jännitys jakaumalla, missä puhtaan taivutuksen mukainen neutraaliakseli ( $z_0$ ) on poikkileikkauksen keskivaiheilla. Se voi olla alempanakin. Vasemmanpuolimmainen neutraaliakseli kuvaa tilannetta, jossa puristuksen vaikutus on huomioitu sen sijainnin ja sitä myötä jännitys jakauman suhteen.



Huom! Neutraaliakselin paikka riippuu WQ-profiilin osien (alalaippa, molemmat uumat ja ylälaippa) mitoista.

Kuva 1. WQ-profiilin plastisuusteorian mukaisen neutraaliakselin laskenta. Kuva: Mikko Kähkönen.

Aluksi WQ-profiilin neutraaliakselin paikka lasketaan puhtaan taivutuksen mukaisesti:

$$b_{f1}t_{f1}f_y + 2f_yt_w(h - z_{0.taivutus}) = b_{f2}t_{f2}f_y + 2t_wf_y(z_{0.taivutus} - t_{f2}) \quad (1)$$

$$b_{f1}t_{f1}f_y + 2f_yt_w h - 2f_yt_w z_{0.taivutus} = b_{f2}t_{f2}f_y + 2t_w z_{0.taivutus} f_y - 2t_w t_{f2} f_y \quad (2)$$

$$b_{f1}t_{f1} + 2t_w h - 2t_w z_{0.taivutus} = b_{f2}t_{f2} + 2t_w z_{0.taivutus} - 2t_w t_{f2} \quad (3)$$

$$2t_w z_{0.taivutus} + 2t_w z_{0.taivutus} = b_{f1}t_{f1} + 2t_w h + 2t_w t_{f2} - b_{f2}t_{f2} \quad (4)$$

$$4t_w z_{0.taivutus} = b_{f1}t_{f1} + 2t_w h + 2t_w t_{f2} - b_{f2}t_{f2} \quad (5)$$

$$z_{0.taivutus} = \frac{b_{f1}t_{f1} + 2t_w h + 2t_w t_{f2} - b_{f2}t_{f2}}{4t_w} \quad (6)$$

Tämän jälkeen huomioidaan puristuksen vaikutus WQ-profiilin jännitysjakumaan:

$$N_{Ed} = \beta(2t_w h_w f_y + b_{f2} t_{f2} f_y + b_{f1} t_{f1} f_y) \quad (7)$$

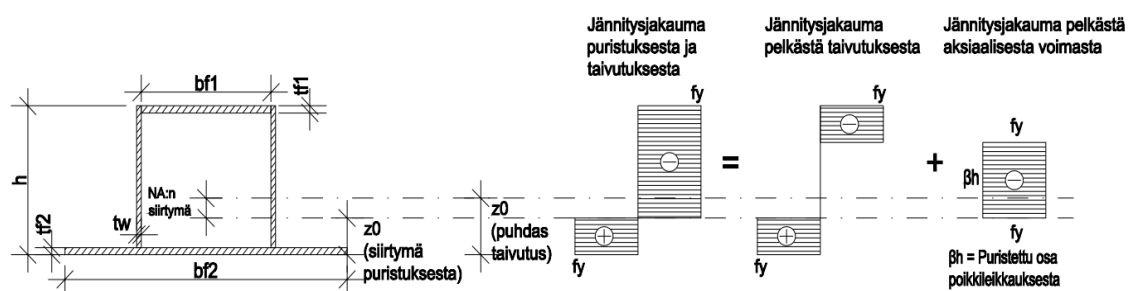
Tästä ratkaistaan poikkileikkauksen uumille kohdistuvan puristetun osan suhteellinen korkeus:

$$\beta = \frac{N_{Ed}}{f_y(2t_w h_w + b_{f2} t_{f2} + b_{f1} t_{f1})} \quad (8)$$

Puristava aksiaalinen voima saa aikaan neutraaliakselin alaspäin siirtymisen:

$$z_0 = z_{0.taivutus} - \frac{\beta h}{2} \quad (9)$$

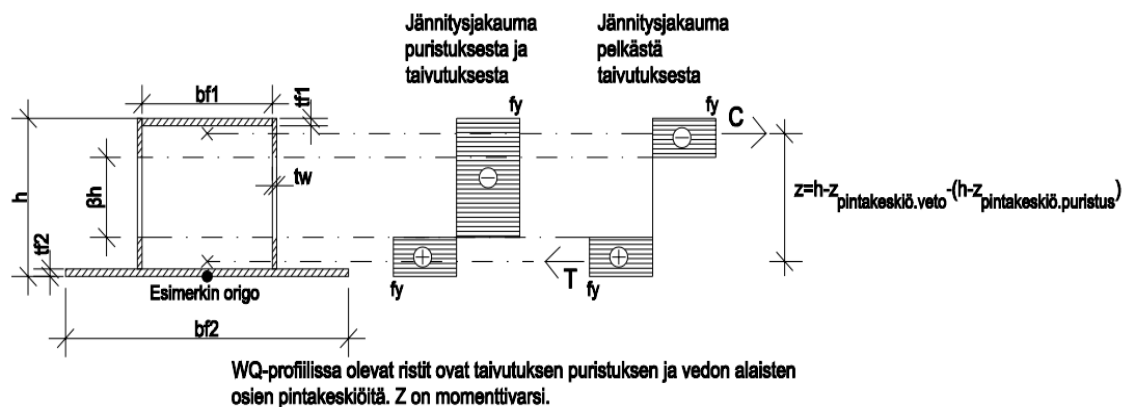
Puristavan aksiaalisen voiman vaikutusta plastisen neutraaliakselin sijaintiin on havainnollistettu kuvassa 2. Mitä isompi normaalivoima vaikuttaa WQ-profiiliin yhdistetyssä puristuksessa ja taivutuksessa, sitä enemmän neutraaliakselin sijainti laskee poikkileikkauksessa alas.



Kuva 2. Poikkileikkaukseen kohdistuva puristusvoima siirtää neutraaliakselia alas. Kuva: Mikko Kähkönen.

### Liite 3. Plastisen taivutuskestävyyden laskeminen puristetulle ja taivutetulle WQ-profiilille

Koska yläpaarre on puristettu ja taivutettu rakenne, tulee puristuksen vaikutus taivutuskestävyyteen ottaa huomioon vähentämällä siitä puristuksen alaisen poikkileikkauksen osuus. Tätä on havainnollistettu kuvan 1 mukaisella havainnollistetulla esimerkillä, missä aksiaalinen voima kohdistuu poikkileikkauksen korkeuden puolivälin vaiheilla olevaan painopiste akseliin. Taivutuskestävyydessä vaikuttavat sekä puristuksen (C) että vedon (T) voimien resultantit, joiden on oltava yhtä suuria ja siis toisensa kumoavia. Näiden jännitysresultanttien paikat ovat merkitty ruksilla WQ-profiiliin ylä- ja alaosaan. Kuvassa näkyvä termi  $\beta h$  kuvaa WQ-profiilin puristettua osaa. Tässä esitetty esimerkki pätee vain tässä erittäin yksinkertaistetussa tapauksessa. Esimerkin mukaisessa tilanteessa n. 50 % poikkileikkauksesta on puristuksessa.



Kuva 1. Plastisen taivutusvastuksen laskeminen WQ-profiilille. Kuva: Mikko Kähkönen.

Taivutuskestävyys, jonka osalta puristuskestävyys on huomioitu, voidaan laskea seuraavasti:

$$M_{N,Rd} = C * z = T * z \quad (1)$$

missä:

$$C = b_{f1}t_{f1}f_y + 2t_w * (h - t_{f2} - (z_0 - t_{f2}) - \beta h)f_y \quad (2)$$

$$T = b_{f2}t_{f2}f_y + 2t_w(z_0 - t_{f2})f_y \quad (3)$$

z on puristuksen ja vedon jännitysresultanttien välinen momenttivarsi

$z_0$  on neutraaliakseli, missä on huomioitu puristuksen vaikutus akselin sijaintiin.

C:n ja T:n voimien resultanttien sijaintien osalta on huomioitava, että niiden korkeus-asema joudutaan määrittelemään erikseen. Asetetaan määrittelyä varten mittakoordinaatisto WQ-profiiliin alalaipan alareunan keskiosaan. Origon sijainti on merkitty kuvassa 1 mustalla ympyrällä.

Z-akselin suuntaiset pintakeskiöiden korkeusasemat määritetään seuraavan periaatteen mukaisesti:

$$z_{pintakeskiö} = \frac{A_{laiippa} * y_{laiippa} + 2 * A_{puristamaton.uuma} * y_{puristamaton.uuma}}{A_{laiippa} + 2 * A_{puristamaton.uuma}} \quad (4)$$

missä  $A_{laiippa}$  on joko ylä- tai alalaipan pinta-ala:

$$A_{ylälaiippa} = b_{f1} * t_{f1} \quad (5)$$

$$z_{ylälaiippa} = h - t_{f1} \quad (6)$$

$$A_{alalaiippa} = b_{f2} * t_{f2} \quad (7)$$

$$z_{alalaiippa} = \frac{1}{2} t_{f2} \quad (8)$$

Puristamattomien uumien osien pinta-alat ja etäisyydet koordinaatistosta lasketaan erikseen vedetylle osalle ja puristetulle osalle. Vedetyn osan osalta uuman pinta-ala ja pintakeskiön etäisyys määritetään alalaipan alareunasta seuraavasti:

$$A_{\text{puristamaton.uuma}} = \left( \frac{h-t_{f2}-\beta h}{2} \right) * t_w \quad (9)$$

$$z_{\text{taivutuksen.veto.uuma}} = t_{f2} + \frac{1}{2} \left( \frac{h-t_{f2}-\beta h}{2} \right) \quad (10)$$

Puristetun yläosan uumien pintakeskiön määrittäminen pinta-alan suhteen ei tässä esimerkissä poikkeaa vedetyn osan pinta-alasta. Sen uumien pintakeskiön etäisyys koordinaatiston origosta määritetään seuraavasti:

$$z_{\text{taivutuksen.puristus.uuma}} = t_{f2} + \left( \frac{h-t_{f2}-\beta h}{2} \right) + \beta h + \frac{1}{2} \left( \frac{h-t_{f2}-\beta h}{2} \right) \quad (11)$$

Sijoittamalla arvot kaavaan 2, saadaan vedon pintakeskiön korkeusaseman laskenta-kaavaksi:

$$z_{\text{pintakeskiö.veto}} = \frac{t_{f2}}{2} + \frac{2t_w * \beta * h^2 - t_w * \beta^2 * h^2 + t_w * t_{f2}^2 - t_w * h^2}{4t_w * t_{f2} - 4 * \beta * t_{f2} - 4 * t_w * h + 4 * \beta * t_w * h} \quad (12)$$

Kaava siis pätee, kun korkeusasemaa tarkastellaan origosta käsin. Jos origon paikaksi valitaan vaikkapa WQ-poikkileikkauksen pintakeskiö, ei tässä liitteessä esitetty laskentakaava päde. Puristetun yläosan pintakeskiön korkeuden määrittämisen kaava origosta tarkasteltuna esitetään sen pituuden vuoksi kuvassa 2.

$$z_{\text{pintakeskiö.puristus}} := \frac{t_w * \beta^2 * h^2 + 2 * t_w * \beta * t_{f2} * h + 2 * t_w * \beta * h^2 + 2 * b_{f1} * t_{f1}^2 - 4 * b_{f1} * t_{f1} * h + t_w * t_{f2}^2 + 2 * t_w * t_{f2} * h - 3 * t_w * h^2}{4 * (t_w * t_{f2} - b_{f1} * t_{f1} - t_w * h + \beta * t_w * h)}$$

Kuva 2. Puristetun osan pintakeskiön laskentakaava. Kuva: Mikko Kähkönen.

Tämän jälkeen momenttivarren pituus lasketaan seuraavalla tavalla:

$$z = h - z_{\text{pintakeskiö.veto}} - (h - z_{\text{pintakeskiö.puristus}}) \quad (13)$$

Korostettakoon, että tässä esitetty esimerkki oli yksinkertaistettu. Todellisuudessa neutraaliakseli voisi sijaita esimerkiksi alalaipassa. Lisäksi poikkileikkaukseen kohdistuva aksiaalinen voima voi olla hyvinkin iso, jolloin taivutukseen osallistuu vain hyvin pieni osa

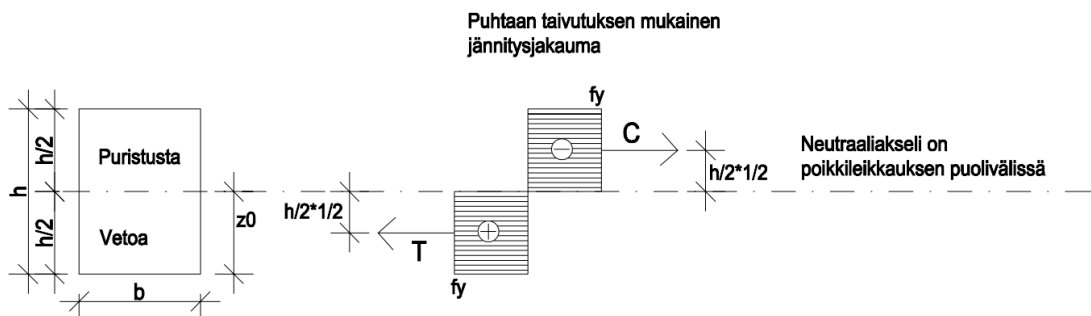
WQ-profiilin poikkileikkauksesta, esimerkiksi pelkästään ylä- ja alalaippa tai vain osa alalaipasta ja ylälaippa. Tällöin tässä esitetyt laskukaavat eivät päde. Vertaamalla tuloksia eurokoodin kaavoihin ovat tällä laskukaavalla saadut tulokset tässä nimenomaisessa tapauksessa enintään 20% parempia, kun neutraaliakseli on matalimmillaan kuvan 1 mukaisessa tilanteessa. Kirjoittaja kuitenkin suosittelee laskemaan tämän esimerkin suuresta rajoittuneisuudesta johtuen puristetun ja taivutetun WQ-profiilin taivutuskestävyyden eurokoodin kaavoilla.

## Liite 4. Puristetun ja taivutetun suorakaideprofiilin plastinen taivutuskestävyys

Tämä liite toimii liitteen 3 ymmärtämistä helpottavana esimerkkinä. Tässä liitteessä todistetaan, että puristuksen vaikutus taivutuskestävyyteen voidaan huomioida suorakaiteen tapauksessa kaavalla:

$$M_{N.Rd} = M_{pl.Rd} \left[ 1 - \left( \frac{N_{Ed}}{N_{pl.Rd}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

Todistus suoritetaan yksinkertaisen suorakulmioesimerkin avulla, joka on puristettu ja taivutettu rakenne. Lasketaan ensin taivutusvastus puhtaan taivutuksen mukaisesti tilanteessa, jossa neutraaliakseli puolittaa poikkileikkauksen pinta-alan kuvan 1 mukaisesti.



Kuva 1. Puhtaasti taivutetun suorakulmiopoikkileikkauksen jännitysjaakauma ja neutraaliakseli.  
Kuva: Mikko Kähkönen.

$$W_{pl,y} = b * \frac{h}{2} * \left( \frac{h}{2} * \frac{1}{2} \right) + b * \frac{h}{2} * \left( \frac{h}{2} * \frac{1}{2} \right) \quad (2)$$

$$= \frac{bh^2}{8} + \frac{bh^2}{8} \quad (3)$$

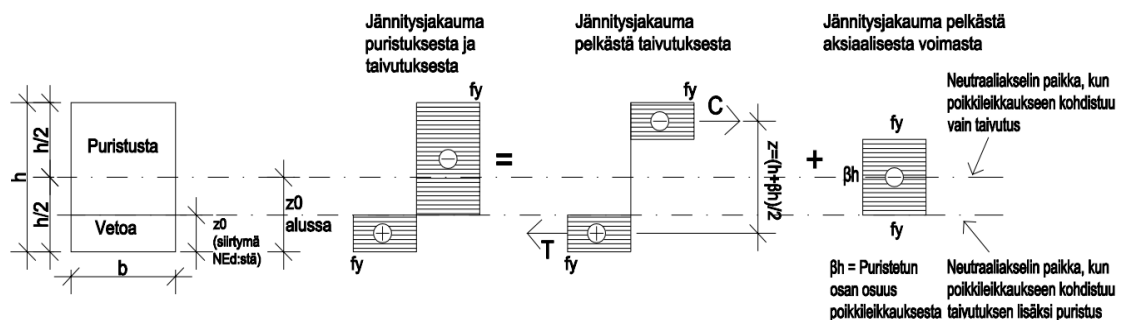
$$= \frac{2bh^2}{8} \quad (4)$$

$$= \frac{bh^2}{4} \quad (5)$$

Puhtaasti taivutetun rakenteen plastinen taivutuskestävyys lasketaan eurokoodin SFS-1993-1-1 kaavalla 6.13:

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6)$$

Lasketaan tämän jälkeen taivutuskestävyys, kun puristava voima vaikuttaa poikkileikkaukseen. Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2. Puristuksen vaikutus plastisen neutraaliakselin sijaintiin. Kuva: Mikko Kähkönen.

Puristavan voiman suuruus vaikuttaa siihen, kuinka isolle osalle poikkileikkausta puristava voima kohdistuu:

$$N_{Ed} = b\beta h f_y \quad (7)$$

Ratkaistaan kaavasta puristetun osan korkeus:

$$\beta = \frac{N_{Ed}}{b h f_y} \quad (8)$$

Kokonaispuristusvoiman C tulee olla yhtä suuri kuin kokonaisvetovoiman T:

$$C = T = b h \frac{(1-\beta)}{2} f_y \quad (9)$$

Kokonaisvetovoimien etäisyys toisiinsa on:



$$z = \frac{h+\beta h}{2} \quad (10)$$

Koska puristusvoima vähentää käytettävissä olevaa taivutuskapasiteettia, lasketaan pienennetty taivutuskestävyys kokonaispuristusvoiman etäisyytenä vastakkaiseen kokonaisvetovoimaan, jotka ovat suuruudeltaan yhtä suuret ja siis toisensa kumoavat. Laskenta voidaan suorittaa myös toisinpäin. Lasketaan pienennetty taivutuskestävyys kokonaispuristusvoiman etäisyytenä kokonaisvetovoimaan:

$$M_{N.Rd} = C * z \quad (11)$$

$$= \left( bh * \frac{(1-\beta)}{2} f_y \right) * \left( \frac{h+\beta h}{2} \right) \quad (12)$$

$$= \left( \frac{(bh-bh\beta)f_y}{2} \right) \left( \frac{h+\beta h}{2} \right) \quad (13)$$

$$= \left( \frac{(bhf_y-bh\beta f_y)}{2} \right) \left( \frac{h+\beta h}{2} \right) \quad (14)$$

$$= \frac{bh^2 f_y + bh^2 f_y \beta - bh^2 f_y \beta - bh^2 \beta^2 f_y}{2*2} \quad (15)$$

$$= \frac{bh^2 f_y - bh^2 \beta^2 f_y}{4} \quad (16)$$

$$= \frac{1}{4} bh^2 f_y (1 - \beta^2) \quad (17)$$

$$= \frac{1}{4} bh^2 f_y \left[ 1 - \left( \frac{N_{Ed}}{bh f_y} \right)^2 \right] \quad (18)$$

Kun  $0,25 * bh^2 f_y$  ja  $bh f_y$  jaetaan osavarmuuskertoimella  $\gamma_{M0}$ , voidaan kaava kirjoittaa muodossa:

$$= M_{pl.Rd} \left[ 1 - \left( \frac{N_{Ed}}{N_{pl.Rd}} \right)^2 \right] \quad (19)$$

Vertaamalla kaavaa eurokoodin SFS-EN 1993-1-1 kaavaan 6.32 voidaan todeta, että nimenomaan suorakaiteen plastista taivutuskestävyyttä voidaan pienentää tämän menetelmän avulla. [5, s. 53 ja 58.]