

# Lavetin siirtolaite

LAB-ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK), Konetekniikka

2022

Jarmo Pukki

## Tiivistelmä

Tekijä(t) Pukki, Jarmo	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Valmistumisaika 2022
	Sivumäärä 30	
Työn nimi <b>Lavetin siirtolaite</b>		
Tutkinto ja koulutusala Insinööri (AMK)		
Toimeksiantajan nimi, titteli ja organisaatio (jos opinnäytetyöllä on toimeksiantaja) Terästorni Oy		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella rakenneputkiristikko mallinen lisävaruste kurottajaan, joka voidaan helposti tuottaa konepajalla. Työn painopiste on selkeästi rakennesuunnittelussa eurokoodien mukaisesti, mutta opinnäytetyössä esiintyy myös hieman tuotesuunnittelua mallin analysoinnin ohessa ja konepajavalmistuksen kannalta työpiirustukset.</p> <p>Tuotteen reunaehtojen mukaisesti suunnitellun tuotteen saamiseksi konepajavalmistukseen on haluttu korostaa yksinkertaisten muotojen, keveiden ja lujuusominaisuuksiltaan käytännöllisten materiaalien käyttöä, jossa huomioidaan ympäristöystävällisyys sekä kierrätettävyyttä lisäksi valmistettavuuden kannalta oltava mahdollista toteuttaa.</p> <p>Näiden vaatimusten täyttämiseksi on päädytty teräsrakenneputkien monipuoliseen mitta- sekä teräsvalikoimien tarjontaan, yhdistettynä kustannustehokkuuteen saadaan tuotantoystävällinen teräsrakennetuote työmaa olosuhteisiin ja käyttöön.</p>		
Asiasanat lisävaruste, rakennesuunnittelu, teräsrakenneputki, konepajavalmistus		

## Abstract

Author(s) Pukki, Jarmo	Type of Publication Thesis, UAS	Published 2022
	Number of Pages 30	
Title of Publication <b>Carriage Adapter</b>		
Degree and field of study Mechanical Engineering		
Name, title and organisation of the client (if the thesis work is commissioned by another party) Terästorni Oy		
Abstract <p>The purpose of the thesis was created and design an appliance for telehandler which provide solution of independency of other contractors and meet demands of worksite organizing.</p> <p>The goal was designing compatible product for Terästorni Oy existing semitrailers.</p> <p>Framework of thesis was structural designing with simplicity solution to find realistic strains. These decisions were examined by according to Eurodes.</p> <p>Emphasizing manufacturing-based solutions, reusable, economical and widely available materials of reseller stocks.</p> <p>Structural pipes were found the most practical and great performance for this purpose.</p>		
Keywords attachment, design, square hollow sections, fabrication		

## Sisällys

1	Johdanto.....	4
1.1	Terästorni Oy.....	4
1.2	Tavoite.....	4
1.3	Menetelmä.....	5
1.4	Rajaus .....	5
2	Kuormitus .....	6
3	Materiaalin ja profiilin valinta.....	7
4	Mitoitus .....	8
4.1	Rajatilamitoitus ja osavarmuusluvut.....	8
4.2	Poikkileikkausluokka.....	10
	Poikkileikkausluokan määrittämiseksi tarvittava epsilonin arvo saadaan kaavasta: .....	11
4.3	Normaalivoima.....	11
4.3.1	Vetokestävyys .....	11
4.3.2	Puristuskestävyys (ilman nurjahdusta).....	12
4.3.3	Nurjahduskestävyys.....	12
4.4	Taivutus.....	13
4.4.1	Neliön muotoisen rakenneputken taivutuskestävyys.....	13
4.4.2	Rakenneputken taivutuskestävyys kahden akselin suhteen.....	14
4.4.3	Kiepahduskestävyys.....	14
4.5	Leikkaus .....	16
4.5.1	Neliön muotoisten rakenneputkien leikkauskestävyys.....	16
4.5.2	Neliön muotoisten rakenneputkien plastinen leikkauskestävyys .....	17
4.5.3	Neliön muotoisten rakenneputkien leikkauslommahduskestävyys .....	17
4.6	Vääntömomentti .....	18
4.6.1	Neliön muotoisten rakenneputkien plastinen vääntökestävyys.....	18
4.6.2	Neliön muotoisten rakenneputkien vääntölommahduskestävyys.....	18
4.7	Sauvan kestävyys voimasuureyhdistelmille (estetty nurjahdus ja kiepahdus) ....	19
4.7.1	Leikkausvoima ja vääntömomentti, kun leikkauslommahdus ei pienennä leikkauskestävyyttä.....	19
4.7.2	Taivutusmomentti ja normaalivoima.....	20
4.8	Sauvan kestävyys (sauva voi nurjahtaa tai kiepahtaa).....	20
4.8.1	Taivutusmomentti ja normaalivoima.....	20
5	Tuotesuunnittelu .....	24
5.1	Pistekuorma kestävyys .....	24
5.2	Pistekuorman ja taivutusmomentin yhteisvaikutus .....	26
5.3	Rakenneosien sallitut suunnittelujännitykset.....	26

5.4	Hitsatut liitokset .....	27
5.5	Solidworks mallinnus .....	27
6	Yhteenveto .....	29
	Lähteet .....	30

## Symboliluettelo, lyhenteiden ja merkkien selitykset

$M_{t.Ed.max}$	Lokaalin koordinaatistossa esiintyvä yhdistetyn kuorman vääntömomentti
$M_{z.Ed}$	Lokaalin koordinaatiston pystysuuntainen taivutusmomentti
$M_{y.Ed}$	Lokaalin koordinaatiston sivuttaissuuntainen taivutusmomentti
$N_{Ed}$	Rakenneputkessa esiintyvä normaalivoiman ominaisarvo
$V_{Ed}$	Laitteeseen kohdistuva sivuttaissuuntainen ominaisarvo

## 1 Johdanto

### 1.1 Terästorni Oy

Lappeenrannassa sijaitseva konepaja, joka on erikoistunut paperi- ja selluteollisuuden säiliöiden ja painelaitteiden kokonaistoimituksiin kotimaahan ja ulkomaille vuodesta 1968.

### 1.2 Tavoite

Kurottajaan suunniteltava lavetinsiirto lisävaruste tyhjiä puoliperävaunu lavettien siirtoon työmaalla kustannustehokkuutta lisäävästi. Lisävarusteen tarkoituksena on vähentää tarvetta kuljetusfirman ylimääräiseltä työllistämiseltä työmaan lavettien organisoimiselta vaippalevyjen toimituksen yhteydessä. Materiaalin ja leveäkuljetusten tilaamisen helpottaminen oikeaan aikaan työmaalle ilman vaippalevyjen ja lavettien varastointia työmaalla. Raskaiden vaippalevyillä lastattujen lavettien siirtoihin tarvitaan aina kuljetuskalustoa nostopaikkojen ja varastointialueen välillä. Raskaiden lavettien siirtelyssä työmaalla on myös omat turvallisuus ja materiaalin vahingoittumisen riskit, joita voidaan välttää, kun pystytään itsenäisesti siirtämään tyhjiä lavetteja kurottajaan helposti asennettavalla lisävarusteella. Työmaalla esiintyvä yleinen tilanne kuvassa 1.



Kuva 1. Työmaalla tehtävä organisointi vaikuttaa kokonaisuuteen.

Lisävarusteen käytön pitää olla vaivatonta eikä kurottajan puomia tulisi tarvita nostaa lisävarusteen käytön yhteydessä näkökentän esteeksi sivulle turvallisen siirtelyn vuoksi. Huomioiden myös kurottajan tehojen riittäisyys.

Tarkoituksena on saada kevyt ja yksinkertainen tuote, joka on valmistusystävällinen ja taloudellisesti helposti toteutettavissa konepaja valmistukseen. Käyttötarkoituksena

Terästornin omille jo oleville laveteille kumminkin niin, että voidaan siirrellä kaikkia saman kokoluokan lavetteja tarvittaessa.

### 1.3 Menetelmä

Opinnäytetyössä käytettävänä menetelminä käytetään kuormitusten aiheuttamien rasitusten tarkasteluun lujuusoppia. Tiedostaen, että jokainen voima, myös pienetkin voimat saavat rakenneputkessa aikaan muodonmuutoksia. Muodonmuutos, joka kuormituksen kasvaessa lopulta tekee tuotteen tarkoitukseensa kelpaamattomaksi, määrittää kriittisen kohdan. Alustavassa tarkastelussa rakenneputki mitoitetaan taivutusvastuksen mukaan koska rakenneputkelta vaaditaan taivutuslujuutta.

Alustava valinta mitoitetaan yhteiseurooppalaisen teräsrakenteiden suunnitteluohjeen, Eurocode 3 (EN 1993) teräsrakenteiden osien mukaisesti. Lopuksi taipumat ja suurimmat jännitykset analysoidaan Solidworks FEM toiminnolla. Eurocoden suunnitteluohjeet ovat voimassa teräsrakenteille, jotka ovat valmistettu standardin EN 1990 mukaisesti. Lisäksi huomioidaan ympäristöministeriön Suomen kansallisten liitteiden ohjeistus tarkastelussa. Tarkastelut suoritetaan SSAB Domex Tube rakenneputkien EN-1993-käsikirjan mukaisten ohjeistuksien mukaan.

### 1.4 Rajaus

Tuotesuunnittelu rajataan kurottajan alustavaunuun kiinnitettävän siirtolaite lisävarustukseen. Mitoituksessa huomioidaan kurottajan kokonaisteho ja lisäksi työmaa olosuhteissa vaikuttavat työmaan maasto olosuhteet. Olosuhteiden kautta määritetään tuotteeseen kohdistuvat isoimmat kuormitukset, joiden avulla mitoitetaan teräsrakenne varmalla puolella kimmoteorian mukaisesti. Tuotesuunnittelu kattaa työpiirustukset.



## 2 Kuormitus

Lujuusopin avulla suunnitellaan ja mitoitetaan tarpeeksi lujaksi tai liiaksi muotoaan muuttumattomaksi. Mitoitusta ei pidä tehdä liian lujaksi, jolloin saadaan suurimittainen, painava ja kallis lopputulos. Tuotteen mitoituksen alkuarvot tulee selvittää työmaalta saatujen alkutietojen perusteella tarkasti ja todellisiksi. Lähtökohtana käytetään Terästornin omapainoltaan raskainta puoliperävaunu lavettia. Puoliperävetoauton vetopöydälle kohdistuu 2 100 kg lavetin ollessa tasapainossa, jolloin telille kohdistuu myös 2 100 kg kuorma. Lavetin omapainoksi saadaan 4200 kg.

Työmaalla kuljetusfirman on mahdollista siirtää lastissa oleva lavetti ylämäkeen jossa 5 metrin matkalla nousua on 1 metri.

Kurottajan nostokyky voidaan tarkistaa kurottajan käyttäjän ohjekirjasta. Ilma tukijalkoja, kun puomi on sisään ajettuna ja nostokorkeus on alle 4,5 metriä. Voidaan kurottajalla turvallisesti käsitellä kuormia, joiden massa on alle 3 500 kg. Siirtolaitteen omapaino tulee myös huomioida.

Mitoituksessa huomioidaan myös tuotteen käytön yhteensopivuus yleisesti porrastettuihin puoliperävaunu lavetteihin standardien SFS-ISO 1726-1 ja SFS-ISO 1726-2 kautta. Puoliperävaunussa standardi määrittelee vetotapin paikoituksen, joka tulee huomioida rakenteen ulottuvuudessa.

Tuote on suunniteltu vain tyhjiin lavettien turvalliseen siirtoon hitailla nopeuksilla. Tuotetta ei saa käyttää nostovälineenä mikä muuttaa tuotteen suunnittelua määritteleviä vaatimuksia.

### 3 Materiaalin ja profiilin valinta

Tiedetään, että ontto rakenne ei paljoakaan heikennä kestävyyttä. Profiilin neutraaliakselilla jännitys on pieni ja aine on huonosti hyväksikäytetty. Rakenneputkien yksinkertainen geometria keveänä ja edullisena rakenteena lujuusominaisuuksineen soveltuu hyvin teräsrakenteisiin. Lisäksi rakenneputkien tarjoama laaja mittavalikoima yhdistettynä rakenneputkien valmistuksessa käytettävien eri teräslajien kanssa voidaan saavuttaa rakenteelle suuri nurjahduskestävyys. Pidemmälläkin jänneväleillä rakenneputkella on hyvä vääntöjäykkyys. Suljettu profiili lisää rakenneputken kiepahduskestävyyttä. Rakenneputki ratkaisulla saavutetaan kevyt ja jäykkä rakenne, jota tarvitaan tämänlaisessa tuotesuunnittelussa. Rakenteen helppoa optimoimista painon, lujuuden ja jäykkyyden mukaan profiilin ulkomittoja muuttamatta, voidaan pelkästään muuttaa seinämäpaksuuksia. Rakenneputkien laaja valikoima helpottaa suunnittelutyötä.

Tuote mitoitetaan S355 teräkselle. Teräslajiksi voidaan valita suurempi lujuusluokka mahdollisuuksien sekä tarjonnan mukaan. Mitoituksessa pysytään kumminkin turvallisesti myötölujuuden varmalla puolella.

Teräsrakenteiden hitsatuissa liitoksissa esiintyy taivutusmomenttia ja aksiaalista kuormitusta mikä vaikuttaa liitoksen jäykkyyteen. Liitos vaikuttaa rakenneputkien leveyksien suhteeseen ja seinämä paksuuksiin, jolla voidaan toteutettua jäykempi liitos. Nämä valinnat vaikuttavat liitoksen hitsaukseen, joka yleensä kiertää rakenneputken piirin ympäri joko päitäishitsinä, pienahitsinä tai näiden yhdistelmänä. Neliön ja suorakaiteen muotoisilla rakenneputkilla liitoskohdissa esiintyy myös kylkihitsausta. Eurocoden mukaan kylmämuovattua pyöristettyä nurkka-aluetta voidaan hitsata kummaltakin puolelta viisinkertaisesti seinämäpaksuuden kokoisella hitsillä, mikäli Eurocoden 1993-1-8 vaatimukset toteutuvat. Muussa tapauksessa kylmämuovattut alueet täytyy esivalmistella normalisoinnilla ennen hitsaustöitä. SSAB Domex Tube rakenneputket täyttävät Eurocoden vaatimukset, jolloin vältetään tältä lisätyötä (Ongelin & Valkonen 2016, 200).

## 4 Mitoitus

### 4.1 Rajatilamitoitus ja osavarmuusluvut

Jotta rakenne kestäisi ilman murtumista tai suuria muodonmuutoksia tulee selvittää kuormitukset ja kuormayhdistelmät mahdollisimman tarkasti. Näiden kuormitusten avulla tarkastellaan alustavasti suunniteltua mallia. (Ongelin & Valkonen 2016, 47).

Kuormat ovat ajan ja paikan suhteen vaihtelevia suureita. Työmaa oloissa vaikuttavat voimasuureiden muutokset johtuvat esimerkiksi maaston epätasaisuudesta sekä myös voiman suunnan muutoksista, jotka huomioidaan kuormitusten määrittelyssä.

$$F_{d.tukivoima} = (2100 \text{ kg} + 315 \text{ kg}) \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \approx 23\,680 \text{ N} \quad (1)$$

$$F_{d.telivoima} = 2100 \text{ kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \approx 20\,590 \text{ N} \quad (2)$$

Tyhjän lavetin rinnepaino, kun rinne nousee metrin viiden metrin matkalla:

$$F_m = F_{d.telivoima} \times \cos(11,3^\circ) \approx 20\,190 \text{ N} \quad (3)$$

Vierimiskitkavastus:

$$\frac{\mu_{sora}}{\text{kumi}} = 0,5$$

$$F_v = F_m \times \frac{\mu_{sora}}{\text{kumi}} \approx 10\,100 \text{ N} \quad (4)$$

Rinnevastus (otetaan huomioon myös siirtolaitteen oma massa):

$$F_r = F_{d.tukivoima} \times \sin(11,3^\circ) \approx 4\,645 \text{ N} \quad (5)$$

Kokonaisvastusvoima:

$$F_{d.lavetti} = F_v + F_r \approx 14\,740 \text{ N} \quad (6)$$

Kurottajalta vaadittu teho:

$$(23\,680 \text{ N} + 14\,740 \text{ N}) \times \frac{6 \text{ m}}{3,6 \text{ s}} \approx 64 \text{ kW} \leq 74,2 \text{ kW} \quad (7)$$

Kuorman ulkoinen vaikutus rakenteeseen ilmenee voiman yrityksenä siirtää rakennetta voiman vaikutussuoran suunnassa sekä yrityksenä pyörittää rakennelmaa akselin ympäri. Yksinkertaistetussa tarkastelussa voidaan symmetrisessä rakennelmassa nostovoiman aiheuttama kuorma puolittaa puolittain.

Puolikkaan kuorman aiheuttama taivutusmomentti kiinnityspisteessä:

$$M_{\text{kiinnistyspisteessä}} = 11\,840\text{ N} \times 2.12\text{ m} \approx 25\text{ kNm} \quad (8)$$

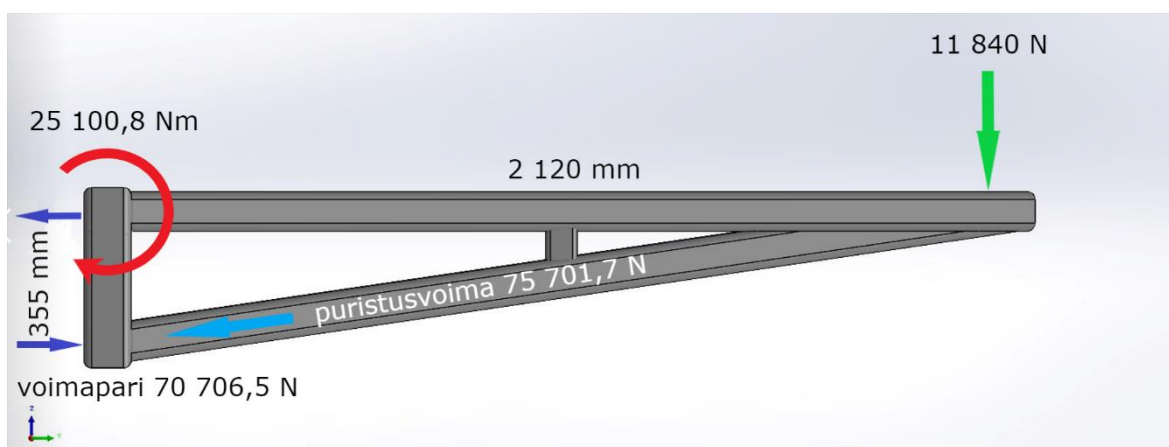
Taivutusmomentin avulla saadaan tukivoima:

$$F_{\text{voimapari}} = \frac{25\,100,8\text{ Nm}}{0,335\text{ m}} \approx 75\text{ kN} \quad (9)$$

Kriittisen rakenneputken puristusvoima:

$$F_{\text{puristusvoima}} = \frac{74\,927,7\text{ N}}{\cos(8.2^\circ)} \approx 76\text{ kN} \quad (10)$$

Suunniteltavaan rakenteeseen vaikuttavat kuormat ja voimat on kuvattu kuvassa 2.



Kuva 2. Lavetin siirtolaitteen ulkoiset ja sisäiset voimat

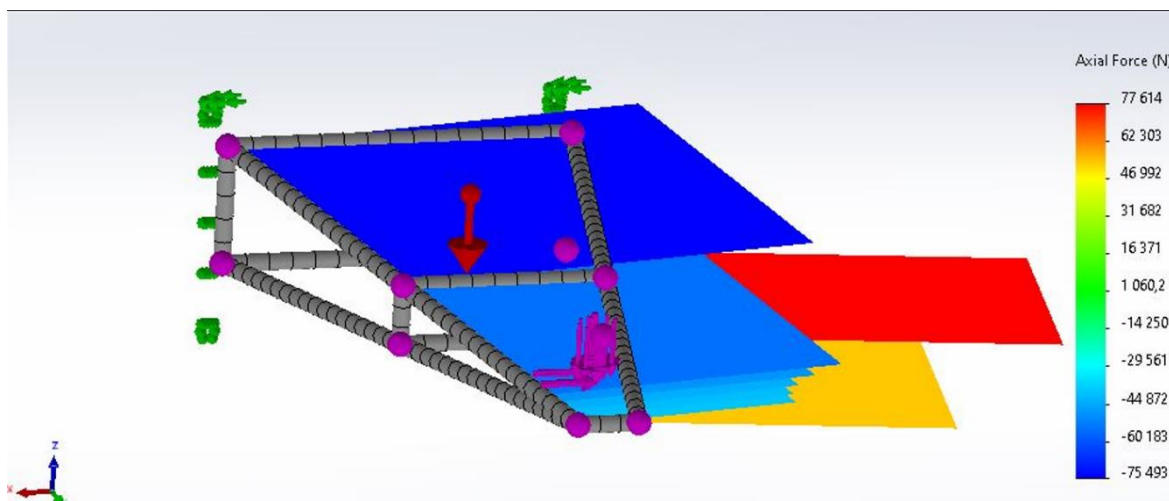
Rakenneputkelta vaadittava taivutusvastus:

$$W_{el.min} = \frac{25\,100,8\text{ Nm}}{355\text{ MPa}} \approx 70\,707\text{ mm}^3 \quad (11)$$

Valitaan RHS 100x100x8 rakenneputki, jossa on riittävä elastinen taivutusvastus:

$$W_{el.min} < W_{el} = 73\,190\text{ mm}^3 \quad (12)$$

Rakenteen kestävyys tarkastelua varten osavarmuuslukuna käytetään määrävän muuttuvan kuorman ominaisarvoa. Tämä ominaisarvo tuo enemmän varmalluutta puolella olevan tuloksen. Käytössä laitteeseen kohdistuu todellisuudessa väsyttäviä kuormituksia, jotka tarkastelussa huomioidaan ominaisarvoina ja osavarmuuslukuina. Mallinnuksessa käytetään vain ominaisarvoja esivalittuun rakenneputkeen kuvan 3 mukaisesti.



Kuva 3 Solidworks FEM-analyysin ominaisarvot ovat lähellä käsin laskettuja arvoja.

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (13)$$

Kriittisen rakenneputken aksiaalinen sisäinen voima:

$$N_{Ed} = \gamma_{Q,1} \times Q_{k,1} = 1,5 \times 75\,711\,N \approx 114\,kN \quad (14)$$

$$N_{Ed, vetoa} = \gamma_{Q,1} \times G_{k,2, vetoa} = 1,5 \times 74\,927,7\,N \approx 112\,kN \quad (15)$$

Rakenneputken kohdistuva kohtisuora (puhdas leikkaus) voima:

$$V_{Ed} = \gamma_{Q,1} \times Q_{k,2} = 1,5 \times 7\,370\,N \approx 11\,kN \quad (16)$$

Lavetin nostosta aiheutuva taivutusmomentti:

$$M_{z,Ed} = \gamma_{Q,1} \left( \frac{F_{d,tukivoima} \times 1,003m \times 0,171m}{2 \times 1,174m} \right) \approx 2\,595\,kNm \quad (17)$$

Lavetin aiheuttama kohtisuora sivuttainen taipuma:

$$M_{y,Ed} = \gamma_{Q,1} \left( \frac{F_{d,lavetti} \times 1,003m \times 0,171m}{2 \times 1,174m} \right) \approx 1\,615\,kNm \quad (18)$$

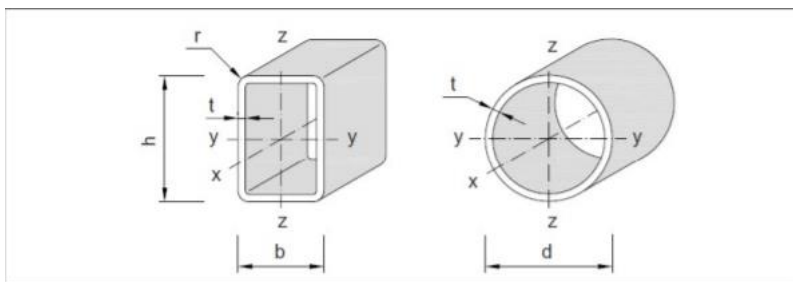
## 4.2 Poikkileikkausluokka

Mitoituksessa laskelmat suoritetaan varmalla puolella ja rakenneputken maksimi jännitykset rajataan myötölujuuden mitoitusarvoon. Mitoitetaan kimmoteorian mukaisesti elastisella alueella, jolloin mitoitus suoritetaan poikkileikkausluokassa 3 missä koko poikkileikkaus on tehollinen. Välttämällä poikkileikkaus luokaa 4 joka lisää mitoitustyötä. Poikkileikkausluokka

rakenneputkelle määritellään kahdelta reunalta tuettujen puhtaan puristuksen mukaan, jolloin saadaan varmalla puolella oleva arvio (Ongelin & Valkonen 2016, 53).

*Kimmenteorian mukaisen kestävyuden todentaminen on aina mahdollista kaikissa poikkileikkausluokissa edellyttäen, että poikkileikkausluokassa 4 käytetään tehollisen poikkileikkauksen ominaisuuksia (SFS-EN 1993-1-1 2005, 48).*

Rakenneputken poikkileikkauksen koordinaatisto eroaa mallin koordinaatistosta kuvan 3 mukaisesti.



Kuva 4 rakenneputken koordinaatisto ja poikkileikkauksen merkinnät.

Poikkileikkausluokan määrittämiseksi tarvittava epsilonin arvo saadaan kaavasta:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{355 \text{ MPa}}} = 0,814 \quad (19)$$

tai esimerkiksi SSAB rakenneputki käsikirjasta valmiina arvona taulukoista.

SHS 100x100x8 rakenneputkelle saatava poikkileikkausluokka riippuu leveyspaksuussuhteista:

$$\frac{b}{t} \leq 33\varepsilon \quad (20)$$

$$12,5 \leq 26,849$$

Rakenneputki kuuluu poikkileikkausluokkaan 1.

## 4.3 Normaalivoima

### 4.3.1 Vetokestävyys

Vedettyyn poikkileikkaukseen hoikkuudella ei ole merkitystä. Poikkileikkaus toimii tehollisena poikkileikkausluokasta riippumatta. Vetovoiman mitoitusarvo ei kumminkaan saa

ylittää kestävyysrajoitettua mitoitusarvoa. Teräslaadun myötölujuus on rajoittava mitoitusarvo (Ongelin & Valkonen 2016, 65):

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 355 \text{ MPa} \quad (21)$$

$$\sigma_{vetojännitys} = \frac{N_{Ed,veto}}{A} = \frac{112\,406 \text{ N}}{2\,724 \text{ mm}^2} \approx 41 \text{ MPa} \quad (22)$$

Vedetyn rakenneputken mitoitusehto täyttyy:

$$\sigma_{vetojännitys} \leq f_{yd}$$

#### 4.3.2 Puristuskestävyys (ilman nurjahdusta)

Puristuskestävyys ilman nurjahdusta tarkastellaan poikkileikkauksen kestävyttä huomioiden vain taso-osien mahdollisen lommahduksen vaikutusta kestävyteen.

Poikkileikkauksen puristuskestävyyden mitoitusarvoa kriittisessä rakenneputkessa verrataan puristetun rakenneputken mitoitusarvoon (Ongelin & Valkonen 2016, 67):

$$N_{c,Rd} = A \times \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \approx 967 \text{ kN} \quad (23)$$

$$N_{Ed,puristus} \approx 114 \text{ kN}$$

Puristetun rakenneputken mitoitusehto täyttyy:

$$N_{Ed} \leq N_{c,Rd}$$

#### 4.3.3 Nurjahduskestävyys

Rakenneputken erinomaisuus teräsrakenteissa puristussauvana johtuu rakenneputken rakenteesta, jossa materiaali sijaitsee kauempana poikkileikkauksen keskipisteestä. Rakenneputken suljetun profiilin hyvä vääntöjäykkyys pienentää vääntönurjahduksen tai taivutusvääntönurjahduksen mahdollisuutta ja riittääkin, että tarkastetaan rakenneputken taivutusnurjahdus kummankin pääjäyhysakselin suhteen.

Kriittisen puristetun rakenneputken puristusvoiman mitoitusarvoa verrataan aksiaalisesti puristetun sauvan nurjahduskestävyyden mitoitusarvoon.

Poikkileikkausluokissa 1, 2 ja 3 ei tarvitse laskea tehollista poikkileikkausta vaan koko poikkileikkaus on tehollinen.

Rakenneputken nurjahduspituudeksi määrittämiseksi varmalla puolella suositellaan käyttämään teoreettista nurjahduspituutta ilman liitosten jäykkyyden huomioimista (Ongelin & Valkonen 2016, 73):

$$L_{cr} = 2\,348\text{ mm}$$

Kimmenteorian mukainen kriittinen nurjahduskuorma taivutusnurjahdukselle:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} = 1\,376\text{ kN} \quad (24)$$

Muunnettu hoikkuus poikkileikkausluokissa 1,2 ja 3 (kaikki rakenneputket):

$$\lambda = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} = 0,838 \quad (25)$$

Eurocode 3:n suosittelema arvo kylmämuovatuille rakenneputkille kaikissa pääakselin suunnissa lujuusluokille S235 - S460 käytettävänä nurjahduskäyrää c, jolloin saadaan epätarkkuustekijäksi  $\alpha = 0,49$  (SFS-EN 1993-1-1 2005, 21).

$$\Phi = 0,5 \times [1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \lambda^2] = 1,008 \quad (26)$$

Nurjahduskestävyyden pienennystekijä:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} = 0,638 \leq 1 \quad (27)$$

Nurjahduskestävyyden mitoitusarvo poikkileikkausluokissa 1, 2 ja 3 (kaikki rakenneputket):

$$N_{b.Rd} = \frac{\chi Af_y}{\gamma_{M1}} \approx 617\text{ kN} \quad (28)$$

$$N_{Ed.puristus} \approx 114\text{ kN}$$

Kriittisen puristetun rakenneputken mitoitusehto nurjahduksessa täyttyy

$$N_{Ed.puristus} \leq N_{b.Rd}$$

## 4.4 Taivutus

### 4.4.1 Neliön muotoisen rakenneputken taivutuskestävyys

Rakenneputken soveltuvuus taivutettuihin teräsrakenteisiin on hyvä varsinkin, kun rakenneputkeen kohdistuu useamman akselin suuntaisia kuormituksia (Ongelin & Valkonen 2016, 80).



Poikkileikkauksen taivutuskestävyyden mitoitusarvo poikkileikkausluokassa 3:

$$M_{c.Rd} = M_{el.Rd} = \frac{W_{el}f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{73,19 \times 10^3 \text{ mm}^3 \times 335 \text{ MPa}}{1} \approx 26 \text{ kNm} \quad (29)$$

$$M_{z.Ed} = 2\,595 \text{ Nm}$$

$$M_{y.Ed} = 1\,615 \text{ Nm}$$

Taivutusmomentin kuormittaman poikkileikkauksen mitoitusehto täyttyy kummankin akselin suhteen

$$M_{Ed} \leq M_{c.Rd}$$

#### 4.4.2 Rakenneputken taivutuskestävyys kahden akselin suhteen

Poikkileikkausluokassa 3 ilman leikkausvoimaa esiintyvää rakenneputkea, aksiaalinen jännitys ei saa ylittää myötölujuuden mitoitusarvoa (Ongelin & Valkonen 2016, 84):

$$\sigma_{x.Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (30)$$

$$\sigma_{x.Ed} = \frac{113\,567 \text{ N}}{2\,724 \text{ mm}^2} \approx 42 \text{ MPa} \quad (31)$$

$$\frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{355 \text{ MPa}}{1} = 355 \text{ MPa} \quad (32)$$

Neliönmuotoiselle rakenneputkelle tarkasteltavassa poikkileikkaukskohdassa molemman akselin suuntaisten taivutusmomenttien hyväksikäyttöasteiden lineaarisen summan tulee jäädä alle 1

$$M_{y.Ed} = \gamma_{Q,1} \left( \frac{Fab}{l} \right) = 1,5 \left( \frac{14\,740 \text{ N} \times 1003 \text{ mm} \times 171 \text{ mm}}{2348 \text{ mm}} \right) = 1\,615 \text{ Nm} \quad (33)$$

$$M_{z.Ed} = \gamma_{Q,1} \left( \frac{Fab}{l} \right) = 1,5 \left( \frac{23\,680 \text{ N} \times 1003 \text{ mm} \times 171 \text{ mm}}{2348 \text{ mm}} \right) = 2\,595 \text{ Nm} \quad (34)$$

$$\frac{M_{y.Ed}}{M_{el.y.Rd}} + \frac{M_{z.Ed}}{M_{el.z.Rd}} = \frac{1\,609 \text{ Nm}}{22\,310 \text{ Nm}} + \frac{2\,563 \text{ Nm}}{22\,310 \text{ Nm}} = 0,162 \leq 1 \quad (35)$$

#### 4.4.3 Kiepahdukkestävyys

Taivutettaessa rakenneputkea z-akselin suhteen puristettu laippa saattaa menettää stabiiliutensa ja nurjahtaa y-akselin suunnassa, jolloin rakenneputki samalla kiertyy x-akselin suunnassa ympäri, tätä kutsutaan kiepahdukseksi.

Rakenneputken suljettu profiiliin ansiosta rakenneputkella on suuri vääntöjäykkyys, joka ehkäisee hyvin kiepahdusta. Kiepahdukseen vaikuttavia tekijöitä ovat rakenneputken pituus (jänneväli), kuormitus, profiilin poikkileikkausarvot, rakenneputken tuenta ja materiaaliominaisuudet. Rakenneputken poikkileikkauksen suuremman korkeuden suhde leveyteen nähdessä mahdollistaa rakenneputken kiepahduksen, jolloin rakenneputken kiepahdus tapahtuu vahvemman akselin suhteen. Määräävä kuormitus on vakiomomentti. Suorakaiteen muotoisilla rakenneputkilla, jos suhde  $b/h$  on pieni saattaa kiepahdus muodostua mitoittavaksi tekijäksi (Ongelin & Valkonen 2016, 90).

*Sauvat, joiden puristettu laippa on riittävästi tuettusivusuunnassa, eivät ole alttiit kiepahdukselle. Lisäksi tietyn tyyppiset sauvat, kuten nelion muotoiset tai pyöreät rakenneputket sekä hitsaamalla valmistetut pyöreät profiilit tai nelion muotoiset koteloprofiilit eivät ole alttiita kiepahdukselle (SFS-EN 1993-1-1 2005, 65).*

Kriittisen rakenneputken taivutusmomentin mitoitusarvoa  $M_{Ed}$  verrataan kiepahduskestävyyden mitoitusarvoon  $M_{b,Rd}$  joka lasketaan vahvemman akselin suhteen taivutetulle sivusuunnassa tukemattomalle rakenneputkelle. Kimmoteorian mukainen kiepahduskestävyyden mitoitusarvo  $M_{cr}$  lasketaan myös vahvemman akselin suhteen, jossa kiinnittimen reikiä päissä ei tarvitse huomioida (Ongelin & Valkonen 2016, 91).

Rakenneputken päiden tuennasta riippuva tehollisen pituuden kerroin saadaan taulukosta 2.16 (SSAB Domex Tube Rakenneputket käsikirja 2016, 94).

$$k = 0,5$$

Vakiot, jotka riippuvat kuormituksesta saadaan taulukosta 2.17 (SSAB Domex Tube Rakenneputket käsikirja 2016, 95).

$$C_1 = 0,712$$

$$C_2 = 0,652$$

Kun kuorma vaikuttaa rakenneputken ylälaipalla alaspäin (eli kohti vääntökeskiötä, epästabiloiva vaikutus):

$$z_g = \frac{h}{2} = \frac{100 \text{ mm}}{2} = 50 \text{ mm} \quad (38)$$

Kimnoteorian mukainen kriittinen kiepahdusmomentti:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left[ \sqrt{\frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2} - C_2 z_g \right] \quad (39)$$

$$M_{cr} = 0,712 \times \frac{\pi^2 \times 210\,000 \frac{N}{mm^2} \times 3,659 \times 10^6 mm^4}{(0,5 \times 2348 mm)^2} \times \left[ \sqrt{\frac{(0,5 \times 2348 mm)^2 \times 81\,000 \frac{N}{mm^2} \times 6\,445 \times 10^3 mm^4}{\pi^2 \times 210\,000 \frac{N}{mm^2} \times 3,659 \times 10^6 mm^4} + (0,652 \times 0,5)^2} - 0,652 \times 0,5 \right] \approx 1\,086 \text{ kNm} \quad (40)$$

Muunnettu hoikkuus:

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_{el,y} f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{73,19 \times 10^3 mm^3 \times 355 MPa}{1\,086\,000 \times 10^3 Nmm}} = 0,155 \quad (41)$$

Kiepahduskestävyyttä ei tarvitse tarkistaa (eli kiepahdus ei alenna taivutuskestävyyttä), kun rakenneputken muunnettu hoikkuuden arvo ei ylitä parametria  $\lambda_{LT,0}$  arvoa

*Suureiden arvot ja rajoitukset poikkileikkausten korkeudelle tai suhteelle h/b voidaan esittää kansallisessa liitteessä. Valssatuille tai vastaaville hitsatuille profiileille suositellaan seuraavia arvoja ja  $\lambda_{(LT,0)} = 0,4$  ja  $\beta = 0,75$  (SFS-EN 1993-1-1 2005, 67).*

## 4.5 Leikkaus

### 4.5.1 Neliön muotoisten rakenneputkien leikkauskestävyys

Leikkauskestävyyden tarkastelun menetelmät määräytyvät poikkileikkauksen kuormitusten suuntaisten uumien hoikkuudesta. Eurocoden osien EN 1993-1-1 ja EN 1993-1-5 annettujen uumien hoikkuuksien raja-arvot ovat esitetty Ruukki Hitsatut Profiilit käsikirjan poikkileikkausmerkintöjen mukaisesti (Ongelin & Valkonen 2016, 102).

Leikkauskestävyyden mitoitusehtona on, että leikkausvoiman mitoituseron murtorajatilassa tulee olla pienempi kuin plastinen leikkauskestävyyden  $V_{pl,Rd}$  tai leikkauslommahduskestävyyden  $V_{b,Rd}$  arvo (Ongelin & Valkonen 2016, 103).

Rakenneputkien muokkautumislujuutta ei hyödynnetä leikkauskestävyyden tarkastelussa. Jolloin uuman hoikkuusrajan määrittelyssä ei pienennetä uuman hoikkuutta ja pienennys tekijä  $\eta=1$  (Ongelin & Valkonen 2016, 103).

*Käytännössä vain muutamilla rakenneputkilla leikkauslommahdus muodostuu mitoitavaksi (SSAB Domex Tube Rakenneputket käsikirja 2016, 103).*

$$\frac{h}{t} \leq \frac{72\epsilon}{\eta} + 3 \quad (41)$$

$$12,5 \leq \frac{72 \times 0,814}{1} + 3 = 61,58 \quad (42)$$

Uuman leikkauslommahdusta ei tarvitse ottaa huomioon eli leikkauslommahdus ei heikennä leikkauskestävyyttä ja leikkauskestävyyden määrää plastinen leikkauskestävyys kummankin akselin suunnassa.

#### 4.5.2 Neliön muotoisten rakenneputkien plastinen leikkauskestävyys

$$A_v = 1\,362 \text{ mm}^2$$

$$V_{pl.Rd} = A_v \frac{f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 1\,362 \text{ mm}^2 \times \frac{355 \text{ MPa} / \sqrt{3}}{1} \approx 279 \text{ kN} \quad (43)$$

(Ongelin & Valkonen 2016, 103)

#### 4.5.3 Neliön muotoisten rakenneputkien leikkauslommahduskestävyys

Leikkauslommahduskestävyys muodostuu harvoin määrääväksi rakenneputkilla, jolloin voidaan Eurocode osan EN 1993-1-5 perustuvan varmallalla puolella olevan yksinkertaistetun tarkastelun mukaisesti jättää huomiotta laippojen vaikutukset ja uuman pystyjäykisteiden vaikutus huomioidaan heikoimman jäykistystavan mukaisesti (Ongelin & Valkonen 2016, 104).

Uuman muunnettu hoikkuus:

$$\lambda_w = \frac{\left( \frac{(b - (3t))}{t} \right)}{86,4\epsilon} = 0,135 \quad (44)$$

Uuman osuuden leikkauslommahduskestävyyden pienennystekijä  $\chi_w$  saadaan taulukosta 2.20 (SSAB Domex Tube Rakenneputket käsikirja 2016, 105).

$$V_{b.Rd} = V_{bw.Rd} = A_v \frac{\chi_w f_y}{\sqrt{3}\gamma_{M1}} = 1\,362 \text{ mm}^2 \times \frac{1 \times 355 \text{ MPa}}{\sqrt{3} \times 1} \approx 279 \text{ kN} \quad (45)$$

$$V_{Ed} \leq V_{pl.Rd} = V_{b.Rd} = V_{bw.Rd}$$

$$V_{Ed} = 11 \text{ kN}$$

Leikkauslommahdus ei pienennä rakenneputken leikkauskestävyyttä.

## 4.6 Vääntömomentti

Rakenneputkien suljettu profiiliin huomattavasti suurempi vääntöjäykkyys avoimiin profiileihin verrattuna tekee rakenneputkista hyvin soveltuvia rakenteisiin, jossa esiintyy vääntökuormitusta. Myös vääntökestävyyden tarkastelu on rakenneputkilla yksinkertaisempaa (Ongelin & Valkonen 2016, 111).

Vääntökestävyyden mitoitusena vääntömomentin mitoitusarvo  $M_{x.Ed}$  murtorajatilassa on oltava korkeintaan yhtä suuri kuin pienempi kuin plastinen vääntökestävyys  $M_{x.pl.Rd}$  tai vääntölommuuskestävyys  $M_{x.b.Rd}$  (Ongelin & Valkonen 2016, 111).

*Suljetun poikkileikkauksen tapauksessa, kuten rakenneputket, yksinkertaistuksena voidaan estetyin väännön vaikutukset jättää huomioon ottamatta (SFS-EN 1993-1-1 2005, 56).*

### 4.6.1 Neliön muotoisten rakenneputkien plastinen vääntökestävyys

Rakenneputken plastisuusteorian mukainen vääntökestävyys. Vääntökestävyyden tarkastelu riippuu poikkileikkauksien taso-osien hoikkeudesta kuten leikkauskestävyydessä (Ongelin & Valkonen 2016, 112).

$$12,5 \leq \frac{72 \times 0,814}{1} + 3 = 61,58$$

$$M_{x.pl.Rd} = \frac{f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} W_t = \frac{355 \text{ MPa} / \sqrt{3}}{1} \times 114,2 \times 10^3 \text{ mm}^3 \approx 23,41 \text{ kNm} \quad (46)$$

### 4.6.2 Neliön muotoisten rakenneputkien vääntölommuuskestävyys

Vääntölommuuden pienennystekijä  $\chi_t$  lasketaan kuin leikkauslomuuden kestävyyden pienennystekijä  $\chi_w$  mutta, sijoittamalla suurempi (määräävämpi) poikkileikkauksen mitta  $b$  tai  $h$  kaavaan, eli neliönmuotoisella poikkileikkauksella pienennystekijät ovat ekvivalentteja  $\chi_t = \chi_w = 1$  (Ongelin & Valkonen 2016, 113).

$$M_{x.b.Rd} = \frac{\chi_t f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M1}} W_t = \frac{1 \times 355 \text{ MPa} / \sqrt{3}}{1} \times 114,2 \times 10^3 \text{ mm}^3 \approx 23,41 \text{ kNm} \quad (47)$$

$$M_{t.Ed} = W_t \tau_t = 114,2 \times 10^3 \text{ mm}^3 \times \left( \frac{17\,762 \text{ N}}{2\,724 \text{ mm}^2} \right) \approx 0,7 \text{ kNm} \quad (48)$$

Kriittisen rakenneputken hetkellinen vapaan väännön mitoitusarvo, kun rakennetta kuormitetaan kahden pääakselin suunnasta samanaikaisesti:

$$M_{t.Ed.max} = W_t \tau_t = 97,02 \times 10^3 \text{ mm}^3 \times \left( \frac{17\,762 \text{ N} + 11\,056 \text{ N}}{2\,724 \text{ mm}^2} \right) \approx 1,2 \text{ kNm} \quad (49)$$

Vääntölohmuksen mitoitusehto toteutuu näillä kuormituksilla.

$$M_{t.Ed.max} \leq M_{x.pl.Rd} = M_{x.b.Rd}$$

#### 4.7 Sauvan kestävyys voimasuureyhdistelmille (estetty nurjahdus ja kiepahdus)

##### 4.7.1 Leikkausvoima ja vääntömomentti, kun leikkauslohmuksen ei pienennä leikkauskestävyyttä

Leikkausvoiman ja vääntömomentin yhteisvaikutus huomioidaan Eurocoden eri osissa, EN 1993-1-1 sovelletaan kun poikkileikkauksen leikkauskestävyys on plastisenleikkauskestävyyden suuruinen. Jos leikkauslohmuksen olisi pienentänyt leikkauskestävyyttä olisi Eurocoden EN 1993-1-5 osaa sovellettu (Ongelin & Valkonen 2016, 117).

Leikkausvoiman ja vääntömomentin yhteisvaikutus huomioidaan pienentämällä plastisuusteorian leikkauskestävyyttä.

Vapaan väännön osuus leikkausjännityksestä:

$$\tau_{t.Ed} = \frac{M_{t.Ed}}{W_T} = \frac{744,66 \times 10^3 \text{ Nmm}}{114\,200 \text{ mm}^3} \approx 7 \text{ MPa} \quad (50)$$

Vääntömomentin pienentämä plastinen leikkauskestävyys:

$$V_{pl.T.Rd} = \sqrt{1 - \frac{\tau_{t.Ed}}{\left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right) / \gamma_{M0}}} \times V_{pl.Rd} \quad (51)$$

$$V_{pl.T.Rd} = \sqrt{1 - \frac{6,521 \text{ MPa}}{\left(\frac{355 \text{ MPa}}{\sqrt{3}}\right) / 1}} \times 279\,180 \text{ N} \approx 275 \text{ kN} \quad (52)$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl.T.Rd}} \leq 1,0 \quad (53)$$

$$\frac{11\,056 \text{ N}}{274\,678 \text{ N}} = 0,04 \quad (54)$$

Leikkausvoima täyttää pienennetyn plastisuusteorian leikkauskestävyyden ehdon.

#### 4.7.2 Taivutusmomentti ja normaalivoima

Normaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutuksen tarkastelu perustuu poikkileikkauksen kestävyys tarkasteluun, kun rakenneputken nurjahdusta ja kiepahdusta ei huomioida. Poikkileikkausluokka määräytyy poikkileikkauksen jännitysjakautumasta. Varmalla puolella oleva tarkastelu voidaan tehdä, kun poikkileikkausluokka luokitellaan puristuksen perusteella (Ongelin & Valkonen 2016, 123).

Poikkileikkausluokan 3 tarkastelussa ilman leikkausvoimaa aksiaalinen sallittujännitys on oltava alle rajatun myötölujuuden lausekkeen (26) mukaisesti.

$$\sigma_{x.Ed} = f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 355 \text{ MPa} \quad (55)$$

Lauseke (53) voidaan tarkastella hyväksikäyttöasteiden summana neliön muotoisilla rakenneputkilla:

$$\frac{N_{Ed}}{Af_y/\gamma_{M0}} + \frac{M_{y.Ed}}{W_{el.y}f_y/\gamma_{M0}} + \frac{M_{z.Ed}}{W_{el.z}f_y/\gamma_{M0}} \leq 1,0 \quad (53)$$

$$\frac{113\,567 \text{ N}}{2\,724 \text{ mm}^2 \times 355 \text{ MPa}/1} + \frac{1\,615 \times 10^3 \text{ Nmm}}{73\,190 \text{ mm}^3 \times 355 \text{ MPa}/1} = 0,18 \leq 1 \quad (54)$$

Hyväksikäyttöasteiden summan ehto täyttyy.

### 4.8 Sauvan kestävyys (sauva voi nurjahtaa tai kiepahtaa)

#### 4.8.1 Taivutusmomentti ja normaalivoima

*Yhteisvaikutuskaavoihin sisältyy toisen kertaluvun ilmiöiden vaikutus kestävyteen tarkasteltavan sauvan itsensä osalta. Kaavat perustuvat päistään nivelellisesti ja haarukkalaakerein tuetun yksiaukkoisen sauvan mallintamiseen (tukien välillä joko on tai ei ole sivuttaista jatkuvaa tuentaa), ja sauvaan kohdistuu puristusvoima, sauvan päämomentit ja / tai poikittaisia kuormia. Mahdollisten poikittaisten kuormien ja niistä aiheutuvan leikkausvoiman yhteisvaikutus tulee otettua tällöin epäsuorasti huomioon momenttipinnan muodon perusteella määräytyvien ekvivalentin momentin kertoimien avulla (SSAB Domex Tube Rakenneputket käsikirja 2016, 139).*

Tarkastellaan uuman poikkileikkausluokka puristus- ja taivutusvoimasta, jossa rakenneputken puristusjännitys:

$$\delta_N = \frac{N_{Ed}}{A} = \frac{113\,567 \text{ N}}{2\,724 \text{ mm}^2} = 41.691 \text{ MPa} \quad (55)$$

Rakenneputken taivutusjännitys:

$$\delta_M = \frac{M_{y.Ed}}{W_{el}} = \frac{1\,615 \times 10^3 \text{ Nmm}}{73\,190 \text{ mm}^3} = 22,069 \text{ MPa} \quad (56)$$

Rakenneputken poikkileikkauksen yhdistetyt jännitykset:

$$\sigma_{yhdistetty.1} = \delta_N + \delta_M \approx 64 \text{ MPa} \quad (57)$$

$$\sigma_{yhdistetty.2} = \delta_N - \delta_M \approx 20 \text{ MPa} \quad (58)$$

Puristetun osan korkeuden määrittämiseen tarvittava  $\alpha$ -kerroin:

$$\alpha_s = \frac{\sigma_{yhdistetty.2}}{\sigma_{yhdistetty.2}} = 0,308 \quad (59)$$

Taivutuksen ja aksiaalisesti puristetun rakenneputken yhdistetyn kuormituksen tarkastelu:

Arvot:

$$N_{Rk} = f_y A \approx 967 \text{ kN} \quad (60)$$

$$M_{y.Rk} = f_y W_{el} \approx 26 \text{ kNm} \quad (61)$$

$$M_{z.Rk} = f_y W_{el} \approx 26 \text{ kNm} \quad (62)$$

Taivutusnurjahduksen pienennystekijät:

$$\chi = \chi_y = \chi_z = 0,638 \quad (63)$$

Neliön muotoisilla rakenneputkilla ei käytännössä esiinny kiepahdusvaaraa, jolloin kiepahduksen jättää huomioimatta ja kiepahduksen pienennystekijän arvona voidaan käyttää  $\chi_{LT} = 1$  (Ongelin & Valkonen 2016, 140).

Ekvivalentin momentin kertoimet:

$$C_{my} = 0,2 + 0,8\alpha_s = 0,446 \quad (64)$$

$$C_{mz} = 0,2 + 0,8\alpha_s = 0,446 \quad (65)$$

Muunnettu hoikkuus poikkileikkausluokissa 1, 2 ja 3 (kaikki putket):

$$\lambda = \lambda_y = \lambda_z = 0,838 \quad (66)$$

Yhteisvaikutustekijät  $k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{zy}$  ja  $k_{zz}$  ovat Eurocodessa 1993-1-1 laadittu tarkemmalle menetelmälle tai varmalle puolella olevalle menetelmälle. Menetelmän käytön määrittelee kansallinen liite (Ongelin & Valkonen 2016, 140).



Käytetään vaihtoehtoista menetelmää 2, jos se soveltuu. Vaihtoehtoista menetelmää 1 voidaan käyttää (Suomen rakentamismääräyskokoelma 2019, 17).

Yhteisvaikutus y-akselin suhteen:

$$k_{yy} = C_{my} \left( 1 + 0,6\lambda_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y(N_{Rk}/\gamma_{M1})} \right) = 0,446 \left[ 1 + 0,6(0,838) \times \frac{113\,567\,N}{0,638 \times (967\,020\,N/1)} \right]$$

$$= 0,488 \quad (67)$$

$$k_{zy} = 0,8 \times k_{yy} = 0,39 \quad (68)$$

Yhteisvaikutus y-akselin suhteen saa olla kuitenkin enintään:

$$k_{yy,max} = C_{my} \left( 1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y(N_{Rk}/\gamma_{M1})} \right) = 0,446 \left[ 1 + 0,6 \times \frac{113\,567\,N}{0,638 \times (967\,020\,N/1)} \right]$$

$$= 0,495 \quad (69)$$

Yhteisvaikutus z-akselin suhteen:

$$k_{zz} = C_{mz} \left( 1 + 0,6\lambda_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z(N_{Rk}/\gamma_{M1})} \right) = 0,446 \left[ 1 + 0,6(0,838) \times \frac{113\,567\,N}{0,638 \times (967\,020\,N/1)} \right]$$

$$= 0,488 \quad (70)$$

$$k_{yz} = k_{zz} = 0,488 \quad (71)$$

Yhteisvaikutus z-akselin suhteen saa olla kuitenkin enintään:

$$k_{zz,max} = C_{mz} \left( 1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z(N_{Rk}/\gamma_{M1})} \right) = 0,446 \left[ 1 + 0,6 \times \frac{113\,567\,N}{0,638 \times (967\,020\,N/1)} \right]$$

$$= 0,495 \quad (72)$$

Tarkastetaan normaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutusehdot:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,ED}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,ED}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (73)$$

$$\frac{113\,567\,N}{0,638 \times \frac{967\,020\,N}{1}} + 0,488 \times \frac{1\,615 \times 10^3\,Nmm}{1 \times \frac{25\,982 \times 10^3\,Nmm}{1}} = 0,214 \leq 1,0 \quad (74)$$

Lisäksi tarkastetaan ehto:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (75)$$

$$\frac{113\,567\,N}{0,638 \times \frac{967\,020\,N}{1}} + 0,39 \times \frac{1\,615 \times 10^3\,Nmm}{1 \times \frac{25\,982 \times 10^3\,Nmm}{1}} = 0,208 \leq 1,0 \quad (76)$$

## 5 Tuotesuunnittelu

Tuotesuunnittelussa reunaehdot määrittelevät tuotteen ulkoiset mitat, sovitteet laitteen kurottajaan liittämiseksi, vetotappi, kurottajan tehon rajoittama paino, mahdollista toteuttaa ja tuotteen käytettävyyteen vaikuttavat sovellukset.

### 5.1 Pistekuorma kestävyys

Varsinaisten ulkoisten pistekuormien lisäksi myös tukireaktiot aiheuttavat pistekuormia. Rakenneputkissa seinämien paksuudet voivat olla ohuita, joten on syytä tarkastella paikallisten pistekuormien kohdilta uuman kestävyys. Piste-kuorman vaikutusalueen kasvaminen lisää rakenneputken kestävyyttä (Ongelin & Valkonen 2016, 152).

*Eurocodessa ei esitetä suoraan rakenneputkille kohdistettuja ohjeita pistekuorman kestävyden määrittämiseksi (SSAB Domex Tube Rakenneputket käsikirja 2016, 152).*

Varmalla puolella oleva arvio neliön muotoiselle rakenneputken pistekestävyydelle saadaan eurocoden osan 1993-1-1 kylmämuovattujen profiilien ohjeista sovellettuna (Ongelin & Valkonen 2016, 152).

Pistekuormakestävyden mitoitusehdoksi saadaan rakenneputkeen kohdistuvan pistekuorman mitoitusarvo murtorajatilassa suhdetta pistekuormakestävyden mitoitusarvoon yhtä uumaa kohden:

$$\frac{F_{Ed}}{2F_{1w.Rd}} \leq 1,0 \quad (75)$$

Ehdossa oletetaan kuorman kohdistuvan molempaan uumaan tasapuolisesti, joten pistekuormakestävyys on uumien yhteen laskettu summa. Kuorman kohdistuessa epäsymmetrisesti rakenneputken uumiin tulee tarkastella molemman uuman pistekuormakestävyys pistekuorman osuuden suhteen (Ongelin & Valkonen 2016, 152).

Yhden uuman pistekuorman kestävyys:

$$F_{1w.Rd} = C_F \frac{t^2 f_y}{\gamma_{M1}} \quad (76)$$

Pistekuorman tyyppi 1a määräytyy pistekuorman paikan mukaan:

$$c \leq 1,5(h - t) = 1,5(100 \text{ mm} - 8 \text{ mm}) \approx 138 \text{ mm} \quad (77)$$

$$\frac{s_s}{t} = \frac{100 \text{ mm}}{8 \text{ mm}} \approx 12,5 \leq 60 \quad (78)$$

$$k = \frac{f_y}{228 \text{ MPa}} = 1,557 \quad (79)$$

$$k_1 = 1,33 - 0,33k = 1,33 - 0,33(1,557) = 0,816 \quad (80)$$

$$k_2 = 1,15 - 0,15 \left( \frac{r_i}{t} \right) = 1,15 - 0,15 \left( \frac{12 \text{ mm}}{8 \text{ mm}} \right) = 0,925 \quad (81)$$

$$0,5 \leq k_2 \leq 1,0 \quad (82)$$

$$k_3 = 1 \quad (83)$$

$$C_F = k_1 k_2 k_3 \left[ 5,92 - \frac{(h-t)/t}{132} \right] \left[ 1 + 0,01 \frac{s_s}{t} \right] \quad (84)$$

$$\begin{aligned} C_F &= 0,816 \times 0,925 \times 1 \left[ 5,92 - \frac{(100 \text{ mm} - 8 \text{ mm})/8 \text{ mm}}{132} \right] \left[ 1 + 0,01 \left( \frac{100 \text{ mm}}{8 \text{ mm}} \right) \right] \\ &= 4,954 \quad (85) \end{aligned}$$

Yhden uuman pistekuorman kestävyys:

$$F_{1w.Rd} = 4,954 \times \frac{(8 \text{ mm})^2 \times 355 \text{ MPa}}{1} \approx 112 \text{ kN} \quad (86)$$

Rakenneputkeen kohdistuvan pistekuorman mitoitusarvo:

$$F_{Ed} = \gamma_{Q,1} F_{voimapari} \approx 113 \text{ kN} \quad (87)$$

$$\frac{112 \text{ 406 N}}{2(112 \text{ 557 N})} = 0,499 \leq 1,0 \quad (88)$$

Tarkastetaan tilanne vielä kummankin yksittäisen kuorman kannalta  $F_{Ed}/2$  erikseen käyttäen pituutta  $s_s = 0$ :

$$C_{F.tarkastus} = 0,816 \times 0,925 \times 1 \left[ 5,92 - \frac{(100 \text{ mm} - 8 \text{ mm})/8 \text{ mm}}{132} \right] = 4,404 \quad (89)$$

$$F_{1w.Rd.tarkastus} = 4,404 \times \frac{(8 \text{ mm})^2 \times 355 \text{ MPa}}{1} \approx 100 \text{ kN} \quad (90)$$

$$\frac{112 \text{ 406 N}/2}{100 \text{ 051 N}} = 0,562 \leq 1,0 \quad (91)$$

Pistekuorman kestävyysmitoitukset täyttyvät.

## 5.2 Pistekuorman ja taivutusmomentin yhteisvaikutus

Eurocoden osaan 1993-1-3 perustuvassa pistekuormakestävyyden tarkastelussa huomioidaan myös yhteisvaikutus, jolloin riittää pistekuorman ja taivutusmomentin samanaikaisen yhteisvaikutuksen tarkastelu. Tarkastellaan yhteisvaikutusta yksinkertaistettujen ehtojen mukaisesti (Ongelin & Valkonen 2016, 155).

$$\frac{M_{y.Ed}}{f_y W_{eff} / \gamma_{M0}} + \frac{F_{Ed}}{2F_{1w.Rd}} = \frac{1\,615 \times 10^3 \text{ Nmm}}{355 \text{ MPa} \times 73\,190 \text{ mm}^3 / 1} + \frac{112\,406 \text{ N}}{2(112\,557 \text{ N})} = 0,5615 \leq 1,25 \quad (92)$$

Yhteisvaikutuksen mitoitusehto täyttyy.

## 5.3 Rakenneosien sallitut suunnittelujännitykset

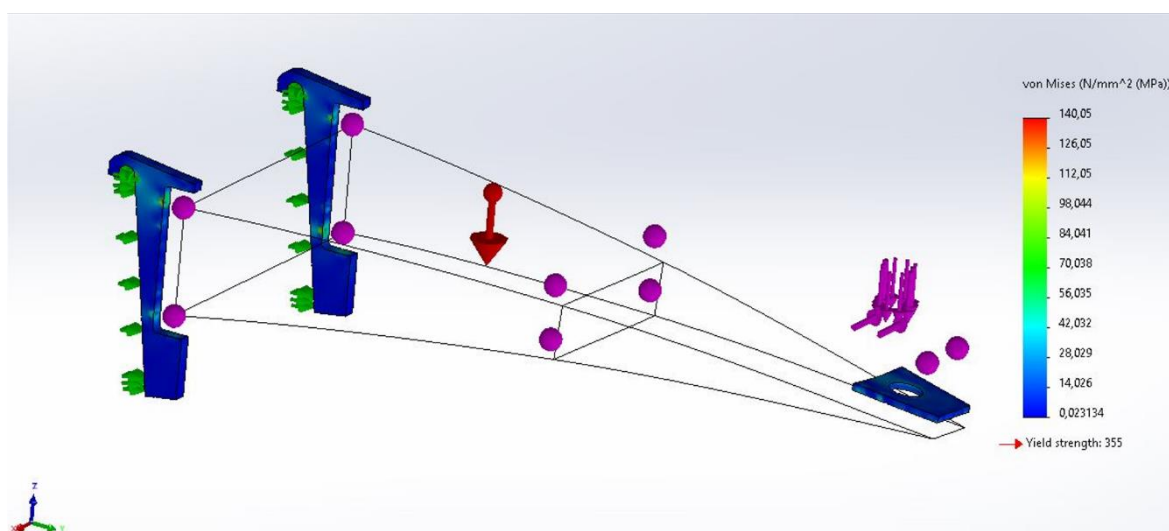
Standardoidut seostamattomat rakenneteräkset SFS-EN 10025-2 mukaan mekaaniset ominaisuudet S355J0 (1,0553) teräslevylle nimellispaksuudeltaan  $16\text{mm} < s \leq 40\text{mm}$  ylempi murtöraja on vähintään  $R_{eH} = 345\text{MPa}$  ja murtolujuus vähintään  $R_m = 470\text{MPa}$ .

Tarkastellaan rakenneosien suunnittelujännityksien rajat SFS-EN 13001-3-1:2012 + A2:2018 mukaisesti normaalijännitykselle sekä leikkausjännitykselle:

$$f_{Rd\sigma} = \frac{f_y}{\gamma_{Rm}} = \frac{345\text{MPa}}{1,1 \times 0,95} \approx 330 \text{ MPa} \quad (93)$$

$$f_{Rd\tau} = \frac{f_y}{\gamma_{Rm}\sqrt{3}} = \frac{345\text{MPa}}{1,1 \times 0,95 \times \sqrt{3}} \approx 190 \text{ MPa} \quad (94)$$

Tuotesuunnittelun reunaehdot tarkistetaan mallista kuvan 5 mukaisesti.



Kuva 5 Leikkausjännitykset pysyvät maltillisina.

## 5.4 Hitsatut liitokset

Pienahitsin koon tulee täyttää vaatimukset voimia siirtävänä liitoksena missä pienahitsin efektiivinen a-mitta tulee olla  $a \geq 3 \text{ mm}$  sekä tehollinen pituus tulee olla 30 millimetriä tai 6 kertaa a-mitta  $l_{eff} \geq \max [6a ; 30 \text{ mm}]$  (SFS-EN 1993-1-8 2005, 44).

Pienahitsin tehollinen mitta on rakenneputken piirin pituus:

$$l_{eff} = 373 \text{ mm}$$

Hitsin pinta-alan mitoitusarvo:

$$A_w = a l_{eff} = 4 \text{ mm} \times 373 \text{ mm} = 1464 \text{ mm}^2 \quad (95)$$

Hitsin laskentapintaa vastaan kohtisuora normaalijännitys:

$$\sigma_{\perp} = \frac{F_{z,Ed}}{\sqrt{2}A_w} \leq \frac{0,9f_u}{\gamma_{M2}} \quad (96)$$

$$\sigma_{\perp} = \frac{112\,406 \text{ N}}{\sqrt{2} \times 1464 \text{ mm}^2} \leq \frac{0,9 \times 470 \text{ MPa}}{1,25} \approx 54 \text{ MPa} \leq 338 \text{ MPa} \quad (97)$$

Kohtisuoran jännityskomponentin rajoite ehto täyttyy.

Hitsin akselin suuntainen leikkausjännitys:

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_{y,Ed}}{A_w} = \frac{11\,056 \text{ N}}{1464 \text{ mm}^2} \approx 7,6 \text{ MPa} \quad (98)$$

Vertailujännitys saadaan von Mises myötöhypöteesin mukaisesti vertailujännitykseksi, jota verrataan heikoimpaan materiaali murtolujuuteen hitsausliitoksessa. Pienahitsin mitoitus- ehto:

$$\sigma_{vert} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad (99)$$

$$\sigma_{vert} = \sqrt{(54,071 \text{ MPa})^2 + 3(7,552 \text{ MPa})^2} \approx 56 \text{ MPa} \quad (100)$$

$$56 \text{ MPa} \leq \frac{470 \text{ MPa}}{0,9 \times 1,25} \approx 453 \text{ MPa} \quad (101)$$

Hitsin a-mitta on riittävä voimia siirtävänä liitoksena.

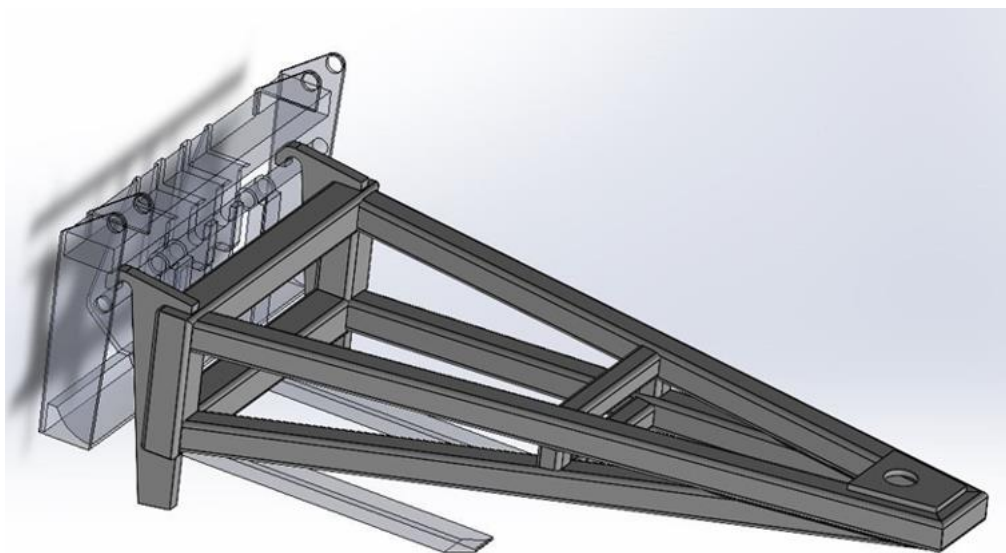
## 5.5 Solidworks mallinnus

Työmaalla työkoneen mitoituksen pohjalta suunniteltu mallinnus, jossa huomioiden työko- neen käytössä havainnoitujen toimintatapojen soveltaminen ja tuotteen soveltuvuutta

käytännössä voidaan hyvin kätevästi tarkastella Solidworks-ohjelmiston avulla suhteellisen vähäisellä vaivalla.

Työkalukiinnikkeen tarkastelussa on hyvä huomioida jännityksien lisäksi myös työkalukiinnikkeen muotoilua ja kuinka kiinnitys ja irrotus alustavaunuun tapahtuu. Työkalukiinnikkeestä voidaan tehdä myös sapluuna, jolla voidaan vielä varmistua tuotemuotoilun soveltuvuus käytännössä.

Lavetin siirtolaitteen toimivuus käytännössä tilanteessa, jossa lavettia vedetään tai työnnetään ilman erillisesti lukitsevaa mekanismia asettaa myös haastetta tuotesuunnitteluun. Lisäksi työmaasiirroissa siirtymä voi olla aika epätasaista, joka osaksi tuo lisää haasteita tuotesuunnitteluun ja muotoiluun kuten kuvasta 6 voi huomioida.



Kuva 6 Valmiin tuotteen sovittelua kurottajaan.

Tuotteen käyttö muissa työkoneissa vaatii työkalukiinnikkeen uudelleen muotoilua, mutta tuotteen muutostyöt rajoittuvat vain työkalukiinnikkeeseen, joka voidaan muutostyöllä pajalla suorittaa vaikkakin on suuri muutostyö.

Solidworksilla voidaan analysoida mallia ja tarkastella rasituksia unohtamatta vertailla tuloksia eri menetelmillä saatuihin tuloksiin. Mallin simuloinnissa tulee olla todella tarkkana, että malli on ekvivalentti todellisuuden kanssa. Analysoitujen rasitusten arvojen tulkinnassa pitää huomioida saatujen arvojen tulkitsemisen tarkkuus. Pelkästään arvojen lukemista värikarttojen perusteella simuloinnin tuloksia saattaa olla harhaanjohtavaa. Kuvissa oleva taipuma on myös liioiteltu vain havainnollisesta syystä.

## 6 Yhteenveto

Tuotekehittelyn mahdollistamiseksi eri standardien vaatimusten yhdistelemisellä ja soveltamisella on iso vaikutus tuotteen onnistumisen ja toimivuuden kannalta. Tuotesuunnittelua pystytään tekemään standardien ja laitetietojen pohjalta pitkälti ilman, että käydään fyysisesti tutkimassa paikan päällä suunniteltavan tuotteen tulevaa käyttöympäristöä.

Jotta tuotteesta saadaan toiminnollinen ja välttyttäisiin niin sanotuilta lapsentaudeilta, olisi tärkeää kuunnella henkilöitä, jolla on paljon käytännön näkemystä ja kokemusta. Lisäksi uudet näkökannat luovat uusia innovaatioita.

Unohtamatta lujuusopin sekä mitoituksen tuomaa näkökulmaa tuotesuunnittelussa, jonka tulisi olla yhteensopivaa tuotteen toteutuksen kanssa. Konepajalta saatu palaute ohjeistaa suunnittelijaa voidaanko suunnitelma toteuttaa nykyisillä konepaja menetelmillä.

Käytännöllinen laite, jossa yhdistyy monipuolisesti tuotteeseen vaikuttavia tekijöitä. Ideoiden paljouden suodattaminen tutkielmasta ehkäisi päättymätöntä tutkielmaa. Kuitenkaan tuotteen kestävydestä ja käytettävyydestä tinkimättä saatiin Eurocoden kautta monipuolisesti tarkasteltu kokonaisuus.

Monipuolisen rakenneputken käyttö yksinkertaisti kokonaistuotetta sekä osakseen helpotti laskentaa. Rakenneputkien liitoksissa jouduttiin tekemään kompromissi, joka ei ole toteutuksen kannalta helpoin toteuttaa. Kumminkin yksinkertaistaen lopputulosta mikä johtaa matalampiin kustannuksiin.

Tarkastelussa rakenneputken mitoitus tehtiin varmalla puolella poikkileikkausluokan kolmen mukaisesti, jolloin pysytään kimmoteoriassa sekä teräslaji rajoitettiin S355 lujuusluokkaan.

Mitoittavana tekijänä oli standardin mukaisen pituusmitasta johtuva kuorman aiheuttama taivutusmomentti. Jännitysten pitäminen maltillisina, rajoitettiin vapaata jänneväliä lyhentämällä. Tärkeämmäksi mitoittavaksi tekijäksi nousi profiilien valinta, jossa merkitys korostui rakenneputkien pistekuormakestävydessä.



## Lähteet

DI Ongelin, P. & DI Valkonen, I. 2016. SSAB Domex Tube Rakenneputket. Keuruu. Otavan Kirjapaino Oy.

SFS-EN 1993-1 Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu – osa 8: Liitosten mitoitus. 2005. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto

SFS-EN 1993-1 Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu – osa 1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. 2005. Helsinki Suomen standardisoimisliitto.

Soutas-Little, W. & Inman, D. 2001. Engineering Mechanics. New Jersey. Prentice Hall.

Suomen Rakentamismääräyskokoelma: Rakenteiden lujuus ja vakaus – Teräsrakenteet. 2019