

Saimaan ammattikorkeakoulu
Tekniikka Lappeenranta
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Kone- ja tuotesuunnittelu

Anna Vladimirova

Siltanosturin suunnittelu ja analyysi

Opinnäytetyö 2016

Tiivistelmä

Anna Vladimirova

Siltanosturin suunnittelu ja analyysi, 39 sivua, 1 liite

Saimaan ammattikorkeakoulu

Tekniikka Lappeenranta

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Kone- ja tuotesuunnittelun suuntautumisvaihtoehto

Opinnäytetyö 2016

Ohjaajat: yliopettaja Seppo Toivanen, Saimaan ammattikorkeakoulu

Tämän opinnäytetyön aiheena oli siltanosturin suunnittelu ja analyysi. Työn tavoitteena oli suunnitella ja tutkia siltanosturin rungon eurokoodin standardien perusteella sekä saada 3D-malli. Opinnäytetyön ohjaajana toimii Saimaan ammattikorkeakoulun kone- ja tuotantotekniikan yliopettaja Seppo Toivanen.

Teoriaosassa on käytetty teknistä kirjallisuutta, eurooppalaisia standardeja sekä siltanosturien valmistajien websivuja. Ensimmäinen luku käsittelee siltanosturin toimintaperiaatetta, komponentteja, materiaaleja sekä profiilien liitoksia. Laskentaosa käsittelee siltanosturin rungon mitoitusta Eurokoodi 3-standardin perusteella sekä tarvittavaa analyysia. Eurokoodi 3-standardista käytettiin teräsrakenteiden suunnittelun osaa. Suunnittelussa otettiin huomioon rakenteen kestävyys. 3D-mallinnus ja staattinen analyysi tehtiin SolidWorks-ohjelmistossa.

Työn tuloksena oli siltanosturin mitoitus eurooppalaisten standardien mukaan ja rungon simulointi SolidWorks-ohjelmistolla. Lopussa on mainittu ratkaisun mahdollisia vaihtoehtoja ja painopisteitä, jotka pitäisi ottaa huomioon siltanosturin suunnittelussa.

Asiasanat: siltanosturi, standardi, simulointi.

Abstract

Anna Vladimirova

Overhead crane design and analysis, Number of Pages 39, Number of Appendices 1

Saimaa University of Applied Sciences

Technology Lappeenranta

Mechanical Engineering

Mechanical engineering and production technology

Bachelor's Thesis 2016

Instructor: principal lecturer Seppo Toivanen, Saimaa University of Applied Sciences

The purpose of the bachelor thesis work was to design and examine an overhead crane construction. The goal of the project was not only in making measurements but in using special software to analyze the behavior and condition of the structure. The work was commissioned by Seppo Toivanen of Saimaa University of Applied Sciences.

Data for this thesis was collected from literature and internet pages of different overhead cranes' manufactures. Additionally, the work was based on European Standards (Eurocode) related to the design of steel structures. SolidWorks-program was used as the software for constructing and examination of the behavior of the structure.

The final result of this thesis was the beam design of an overhead crane and calculations of the beam strength and durability. The analysis is offered by software report and calculations by hand based on European standards. There are possible options in the conclusion how the frame construction can be changed. It is recommended to note that the crane construction and calculations must be checked for any possible problems.

Keywords: overhead crane, standard, simulation.

Sisältö

1	Johdanto.....	6
2	Teoria	7
2.1	Siltanosturi ja sen komponentteja	7
2.2	Toimintaperiaate	8
2.3	Siltanosturin tyypit.....	8
2.4	Materiaalin valinta	10
2.5	Sillan liitokset	11
2.5.1	Hitsiliitokset	11
2.5.2	Ruuviliitokset	12
2.6	Käyttökohteet.....	12
3	Suunnittelu	14
3.1	Palkin mitoitus, vaatimukset.....	14
3.1.1	Kuormitus	14
3.1.2	Sillan profiilin suunnittelu.....	17
3.1.3	Palkin oma massa	21
3.1.4	Taipumat	21
3.1.5	Momenttikestävyys.....	22
3.1.6	Laipan taipumisesta aiheutuva lommahdus	23
3.1.7	Leikkauskestävyys	24
3.1.8	Kiepahduskestävyys.....	26
3.1.9	Taivutusmomentti- ja leikkauskestävyys	29
3.2	Väsymisen laskenta	30
3.3	Värähtelyt.....	33
3.4	SolidWorks-ohjelmisto	34
3.4.1	SolidWorksin staattinen analyysi	34
4	Tulokset ja pohdinta	36
	Kuvat.....	37
	Taulukot.....	37
	Lähteet.....	38

Liitteet

Liite 1 Hitsatun profiilin piirros

Symbolit

A_{fc}	laipan pinta-ala
A_v	leikkauspinta-ala
B	profiilin leveys
E	kimmokerroin
F_T	tukireaktiovoima
G	liukukerroin
G_1	hyötykuorma
G_2	oma paino
H	profiilin korkeus
I	neliömomentti
I_v	vääntöneliömomentti
I_w	käyritysmisjäyhyys
L	palkin jänneväli
M_d	taivutusmomentti
M_{el}	kiepahdusmomentti
M_R	momenttikestävyys
N_i	väsymiskestävyuden syklit
Q	leikkausvoima
$V_{pl.Rd}$	leikkauskestävyys
W	taivutusvastus
W_{pl}	plastinen taivutusvastus
f_n	ominaistaajuus
f_y	myötölujuus
g	kiihtyvyys
h	uuman korkeus
h_f	laippojen painopisteiden välinen etäisyys
h_{opt}	I-palkin optimikorkeus
h_w	laipan vapaaväli
k	jäykkyys
k_1	muuttuvan kuorman kerroin murtorajatilassa
k_2	pysyvän kuorman kerroin murtorajatilassa
m	kuorman kokonaismassa
t_f	laipan paksuus
t_w	uuman paksuus
δ_m	taipuma
γ_{M0}	osavarmuusluku
γ_{Mf}	kuormien osavarmuusluku
γ_{Ff}	teräksen osavarmuusluku
$\bar{\lambda}_{LT}$	muunnettu hoikkuus
X_{LT}	kiepahduksen pienennyskerroin
φ_{LT}	kiepahduskerroin
α_{LT}	kiepahduskerroin
$\Delta\sigma_i$	normaalijännitysten vaihteluväli
$\Delta\sigma_D$	vakioamplitudinen väsymisraja
$\Delta\tau_i$	leikkausjännityksen vaihteluväli
$\Delta\tau_C$	leikkausjännitysvaihtelun mukainen väsymislujuus

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella siltanosturin eurooppalaisten standardien perusteella sekä tutkia nosturin rakennetta. Lisäksi suoritetaan staattinen analyysi SolidWorks-ohjelmiston avulla.

Siltanosturi on laite, jota käytetään varastoissa ja tehdashalleissa kuormien nostamiseen ja siirtämiseen. Nosturin tehokkuus, luotettavuus ja turvallisuus riippuu siitä, miten nosturin teräsrakenteet suunnitellaan ja mitoitetaan. Sen takia on olemassa erilaiset teräsrakenteita koskevat vaatimukset, kuten lujuutta, rakenteen ja sen osien stabiliteettia, staattista ja dynaamista jäykkyyttä, minimimahdollista massaa ja työstettävyyttä.

Ensimmäisessä luvussa kerrotaan siltanosturin toimintaperiaatteesta, rakenteesta, ruuvi- ja hitsausliitoksista ja materiaaleista, joista se on tehty. Toinen luku käsittelee rungon suunnittelua. Suurin osa mitoituksesta perustuu lujuusopin kaavoihin ja eurooppalaisiin standardeihin (EN 1993 Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu). Siltanosturin maksiminostokorkeus tulisi olla 12 metriä ja nostokapasiteetti olisi 5000 kg. Sillan jänneväli olisi 13 metriä. Tällaisen siltanosturin runko on yksinkertainen. Saaduista tiedoista tehdään 3D-malli SolidWorks-ohjelmistossa, jonka avulla tutkitaan koko rungon toimintaa. Viimeisessä työn luvussa pohditaan suunnittelun ja analyysien tuloksia.

2 Teoria

Erilaisia nostureita käytetään tavarain lastaukseen ja purkamiseen sekä siirtämiseen sisätiloissa sekä ulkoalueilla. Teollisuuden tehokkuus riippuu useasti siitä, mitä nosturyyppiä käytetään konepajassa sekä nosturin automaatiotasoa näyttää yrityksen tuottavuutta.

2.1 Siltanosturi ja sen komponentteja

Siltanosturi on metallinen nostomekanismi, joka liikkuu vaaka- ja pystysuunnassa ja jota käytetään kuormien nostamiseen ja siirtämiseen. Logistiikkahalleissa ja varastoissa käytetään siltanostureita enemmän kuin muita nostokoneita. Nosturin tarkoitus on tavaroiden nosto kolmessa kohtisuorassa suunnassa. Komponentit ja varaosat riippuvat siitä, mitä tavaraa siirretään. Yleisesti nosturiin asennetaan köysi, koukku, sähkömagneetteja ja kauha. Perinteisellä koukulla ja ketjulla varustettu siltanosturi asennetaan konepajoissa ja varastoissa.



Kuva 1. Kauhalla varustettu siltanosturi (1)

Siltanosturi koostuu kahdesta pääosasta, jotka ovat silta ja nostovaunu. Rakenteen silta on teräsrunko, joka tehdään hitsatuista profiileista ja joka tukeutuu liikkuviin pyöriin ja päätykannattimille. Siltanosturissa on kolme eri sähkömoottoria kolmeen tehtävään, kuten kuorman nosto, nostovaunun ja sillan siirtäminen. Sillan yläpuolelle laitetaan sähkömoottori, joka aiheuttaa nosturin liikkumista pystysuunnassa. Nostovaunun osat ovat teräsrunko pyörineen, siirto- ja nostomoottorit. Vaunu tukeutuu kiskoihin, jotka asennetaan siltanosturin kannattimien yläpuolelle tai alapuolelle. Niiden asennus riippuu nosturin tyypistä. Nostomoottori suorittaa kuorman vaakasuunnan siirtämistä sekä vaunun siirtomoottori tekee kuorman pystysuunnan siirtämistä siltaa pitkin. Nosturi ohjataan tavallisesti radio-ohjauksella tai ohjaamosta. Ohjaamo ripustetaan nosturin palkkiin. Erikoisnostureissa käytetään liikkuvaa ohjaamo. Tässä tapauksessa se kiinnitetään vaunuun. Ohjaamossa asennetaan nosturin ohjauslaitteita. (2, s. 1 – 35.)

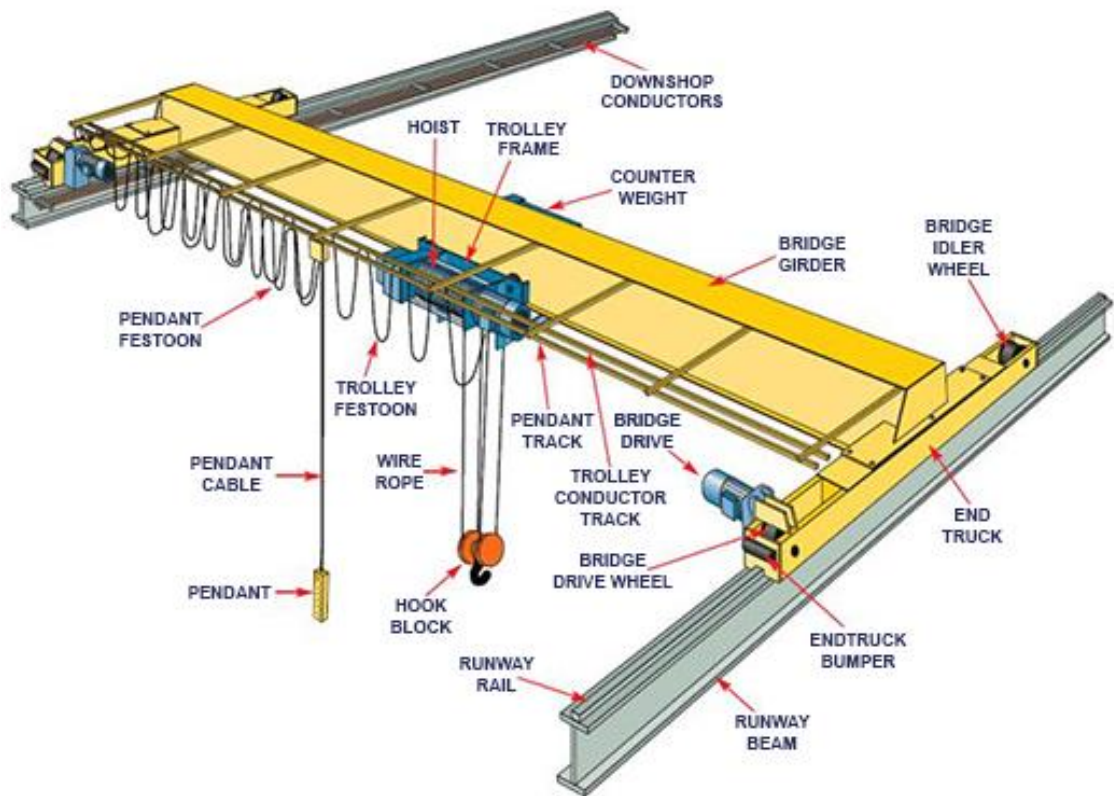
2.2 Toimintaperiaate

Siltanosturi on yksi nostolaitteista ja sen takia toimintaperiaate on melkein samanlainen kuin nostolaitteiden. Tärkein ero on se, että koko runko tunkeutuu suoraan kiskoihin. Nosturin palkki liikkuu kiskoilla, jotka asennetaan tehdashallien sisätilojen seiniin tai tuotantolaitoksien ulkopuolelle. Nostovaunu liikkuu siltaa pitkin. Nostovaunussa on vinssi. Lisävarusteita voi olla eri voimakkuuden magneetteja. Siltanostureja käytetään laajojen ominaisuuksien takia metalliteollisuudessa, varastotaloudessa ja rakennusalalla. (3, s. 1 – 15.)

2.3 Siltanosturin tyypit

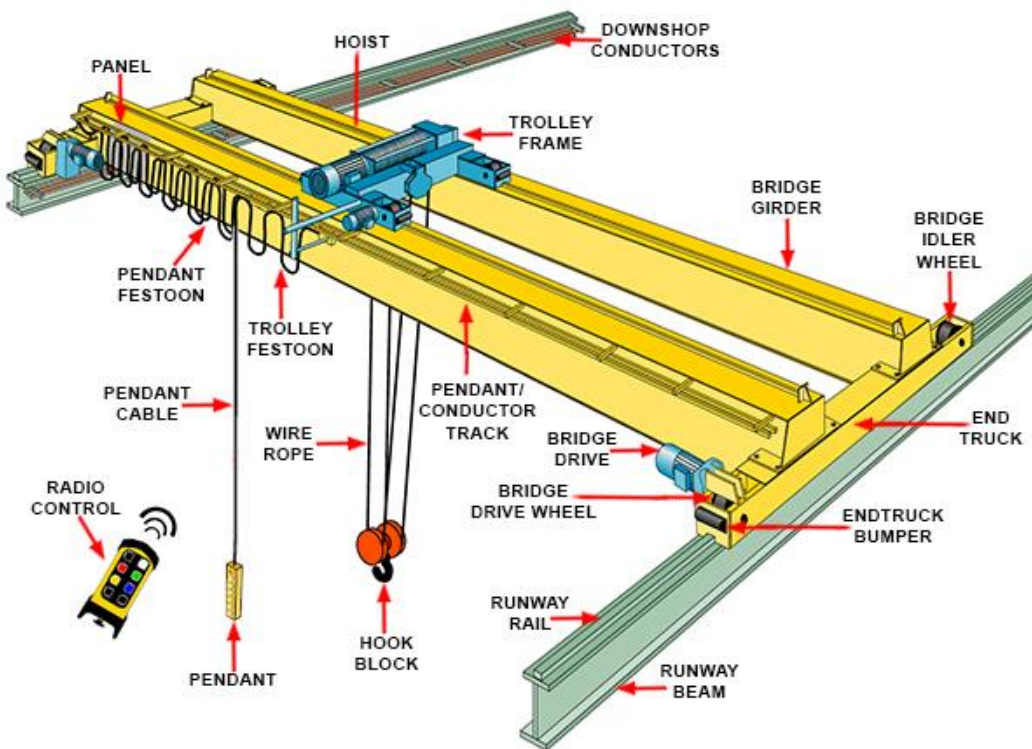
Siltanosturit jaetaan kahteen ryhmään eli yksipalkkisiin ja kaksipalkkisiin siltanostureihin. Yksipalkkiset nosturit koostuvat yhdestä palkista, joka yhdistetään päätypalkkeihin. Nostovaunu on sijoitettu palkin alapuolelle. Yksipalkkinen nosturi ei vaadi paljon korjaus- ja huoltokuluja. Sen nostokapasiteetti on 0,5 – 15 tonnia, nostokorkeus on 6 – 18 metriä ja jänneväli on 4,5 – 28,5 metriä. Käyttölämpötila-alue on aina -40°C...+40 °C, jos

siltanosturi asennetaan ulkoalueelle. Kuvassa 2 on yksipalkkinen siltanosturi.



Kuva 2. Yksipalkkinen siltanosturi (4)

Kuvassa 3 on esitetty kaksipalkkinen siltanosturi. Nostovaunu on kiinnitetty palkkien yläpuolelle. Nostokapasiteetti on suurempi, noin 5 – 80 tonnia, sillan leveys on 35 metrin saakka. Tällaisen nosturin huono puoli on se, että sen hinta on erittäin korkea, asennus on monimutkainen, oma paino on suuri. (3, s. 16 – 45.)



Kuva 3. Kaksipalkkinen siltanosturi (5)

2.4 Materiaalin valinta

Rakenteen materiaalin valinnassa otetaan huomioon käyttöympäristön asettamia vaatimuksia. Tavallisesti nosturia käytetään eri nosto- ja siirtonopeuksilla. Sen lisäksi nosturiin vaikuttaa eri muuttuvia kuormituksia. Näiden tekijöiden takia siltanosturia valmistetaan materiaaleista, joilla on suuri kimmokerroin. Jos nosturin käyttölämpötila on liian matala, materiaalin iskuthekyys on tärkeä. Valmistuskustannukset, rakenteen paino ja korroosion kestävyys ovat myös tärkeät tekijät teräslajin valinnassa. (6, s. 1423 – 1440.)

Palkit, pilarit ja ristikot valmistetaan levyistä hitsaamalla. Rakenneteräkset (S235, S355), hienoraerakenneteräkset (S275NL, S355NL, S420NL) tai säänkestävät teräkset (S235J0W, S355J2WP) käytetään yleensä hitsattujen profiilien valmistuksessa. Hitsattuja profiileja valmistetaan asiakkaan erikoistarpeen mukaan, sen vuoksi profiilin muoto ja dimensiot voivat olla mitkä tahansa ja materiaali voi olla muita teräslajeja. Hienoraerakenneteräksistä valmistetaan profiileja, jonka lujuus, iskuthekyys ja hitsattavuus ovat parempia kuin yleisissä rakenneteräksissä. (6, s. 1423 – 1440.)

2.5 Sillan liitokset

Siltanosturin teräsosat ovat saatavana profiileina. Ne kaikki vaativat yhteen liittämistä. Tavallisesti hitsaamalla yhdistetään pieniä komponentteja, mutta rakennustyömaalla kaikki komponentteja liitetään toisiinsa ruuviliitoksiin. Kuvassa 4 esitetään palkin liitoksia. Liitoksen paikka, ulkonäkö, kokoamisvaiheen aikataulu vaikuttavat paljon liitosmenetelmän valinnassa. (7, s. 42 – 51.)



Kuva 4. Palkin ruuvi- ja hitsausliitokset (8)

2.5.1 Hitsiliitokset

Hitsaus on yleisin prosessi, jonka avulla metalliosat liitetään toisiinsa. Teräs sulatetaan paikallisesti, lisätään sulalisäainetta ja koko seos jähmetetään nopeasti. Teräsrakenteissa hitsaus voi olla automaattinen tai manuaalinen. Yleisesti käytetään seuraavat hitsausmenetelmiä kuten metallikaarihitsaus, MIG/MAG-hitsaus ja täysautomaattinen hitsaus. Tavallisesti hitsausta vältetään työmaalla, koska konepajoissa on helpompaa hitsata kuin asennuspaikalla. Hitsausliitosten laatu olisi parempi konepajassa kuin työmaalla. Vain poikkeustapauksissa voidaan käyttää hitsiliitoksia. (9, s. 45 – 57.)

2.5.2 Ruuviliitokset

Perusmateriaali, ruuvit, mutterit ja aluslevyt muodostuvat ruuviliitoksia. Eurokoodi 3-standardi käsittelee ruuviliitoksia koskevia määräyksiä. Hitsattujen profiilien asennuksessa yleisesti käytetään ruuviliitoksia. Pulttiliitoksen tärkeä etu on se, että sen asennus on helppo. On aina tarkastettava ruuvien kestävyudet eli leikkauskestävyys, vetokestävyys sekä niiden yhdistetty kestävyys, liukumiskestävyys ja palamurtumiskestävyys. (9, s. 24 – 45.)

Korkealujuuksisia ruuveja käytetään usein hitsattujen profiilien asennuksessa, lujuusluokat voivat olla 8.8 tai 10.9. Standardien mukaan ruvikoot ovat M12, M16, M20 tai M24. Suurempia ruuvien kokoja on myös saatavilla, mutta niiden käyttöä vältetään, koska pienten ruuvien käyttö on helpompi ja edullisempi rakennustyömaalla. (9, s. 24 – 45.)

2.6 Käyttökohteet

Perinteisiä yksipalkkisia siltanostureita käytetään tavaran siirtämiseen ja nostamiseen teollisissa varastoissa, sähkölaitoksissa, logistiikkakeskuksissa ja työpajoissa. Kaksipalkkista nosturia käytetään kaikkialla.

Sähkömagneeteilla varustetut siltanosturit siirtävät ja nostavat rautaa ja sen seoksia, joilla on magneettisia ominaisuuksia. Kauhalla varustettu siltanosturi siirtää irtonaisia materiaaleja. Koukulla varustettuja nostureja käytetään painavien kuormien siirtämiseen työ- ja konepajassa. Joskus niitä käytetään asennus- ja huoltonostureina. Siltanosturia käytetään kuorma-autojen korjaamoissa, koska siltanosturin nostokapasiteetti on suuri. Joskus yksipalkkisia siltanosturia käytetään sulaneen metallin siirtämiseen. (10, s. 40 – 41.)



Kuva 5. Sähkömagneeteilla varustettu siltanosturi (11)

3 Suunnittelu

3.1 Palkin mitoitus, vaatimukset

Siltanosturin palkin mitoitus perustuu eurooppalaisten standardien ohjeisiin. Tässä laskentaosuudessa käytetään eurokoodin kolmatta osaa (teräsrakenteet). Eurokoodissa on kuudes osa, joka käsittelee siltanosturin rakennetta, mutta sen pohja perustuu kolmeen osaan. Tarvittavat lähtöarvot saadaan nosturin valmistajan tuoteluettelosta. Taulukko 1 esittää tämän opinnäytetyön siltanosturin kaikki lähtöarvot.

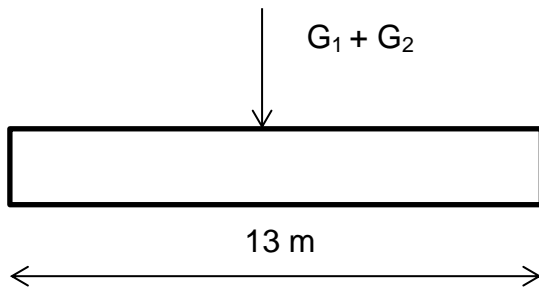
Laitteen lähtöarvot	
Nostokapasiteetti [kg]	5000
Korkeus [m]	12
Jänneväli [m]	13
Käyttölämpötila [°C]	-20 - +40
Oma massa [t]	4,3

Taulukko 1. Lähtöarvot (12)

Mitoituksen tarkoituksena on se, että rakenne kestää kaikki rasitukset kuten normaalivoima, leikkausvoima, vääntömomentti ja taivutusmomentti. Rakenteen kestävyys voi ylittää, mutta tässä tapauksessa materiaali myötää tai murtuu.

3.1.1 Kuormitus

Ensimmäinen vaihe siltanosturin suunnittelussa on arvioida kaikki nosturiin vaikuttavat kuormat, sallitut muodonmuutoksia ja rajoitukset. Tämän opinnäytetyön siltanosturi on asennettu varastossa, ei ulkona. Siihen ei vaikuta tuulikuorma tai lumikuorma. Otetaan huomioon nosturin oma paino ja tavaran maksimipaino. Tavaran maksimipaino on viisi tonnia, sekä otetaan nosturin massa 4,3 tonnia. (13)



Kuva 6. Palkin kuormitus

1. Hyötykuorma on tavaran maksimipaino. Lasketaan kaavan 1 avulla.

$$G_1 = m * g \quad (1)$$

$$G_1 = 5000kg * 9,82 m/s^2 = 49kN$$

$$G_1 = k_1 * G_1 \quad (2)$$

$$G_1 = 1,5 * 49kN = 73,65kN$$

missä m on kuorman kokonaismassa

g on kiihtyvyys

k_1 on muuttuvan kuorman kerroin murtorajatilassa (1,5).

2. Oma paino on sillan kokonaismassa.

$$G_2 = m * g \quad (3)$$

$$G_2 = 4,3 * 10^3 kg * 9,82 m/s^2 = 42,2kN$$

$$G_2 = k_2 * G_2 \quad (4)$$

$$G_2 = 1,15 * 42,2kN = 48,56kN$$

missä k_2 on pysyvän kuorman kerroin murtorajatilassa (1,15).

Lasketaan yhteen hyötykuorman ja oman painon arvot ja saadaan palkkiin vaikuttava kokonaisvoima.

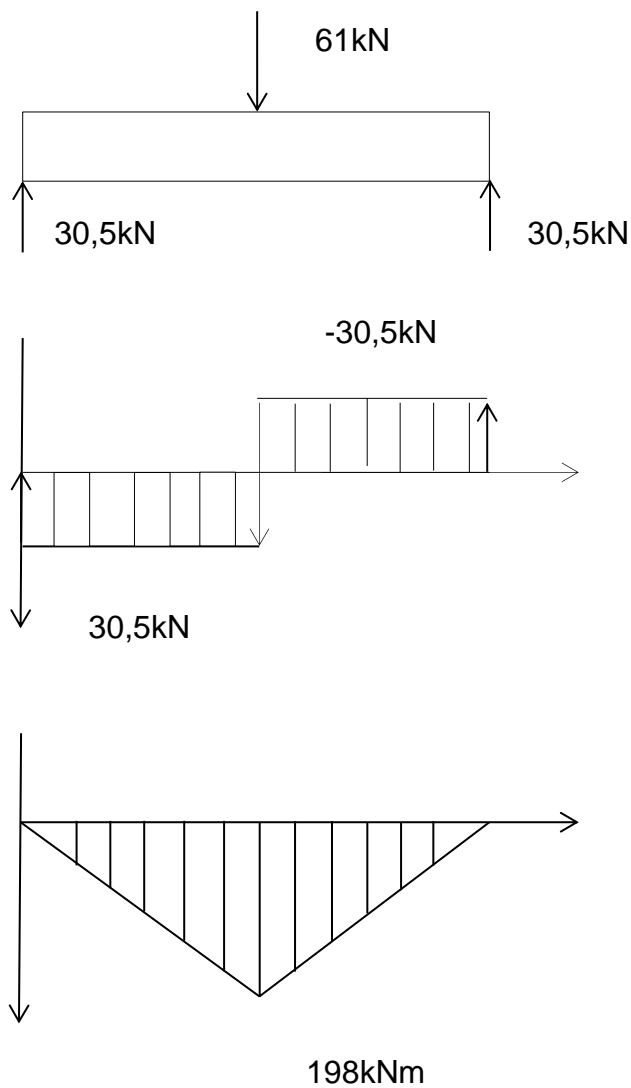
$$G_1 + G_2 = 73,65kN + 48,56kN = 122kN \quad (5)$$

Kokonaiskuormitus on 122 kN. Kun kyseessä on kaksipalkkinen siltanosturi, kuormitus jakaa kahdesti jokaiselle palkille eli 61 kN per palkki. Kun kuormitus on tietty, voidaan laskea taivutusmomentti (kaava 6).

$$M_d = F_T * d \quad (6)$$

$$M_d = 30,5kN * 6,5m = 198 kNm$$

Siltanosturin palkille piirretään vapaakappalekuvat. Kuviossa on leikkausvoima ja taivutusmomentti.



Kuva 7. Leikkausvoiman ja momentin kaaviot

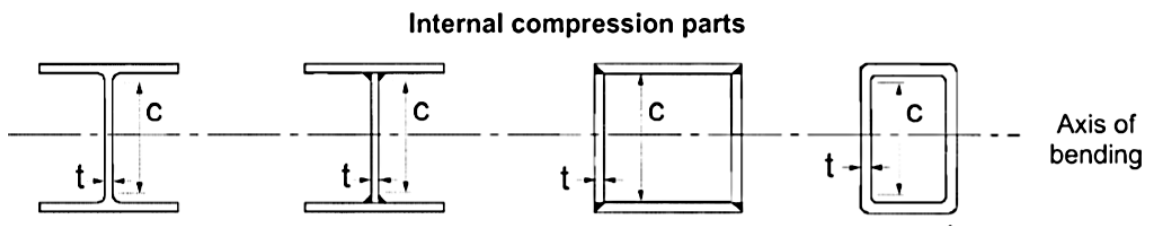
3.1.2 Sillan profiilin suunnittelu

Kaksoissymmetrisen ohutuumaisen I-palkin optimikorkeus voidaan laskea kaavalla 7, kun rakennekorkeutta ei ole rajoitettu ja palkkia kuormittaa vain taivutusmomentti. Mutta jos korkeus on rajoitettu, ero ei ole niin suuri. (14)

$$h_{opt} = 7,0 * \sqrt[3]{\frac{M_{sd}}{f_{yd}}} = 7,0 * \sqrt[3]{\frac{198 * 10^6 \text{ Nmm}}{355 \text{ N/mm}^2}} = 576,2 \text{ mm} \quad (7)$$

Tämä kaava on vain suuntaa antava, sitten päätetään että uuman korkeus olisi 700 mm. Eurokoodi 3-standardin mukaan voidaan laskea kaikki profiilin dimensiot poikkileikkausluokan kautta. Profiilin täytyy kuulua poikkileikkausluokkaan 1, 2 tai 3 (PL1, PL2 tai PL3).

1. Uuman mitoitus



Kuva 8. Uuman poikkileikkausluokka (18, s. 42.)

Lasketaan ensin uuman mittojen suhde kaavan 8 avulla. Päätetään, että uuman paksuus olisi kymmenen millimetriä.

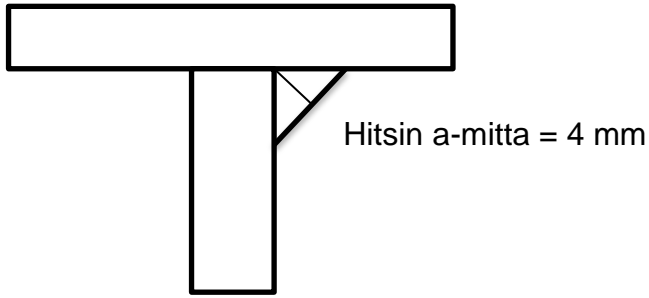
$$c/t \leq 83\varepsilon \quad (8)$$

missä $\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/355} = 0,81$

f_y on myötölujuus.

Kaksipuolista pienahitsiä käytetään hitsattujen I-profiilien kaulahitsinä. Pienen sallittu a-mitta on 3 mm. Tässä opinnäytetyössä kaulahitsin a-mitta on 4 mm Eurokoodi 3-standardin mukaan.

$$a / \cos 45^\circ = 5,7 \text{ mm} \quad (9)$$

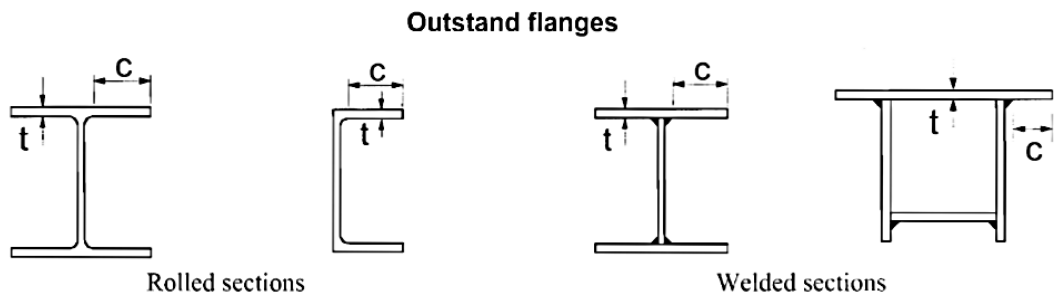


Kuva 9. Hitsin dimensiot

$$c = 700\text{mm} - 20\text{mm} * 2 - 5,7\text{mm} * 2 = 648,6\text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{648,6}{10} = 64,86 \leq 67,2 \quad PL2$$

2. Laipan mitoitus



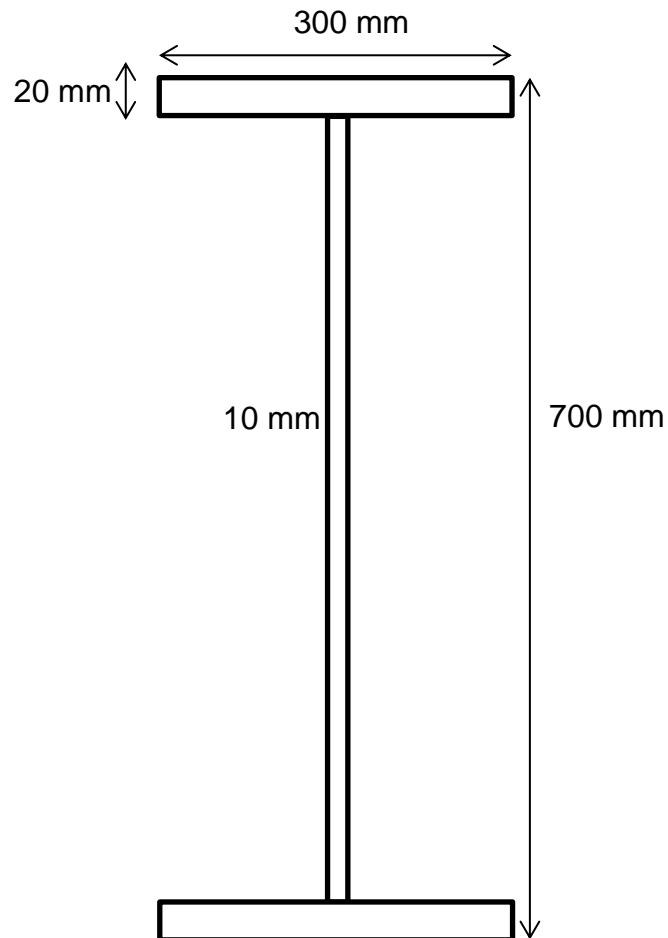
Kuva 10. Laipan poikkileikkausluokka (18, s. 43.)

$$\frac{c}{t} \leq 14\varepsilon \quad (10)$$

$$c = \frac{300\text{mm}}{2} - 5\text{mm} - 5,7\text{mm} = 139\text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{139\text{ mm}}{20\text{ mm}} = 6,96 \leq 11,3 \quad PL1$$

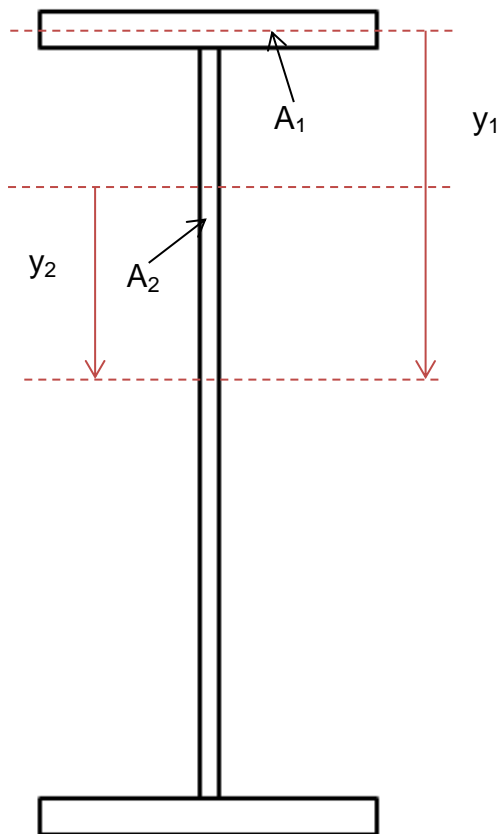
Kuvassa 11 esitetään valitun profiilin poikkileikkausta. Profiilin jäyhyysmomentti saadaan kaavalla 11.



Kuva 11. Hitsattu profiili

$$I = \frac{B * H^3 - b * h^3}{12} = \frac{300\text{mm} * (700\text{mm})^3 - 290\text{mm} * (660\text{mm})^3}{12} = 1627,18 * 10^6 \text{mm}^4 \quad (11)$$

Profiilin plastinen taivutusvastus saadaan staattisen momentin avulla. Kuvassa 12 esitetään staattisen momentin vapaakappalekuva. Plastisen taivutusvastuksen W_{pl} täytyy olla enemmän kuin taivutusvastus W . Lasketaan nämä suureet kaavalla 12 ja 14. I-profiilin staattinen momentti saadaan laskettua kaavalla 13.



Kuva 12. Staattinen momentti.

$$W_{pl} = 2 * S \quad (12)$$

$$S = A_1 * y_1 + A_2 * y_2 \quad (13)$$

$$\begin{aligned} S &= 20\text{mm} * 300\text{mm} * 340\text{mm} + 330\text{mm} * 10\text{mm} * 165\text{mm} \\ &= 2584,5 * 10^3 \text{mm}^3 \end{aligned}$$

$$W_{pl} = 2 * 2584,5 * 10^3 \text{mm}^3 = 5169 * 10^3 \text{mm}^3$$

$$W = \left(\frac{B * H^3 - b * h^3}{H} \right) * \frac{1}{6} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} W &= \left(\frac{300\text{mm} * (700\text{mm})^3 - 290\text{mm} * (660\text{mm})^3}{700\text{mm}} \right) * \frac{1}{6} \\ &= 4650 * 10^3 \text{mm}^3 \end{aligned}$$

$$W_{pl} > W$$

3.1.3 Palkin oma massa

Profiilin oma paino lasketaan volyymin kaavan avulla. Kaikki profiilin dimensiot on laskettu edellisessä luvussa, sitten voidaan laskea poikkileikkauksen pinta-ala kaavalla 15.

$$A = uuman\ pinta - ala + laippojen\ pinta - ala + hitsijen\ pinta - ala \quad (15)$$

$$A = 660mm * 10mm + 2 * 20mm * 300mm + 4 * 0,5 * (5,7mm)^2 = 18665mm^2$$

$$V = A * L \quad (16)$$

$$V = 18665mm^2 * 13000mm = 242,6 * 10^6mm^3$$

$$m = V * \rho \quad (17)$$

$$m = 242,6 * 10^6mm^3 * \frac{0,00786g}{mm^3} = 1907kg$$

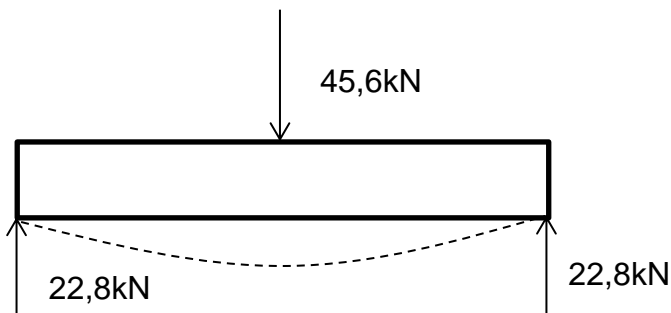
Profiilin kokonaismassa on 1907 kg, mutta tässä opinnäytetyössä mitoitetaan kaksipalkkinen siltanosturi. Sen takia profiilien kokonaismassa on 3814 kg. Laskentaosuudessa käytetään siltanosturin massan arvoa 4,3 tonnia, koska yleisesti nosturiin asennetaan muita laitteita kuin koukku, nostovaunu, moottori, köysi, joilla on omat massat. Laskennassa pitää ottaa huomioon kaikki laitteiden massat. Satateräs Oy:n mukaan koukun massa voi olla 500 – 1000 kg ja köyden massa on noin 1000 kg. (15)

3.1.4 Taipumat

Taipumien mitoitus on yksi tärkeimmistä vaiheista palkin suunnittelussa. Kun taivutusmomentti kasvaa, palkin muodonmuutokset ja taipumat kasvavat. EN 1993 Eurokoodi 3: nosturirakenteet-standardin ja sen kansallisen liitteen mukaan nosturin maksimi sallittu taipuma on $L/750$, missä L on palkin jänneväli. Jos laskettu taipuma on liian suuri ja haitallinen, sen suuruus ja vaikutus voidaan ehkäistä valmistuksen vaiheessa. Taipumat lasketaan käyttörajatilassa eli ilman osavarmuuslukuja. (7)

Käyttörajatilassa muodonmuutoksille ja siirtymille käytetään raja-arvona standardin kohdan mukaista suositusarvoa, elleivät nosturin käyttö tai muut

syyt, esimerkiksi nosturin kuljettaja kulkee nosturin mukana, edellyttä pienempien arvojen käyttöä. Tarvittaessa esitetään raja-arvo ratapalkin kiertymälle. (20)



Kuva 13. Palkin taipuma

Lasketaan palkin taipuma kaavalla 18.

$$\delta_m = \frac{F * L^3}{48E * I} \leq \frac{L}{750} \quad (18)$$

missä δ_m on maksimitaipuma

EI on taivutusjäykkyys.

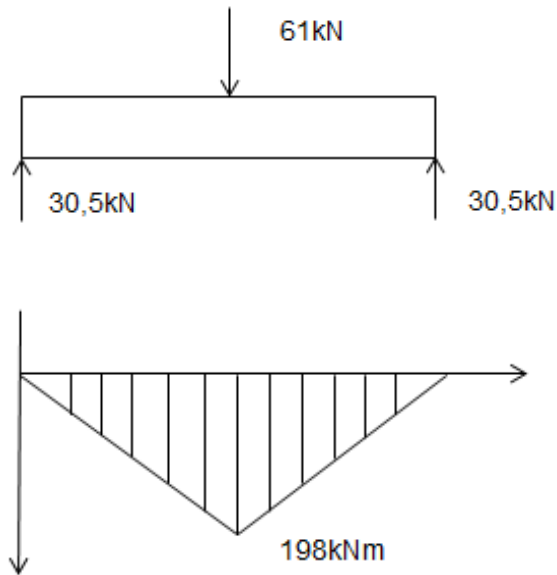
Verrataan profiilin saatu taipuma sallittuun taipumaan ja saadaan, että profiilin taipuma ei ylitä raja-arvoa.

$$\frac{L}{750} = 13 * \frac{10^3 mm}{750} = 17,3 mm$$

$$\frac{45,6 * 10^3 N * (13 * 10^3)^3 mm^3}{48 * 21 * 10^4 N/mm^2 * 1627,5 * 10^6 mm^4} = 6,1 mm < \frac{L}{750}$$

3.1.5 Momenttikestävyys

Siltanosturissa vaikuttaa muuttuva kuorma, siksi taivutusmomentti arvo voisi olla erilainen eri palkin pisteissä. Lasketaan ensin suurin vaikuttava taivutusmomentti. Suurin taivutusmomentti on palkin keskipisteessä, kun kokonaiskuorma vaikuttaa palkin keskipisteessä. Kuvassa 14 esitetään taivutusmomentin vapaakappalekuva.



Kuva 14. Taivutusmomentti

Taivutusmomentin kapasiteetti saadaan laskettua kaavalla 19. Taivutusmomentin laskenta-arvo ei saa ylittää momenttikapasiteetti.

$$M_R = f_y * W_{pl} \geq M_d \quad (19)$$

$$M_R = \frac{355\text{ N}}{\text{mm}^2} * 5169 * 10^3 \text{ mm}^3 = 1835\text{ kNm} \geq 198\text{ kNm}$$

missä f_y on myötölujuus

W_{pl} on plastinen taivutusvastus.

3.1.6 Laipan taipumisesta aiheutuva lommahdus

Puristettu laippa voi lommahtaa, jos profiilin uuma on hoikka. Syy on se, että uuma ei tue laippaa riittävästi. Varmuuden vuoksi lasketaan siltanosturin hitsatun profiilin mahdollinen lommahdus alla olevalla kaavalla 20. (14)

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k * \frac{E}{f_y} \sqrt{\frac{A_v}{A_{fc}}} \quad (20)$$

missä k on 0,3 poikkileikkausluokan 1 laipoille

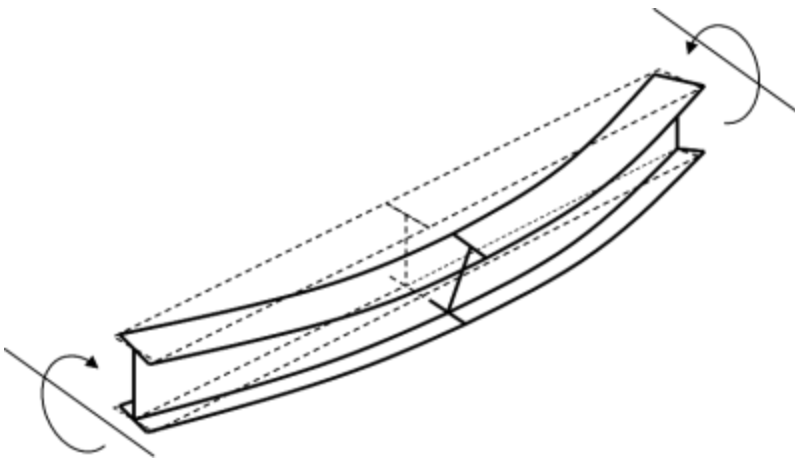
h_w on laipan vapaa väli

A_v on uuman pinta-ala

A_{fc} on puristetun laipan pinta-ala.

$$66 \leq 0,3 * \frac{21 * 10^4 \text{ N/mm}^2}{355 \text{ N/mm}^2} \sqrt{\frac{660\text{mm} * 10\text{mm}}{300\text{mm} * 20\text{mm}}}$$

$$66 \leq 186,1$$



Kuva 15. Lommahdus (17)

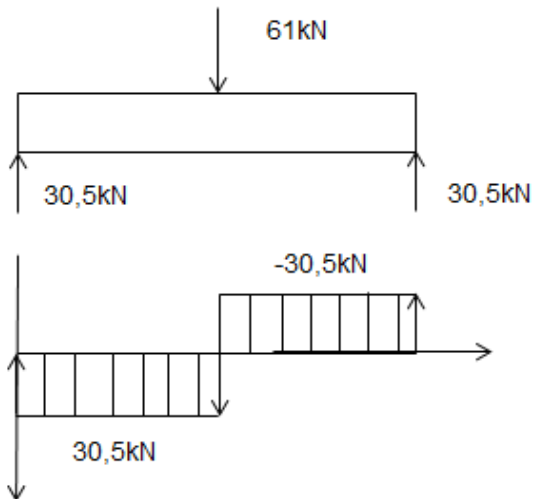
3.1.7 Leikkauskestävyys

Palkin suunnittelussa ja mitoituksessa pitää ottaa huomioon leikkausvoiman vaikutus. Lasketaan ensin leikkauspinta-ala A_v , jonka jälkeen lasketaan plastinen leikkauskestävyys. Leikkauskestävyyden täytyy olla enemmän kuin leikkausvoiman laskenta-arvo.

Jos kuormitus on uuman suunnassa, leikkauspinta-ala lasketaan kaavan 21 avulla. Kaava löytyy Eurokoodi 3-standardista. (18, s.51)

$$A_v = \sum (h_w * t_w) \quad (21)$$

$$A_v = 660\text{mm} * 10\text{mm} = 6600 \text{ mm}^2$$



Kuva 16. Leikkausvoiman kaavio

Lasketaan palkin leikkauskestävyys kaavalla 22.

$$V_{pl.Rd} = \frac{\tau_{sall}}{\gamma_{M0}} * A_v \quad (22)$$

$$\tau_{sall} = \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad (23)$$

$$V_{pl.Rd} = \frac{204,9 \text{ N/mm}^2}{1,0} * 6600 \text{ mm}^2 = 1353 \text{ kN}$$

$$V_{pl.Rd} \geq Q$$

missä h_w on uuman korkeus

t_w on uuman paksuus

τ_{sall} on leikkausjännitys

$V_{pl.Rd}$ on leikkauskestävyys

γ_{M0} on osavarmuusluku.

Saadun tuloksen perusteella todetaan, että palkki kestää vaikuttavaa leikkausvoimaa.

3.1.8 Kiepahduskestävyys

Kiepahdus tarkoittaa sitä, että vahvemmassa suunnassaan kuormitettu palkki taipuu ja kiertyy sivulle. Kiepahduksen vaikutus tulisi ottaa huomioon pienenemällä taivutusmomentin kapasiteettia. Kiepahduskestävyys riippuu palkin poikkileikkauksen pinta-alalta, leveydestä, vaikuttavasta voimasta ja muista profiilin vakioista. (7)

Lasketaan kiepahdusmomentti M_{el} kaavalla 24.

$$M_{el} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_\omega}\right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_v}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2} - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right] \quad (24)$$

missä I_z on neliömomentti

I_v on vääntöneliömomentti

I_ω on käyritysmisjäyhyys

C_1, C_2 ja C_3 ovat vakioita, jotka riippuvat kuormituksesta

k ja k_ω ovat teholliseen pituuteen liittyviä tekijöitä

z_g on kuorman vaikutuspisteen koordinaatin ja vääntökeskiön erotus eli 350mm.

$z_j = 0$ kaksoissymmetrisille profiileille.

Neliömomentti, vääntöneliömomentti ja käyritysmisjäyhyys lasketaan kaavalla 25, 26 ja 27. Kaikki tarvittavat kertoimet löytyvät taulukoista Eurokoodi 3-standardista.

$$I_z = \frac{BH^3 + bh^3}{12} \quad (25)$$

$$I_z = \frac{40\text{mm} * (300\text{mm})^3 + 660\text{mm} * (10\text{mm})^3}{12} = 90,1 * 10^6 \text{mm}^4$$

$$I_w = 0,25h_f^2 I_z \quad (26)$$

missä h_f on laippojen painopisteiden välinen etäisyys.

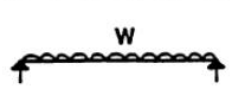

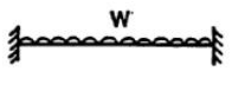



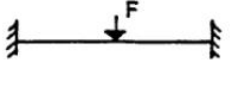

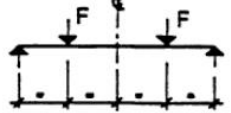

$$I_w = 0,25 * (680\text{mm})^2 * 90,1 * 10^6 \text{mm}^4 = 10415,6 * 10^9 \text{mm}^6$$

$$I_v = \frac{1}{3}(2bt_f^3 + h_w t_w^3) \quad (27)$$

$$I_v = \frac{1}{3}(2 * 300\text{mm} * (20\text{mm})^3 + 660\text{mm} * (10\text{mm})^3) = 182 * 10^4 \text{mm}^4$$

Tuentatapaukset sauvan päissä	Poikkipinnan käyristyminen estetty molemmissa päissä	Poikkipinta voi käyristyä molemmissa päissä	Poikkipinnan käyristyminen estetty toisessa päissä, toinen pää voi käyristyä
Kiertymä estetty	$k = 0,5$	$k = 0,5$	$k = 0,5$
Kiertymä vapaa molemmissa päissä	$k = 1,0$	$k = 1,0$	$k = 0,7$
Kiertymä estetty toisessa päissä, toinen pää voi kiertyä vapaasti	$k = 0,7$	$k = 0,7$	$k = 0,7$

Kuva 17. Teholliset kertoimet. (14, s.53.)

Kuormitus ja tukiehdot	Taivutusmomenttipinnan muoto	k:n arvo	Tekijöiden arvot		
			C_1	C_2	C_3
		1,0	1,132	0,459	0,525
		0,5	0,972	0,304	0,980
		1,0	1,285	1,562	0,753
		0,5	0,712	0,652	1,070
		1,0	1,365	0,555	1,730
		0,5	1,070	0,432	3,050
		1,0	1,565	1,267	2,640
		0,5	0,938	0,715	4,800
		1,0	1,046	0,430	1,120
		0,5	1,010	0,410	1,890

Kuva 18. Tekijöiden C_1, C_2 ja C_3 arvoja erilaisilla kuormituksilla. (14, s.53.)

$$1. M_{el} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} = \frac{1,365 \cdot \pi^2 \cdot 21 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2 \cdot 90,1 \cdot 10^6 \text{ mm}^4}{(1 \cdot 13000 \text{ mm})^2} = 1506778,2 \text{ N}$$

$$2. \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_\omega}\right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_v}{\pi^2 EI_z} + (C_2 Z_g)^2} - (C_2 Z_g) \right] =$$

$$\sqrt{\left(\frac{1}{0,5}\right)^2 \frac{10415,6 \cdot 10^9 \text{ mm}^6}{90,1 \cdot 10^6 \text{ mm}^4} + \frac{(1 \cdot 13000 \text{ mm})^2 \cdot 80 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2 \cdot 182 \cdot 10^4 \text{ mm}^4}{\pi^2 \cdot 21 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2 \cdot 90,1 \cdot 10^6 \text{ mm}^4} + (0,553 \cdot 350 \text{ mm})^2} -$$

$$(0,553 \cdot 350 \text{ mm}) = \sqrt{462401,77 \text{ mm}^2 + 131899,97 \text{ mm}^2 + 37461,6 \text{ mm}^2} -$$

$$193,55 \text{ mm} = 601,28 \text{ mm}$$

$$3. M_{el} = 1506778,2 \text{ N} \cdot 601,28 \text{ mm} = 906 \text{ kNm}$$

Muunnettu hoikkuus saadaan laskuttua kaavalla 28.

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{pl}}{M_{el}}} = \sqrt{\frac{W_{pl} f_y}{M_{el}}} \quad (28)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{5169 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 \cdot 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{906 \cdot 10^6 \text{ Nmm}}} = 1,4 > 0,4$$

→ Jos muunnettu hoikkuus on pienempi kuin 0,4, kiepahdusta ei tarvitse ottaa huomioon. Tässä opinnäytetyössä kiepahduskestävyys pitää laskea.

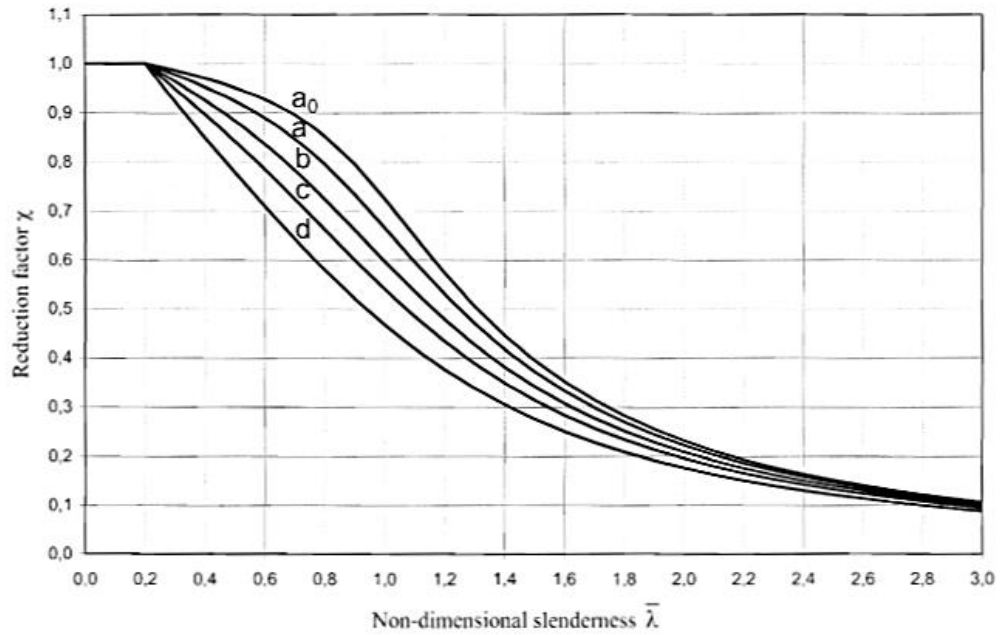
Seuraavalla lasketaan kiepahduskestävyyden pienennyskerroin X_{LT} kaavalla 29.

$$X_{LT} = \frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1 \quad (29)$$

$$X_{LT} = \frac{1}{1,77 + \sqrt{1,77^2 - 1,4^2}} = 0,35 \leq 1$$

missä $\varphi_{LT} = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 \cdot \left[1 + 0,49 (1,4 - 0,2) + 1,4^2 \right] =$
 $1,77$

$$\alpha_{LT} = 0,49 \text{ hitsatulle profiilille.}$$



Kuva 19. Kiepahduskäyrät (18, s.59.)

Lasketaan kiepahduskestävyys kaavalla 30. (18, s.60.)

$$M_{b.Rd} = X_{LT} \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M1}} \quad (30)$$

$$M_{b.Rd} = 0,35 * \frac{5169 * 10^3 \text{mm}^3 * 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1,0} = 642 \text{kNm} > 198 \text{kNm}$$

$$\frac{M_d}{M_{b.Rd}} \leq 1,0 \quad (31)$$

$$\frac{198 \text{kNm}}{642 \text{kNm}} = 0,3 < 1,0$$

Verrataan tuloksia ja huomataan, että momenttikestävyys on enemmän kuin vaikuttava taivutusmomentti. Se tarkoittaa sitä, että profiili kestää kaikki mahdollisia kuormituksia.

3.1.9 Taivutusmomentti- ja leikkauskestävyys

Taivutusmomentti ja leikkausvoima vaikuttavat yleensä palkissa samaan aikaan. Jos leikkausvoiman laskenta-arvo ei ylitä puolet plastisesta

leikkauskestävyydestä, leikkausvoiman vaikutus taivutuskestävyyteen ei oteta huomioon. (14, s. 82.)

$$Q > 0,5 * V_{pl.Rd} \quad (32)$$

$$30,5kN < 0,5 * 1353kN$$

3.2 Väsymisen laskenta

Teräksen väsyminen on ilmiö, kun rakenne murtuu ajan kuluessa väsyttävän kuormituksen vaikutuksesta. Väsyttävä kuormitus on aina vaihteleva, sen amplitudi voi olla vakio tai muuttuva. Yleisesti koneissa ja rakenteissa väsyttävä kuormitus on muuttuva, jännitysvaihtelu muuttuu ajan suhteen. Tällainen ilmiö tapahtuu usein I-ohutuumaisessa profiilissa. Väsyminen tapahtuu uuman ja laipan välissä hitseissä.

Hitseissä olevat alkusäröt aiheutuvat profiilin väsymistä. Säröt kasvavat ja etenevät väsyttävän kuormituksen vaikutuksesta. Niin sanottu jännityshuippu syntyy hitsien reunoihin. Hitsin ja perusmateriaalin yhdistymiskohta on kriittisin piste. Teräksen lujuus ei vaikuta rakenteen väsymiskestävyyteen, koska alkusäröt ovat aina hitsatuissa rakenteissa teräksen myötölujuudesta riippumatta.

Väsymislujuuden tarkastusmenetelmät ovat (14, s. 181 – 183.):

1. Nimellisten jännitysten menetelmä

Jännitykset lasketaan kimmoteorian perusteella. Ei oteta huomioon epäjatkuvuuskohtien vaikutuksia, koska ne sisältyvät kuormituskokeisiin. Eurokoodin standardien väsymistarkastus perustuu nimellisten jännitysten menetelmään.

2. Hot spot -jännitysten menetelmä

Tässä menetelmässä lasketaan ”geometrinen” jännitys. Epäjatkuvuuskohtien vaikutus otetaan huomioon, geometrinen jännitys on suurempi kuin nimellinen jännitys. Se sijaitsee kriittisessä pisteessä eli hitsin rajaviivalla.

3. Lovijännitysten menetelmä

Geometrisen jännityksen lisäksi lasketaan loven aiheuttama epälineaarinen huippujännitys.

4. Murtumismekaniikka

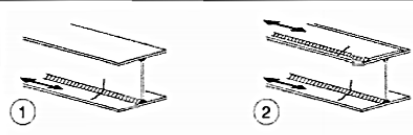
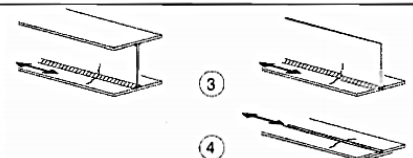
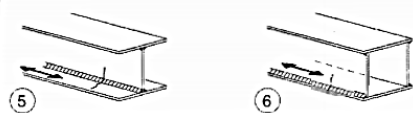

Väsymisikä lasketaan särön kasvunopeuden perusteella.

Tässä opinnäytetyössä taskastetaan hitsien väsymiskestävyys nimellisten jännitysten menetelmän avulla. Ensin lasketaan $\Delta\sigma_i$ normaalijännitysten vaihteluväli käyttörajatilassa kaavalla 33.

$$\Delta\sigma_i = \frac{M}{W} = \frac{148 * 10^6 Nmm}{4650 * 10^3 mm^3} = 31,8 N/mm^2 \quad (33)$$

missä W on hitsatun profiilin taivutusvastus.

Tämä opinnäytetyön hitsatun profiilin väsymisluokka on 112 kuvan 20 mukaan.

Detail category	Constructional detail	Description	Requirements
125		<p>Continuous longitudinal welds:</p> <p>1) Automatic or fully mechanized butt welds carried out from both sides.</p> <p>2) Automatic or fully mechanized fillet welds. Cover plate ends to be checked using detail 6) or 7) in Table 8.5.</p>	<p>Details 1) and 2):</p> <p>No stop/start position is permitted except when the repair is performed by a specialist and inspection is carried out to verify the proper execution of the repair.</p>
112		<p>3) Automatic or fully mechanized fillet or butt weld carried out from both sides but containing stop/start positions.</p> <p>4) Automatic or fully mechanized butt welds made from one side only, with a continuous backing bar, but without start/stop positions.</p>	<p>4) When this detail contains stop/start positions category 100 to be used.</p>
100		<p>5) Manual fillet or butt weld.</p> <p>6) Manual or automatic or fully mechanized butt welds carried out from one side only, particularly for box girders</p>	<p>5), 6) A very good fit between the flange and web plates is essential. The web edge to be prepared such that the root face is adequate for the achievement of regular root penetration without break-out.</p>
100		<p>7) Repaired automatic or fully mechanized or manual fillet or butt welds for categories 1) to 6).</p>	<p>7) Improvement by grinding performed by specialist to remove all visible signs and adequate verification can restore the original category.</p>

Kuva 20. Eräiden hitsattujen profiilien väsymisluokat (19, s.22.)

Vakioamplitudinen kuormitus lasketaan kaavalla 34.

$$N_i = 5 * 10^6 \left(\frac{\frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}}}{\gamma_{Ff} * \Delta\sigma_i} \right)^3 \quad (34)$$

$$N_i = 5 * 10^6 \left(\frac{\frac{83 \text{ N/mm}^2}{1,25}}{1 * 31,8 \text{ N/mm}^2} \right)^3 = 45,5 * 10^6 \text{ sykliä}$$

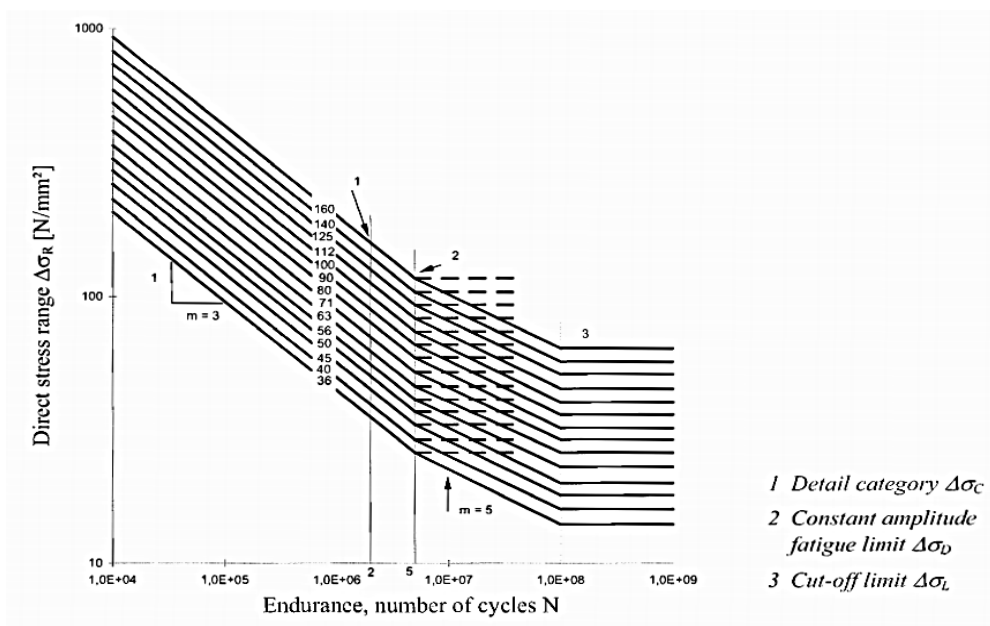
missä $\Delta\sigma_D$ on vakioamplitudinen väsymisraja (5 miljoona sykliä)

$\Delta\sigma_i$ on normaalijännitysten vaihteluväli

γ_{Mf} on kuormien osavarmuusluku (1,25)

γ_{Ff} on teräksen osavarmuusluku (1,0).

Normaalijännitysvaihtelun väsymisrajat löytyvät kuvasta 21.



Kuva 21. Väsymislujuuden käyrät. Normaalijännitysvaihtelu (19, s.15.)

Leikkausjännitys lasketaan kaavalla 35.

$$\Delta\tau_i = 2 * \frac{Q}{A_w} \quad (35)$$

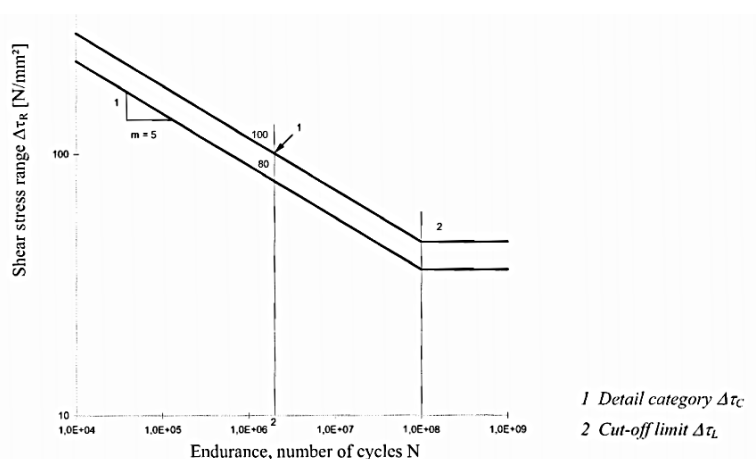
$$\Delta\tau_i = 2 * \frac{22,8 * 10^3 N}{6600 mm^2} = 6,9 N/mm^2$$

$$N_i = 2 * 10^6 \left(\frac{\frac{\Delta\tau_C}{\gamma_{Mf}}}{\gamma_{Ff} * \Delta\tau_i} \right)^5 \quad (36)$$

$$N_i = 2 * 10^6 \left(\frac{\frac{100 N/mm^2}{1,25}}{1 * 6,9 N/mm^2} \right)^5 = 419 * 10^9 \text{ sykliä}$$

missä $\Delta\tau_C$ on leikkausjännitysvaihtelun mukainen väsymisluku 2 miljoonan syklin kohdalla

$\Delta\tau_i$ on leikkausjännitysten vaihteluväli.



Kuva 22. Väsymislukuuden käyrät. Leikkausjännitysvaihtelu (19, s.16)

3.3 Värähtelyt

Vaikuttavasta voimasta rakenteeseen syntyy muodonmuutoksia. Kun voima poistetaan ja sitten lisätään takaisin, palkki värähtelee. Jos värähtelyn amplitudi kasvaa liian suureksi, koko rakenne murtuu. Tämän takia on tärkeä tietää rakenteen ominaistaajuus. (20)

Palkin jäykkyys voidaan laskea kaavalla 37.

$$k = \frac{48 * EI}{L^3} \quad (37)$$

$$k = \frac{48 * 2,1 * 10^{11} \text{ N/m}^2 * 0,001627\text{m}^4}{(13\text{m})^3} = \frac{7464,7\text{kN}}{\text{m}}$$

Palkin ominaistuuksia saadaan laskettuna kaavalla 38.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (38)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{7464,7 * 10^3 \text{ N/m}}{(5000\text{kg} + \frac{1}{3} * 4300\text{kg}) * 9,82\text{m/s}^2}} = 1,73\text{Hz}$$

Saadaan tulos, että siltanosturin palkin ominaistuuksia on pieni, eikä värähtely synny tähän rakeenteseen.

3.4 SolidWorks-ohjelmisto

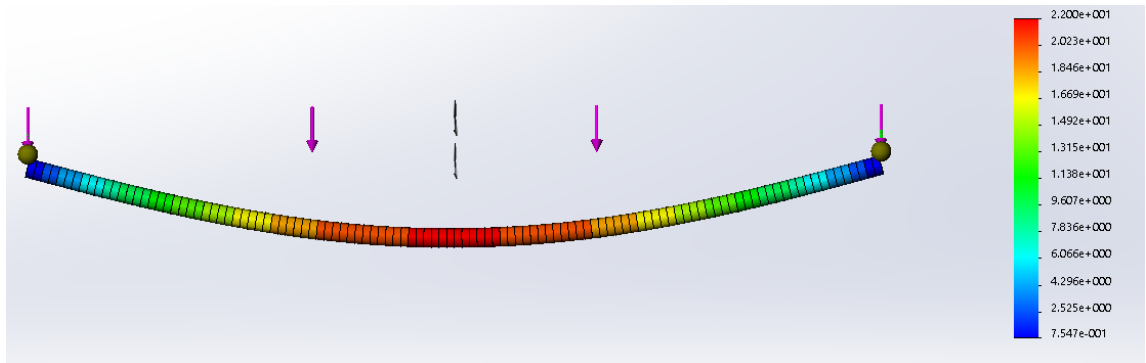
Siltanosturin suunnittelun seuraava vaihe on palkin mallintaminen SolidWorks-ohjelmistossa. Käytetään palkin dimensioita, jotka on saatu mitoituksen vaiheessa. Lisätään neljä hitsiliitosta profiilin laipan ja uuman välissä. Hitsin a-mitta on neljä millimetriä. 3-D mallin pohjapiirros löytyy liitteestä.

SolidWorksin Simulation-työkalu antaa mahdollisuutta vertailla käsinlaskennan osan tuloksia ohjelman saatuihin tuloksiin. Ohjelman tuloksia esitetään aina kuvissa, jonka avulla on helppo arvioida niitä. Tämän työkalun avulla saadaan selville, missä kohdassa palkin muodonmuutokset ovat suurimmat.

3.4.1 SolidWorksin staattinen analyysi

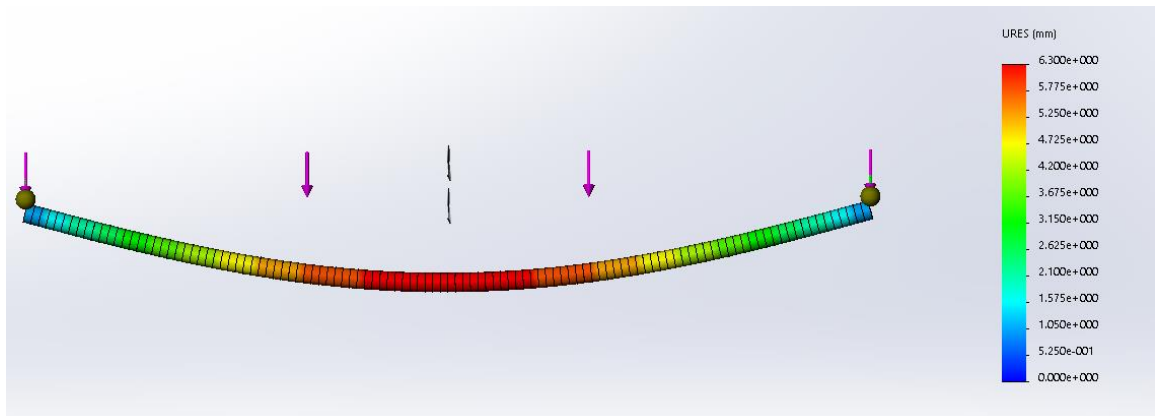
Staattinen analyysi näyttää siltanosturin palkin muodonmuutoksia kuten taipumia, jännityksiä, tukireaktioita. Kuvassa 23 esitetään suurin von Mises-jännitys nosturin palkissa. Palkki on vapaasti tuettu. Käyttämällä von Misesin jännitysmenetelmää voidaan sanoa, missä vaiheessa rakenne murtuu. Jos von Misesin maksimijännitys ylittää materiaalin myötörajan, rakenne murtuu. Suurin laskettu jännitys palkissa on $72,57 \text{ N/mm}^2$ ja materiaalin myötölujuus on 490

MPa. Kuvassa näkyy, että runko kestää tätä jännitystä, koska rungon väri on sininen. Materiaalin myötölujuus on suurempi kuin von Misesin maksimijännitys. Sininen väri tarkoittaa sitä, että runko taipuu sallitulla tasolla.



Kuva 23. Sallittu jännitys

Palkin taipuma kuormituksen vuoksi on pieni, noin 6 mm. Analyysissa ei otettu huomioon palkin omaa massaa. Käsinlaskentaan verrattuna taipuma on melkein sama. Kuvassa 24 esitetään voiman vaikutuksesta aiheutuva maksimitaipuma.



Kuva 24. Maksimitaipuma

4 Tulokset ja pohdinta

Työn tarkoituksena oli suunnitella siltanosturin runko eurooppalaisten standardien perusteella. Tuloksena saatiin valmis siltanosturin palkki, lasketut kestävyudet ja lujuuslaskelmat. Valittiin sopiva I-ohutuuminen hitsattu profiili. Valittu profiili mitoitettiin vastaamaan standardeista löytyviä arvoja ja rajoituksia. Profiili kestää kaikkia kuormituksia, jotka on määrätty työn alussa. Sen elinikä on samanlainen kuin valmistajan siltanosturin elinikä on. Tämä opinnäytetyö antaa mahdollisuutta seurata koko profiilin mitoituksen kulkua.

Tässä opinnäytetyössä käytettiin SolidWorks-ohjelmistoa siltanosturin rungon tutkimiseen. Simulation-työkalu ei ollut hyvin tuttu minulle, mutta olen jo tehnyt muutamia yksinkertaisia analyyseja tämän ohjelmiston avulla. Mielestäni, tulokset, jotka saatiin ohjelmistosta, ovat vain suuntaa antavia, koska analyysissä ei otettu huomioon eri tekijöitä. Analyyseja tehtäessä voidaan valita vain kuormituksia ja kiinnityksiä, eikä muita kertoimia. Yksinkertainen analyysi, kuin staattinen analyysi, näyttää samanlaisia tuloksia kuin saadut tulokset käsinlaskennan osassa.

Mitoitusvaiheessa laskettiin vain palkin rasituksia ja kestävyksiä. Nosturin komponenttien suunnittelu ja mitoitus on yksi tärkeimmistä asioista, joka täytyy tehdä huolellisesti. Pilarien ja kiskojen mitoitus tehdään erikseen, koska niiden mitoituksessa käytetään omia standardeja ja rajoituksia.

Kuvat

- Kuva 1. Kauhalla varustettu siltanosturi (1), s.7
- Kuva 2. Yksipalkkinen siltanosturi (4), s.9
- Kuva 3. Kaksipalkkinen siltanosturi (5), s.10
- Kuva 4. Palkin liitokset (8), s.11
- Kuva 5. Sähkömagneeteilla varustettu siltanosturi (11), s.13
- Kuva 6. Palkin kuormitus, s.15
- Kuva 7. Leikkausvoiman ja momentin kaaviot, s.16
- Kuva 8. Uuman poikkileikkausluokka (18), s.17
- Kuva 9. Hitsin dimensiot, s.18
- Kuva 10. Laipan poikkileikkausluokka (18), s.18
- Kuva 11. Hitsattu profiili, s.19
- Kuva 12. Staattinen momentti, s.20
- Kuva 13. Palkin taipuma, s.22
- Kuva 14. Taivutusmomentti, s.23
- Kuva 15. Lommahdus (17), s.24
- Kuva 16. Leikkausvoiman kaavio, s.25
- Kuva 17. Teholliset kertoimet (14), s.27
- Kuva 18. Tekijöiden C_1 , C_2 ja C_3 arvoja erilaisilla kuormituksilla (14), s.27
- Kuva 19. Kiepahduskäyrät (18), s.29
- Kuva 20. Hitsattujen profiilien väsymisluokat (19), s.31
- Kuva 21. Väsymislujuuden käyrät. Normaalijännitysvaihtelu (19), s.32
- Kuva 22. Väsymislujuuden käyrät. Leikkausjännitysvaihtelu (19), s.33
- Kuva 23. Sallittu jännitys, s.35
- Kuva 24. Maksimi taipuma, s.35

Taulukot

- Taulukko 1. Lähtöarvot (12), s.14

Lähteet

1. GH Cranes and Components 2016. Facilities.
<https://www.ghcranes.com/en/facilities/>
2. Verschoof, Ing. J. 2002. Cranes. Design, Practice and Maintenance. Second Edition. J W Arrowsmith Limited, 1 – 35.
3. MacCrimmon, R. A. 2005. Guide for the Design of Crane-Supporting Steel Structures. Quadratone Graphics Ltd. 8 – 45.
4. Crane service systems 2016. Overhead crane components.
<http://www.craneservicesystems.com/overheadcranecomponents.cfm>
5. Munck Cranes Inc. 2016. Overhead crane components.
<http://www.munckcranes.com/overheadcranecomponents.asp>
6. Chen, W. F. 2003. The civil engineering. Handbook. Second edition. CRC Press LLC. Kappale 44.
7. Hämeen ammattikorkeakoulu ja kirjoittajat. 2008. Teräsrakentaminen. Saarijärven Offset Oy, kappaleet 4 ja 16.
8. Powerlines 2016.
<http://vahle-russia.com/systems/powerails/>
9. MacGinley, T. J. & Ang, T. C. 1992. Structural Steelwork. Design to Limit State Theory. Butterworth-Heinemann Ltd, 24 – 57.
10. Shapiro, L. & Shapiro, J. 2011. Cranes and Derricks. The McGraw-Hill Companies, Inc., 40 – 41.
11. VMT-Russia 2016. Sähkömagneetti.
<http://www.vmtelnix.ru/catalog/spetsialnye-mostovye-kran/magnitnyy-mostovoy-kran/>
12. Uralcrane 2016.
<http://www.uralkran.ru/>
13. SFS-EN 1991-3 Eurocode 3: National appendix: Nostureiden ja muiden koneiden aiheuttamia kuormia koskevista kansallisista valinnoista sovellettaessa standardia. 2005
14. Lehtinen, I. 2000. Hitsatut profiilit. Käsikirja. Otavan Kirjapaino. 1 – 197.
15. Satateräs 2016. Galleria.
<http://www.satateras.fi/galleria/index.php?kieli=1>

16. EN 1993-6 Eurocode 3: Design of steel structures – Part 6: Crane supporting structures. 2007
17. Steelconstruction.info, free encyclopedia 2016.
http://www.steelconstruction.info/Design_of_beams_in_composite_bridges
18. EN 1993-1-1 Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. 2005
19. EN 1993-1-9: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-9: Fatigue. 2005
20. Aalto University. School of science. julkaisut
<http://viesti.physics.aalto.fi/pub/kurssit/Tfy-3.15xx/Teoria/tyo6.pdf>
21. Ympäristöministeriö. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Teräsrakenteet. 2015

Liitteet

