

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

LUT Metalli

BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

OHJAAMONOSTIMEN PERUSRUNGON LUJUUSTARKASTELU

Lappeenrannassa 31.05.2012

Taru Palviainen

SISÄLLYS

SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO	4
	1.1 Tutkimuskohde	4
	1.2 Tutkimusmenetelmä.....	5
2	SUUNNITTELUA OHJAAVAT STANDARDIT	6
	2.1 Standardien vaatima koneturvallisuus.....	6
	2.2 Kelpoisuuslaskelma	7
3	KUORMITUKSET.....	8
	3.1 Nimelliskuorma	8
	3.2 Rakennekuorma	8
	3.3 Hätäjarrutus	8
	3.4 Tuulikuorma.....	9
	3.5 Varmuuskertoimet.....	10
4	FE-MALLI JA LASKENNAN TOTEUTTAMINEN	11
	4.1 Elementtimalli	11
	4.2 Reunaehdot ja kuormitukset	12
	4.3 Materiaalit	13
5	LASKENTATULOKSET.....	14
	5.1 Rakenteelliset kuormitukset	14
	5.2 Hätäjarrutus	17
	5.2.1 Radiaalivoima.....	17
	5.2.2 Tangentiaalivoima	19
	5.2.3 Yhdistetyt voimat	20
	5.3 Tuulikuorma.....	20
	5.4 Kuormitustapausten jännitykset	21
6	TULOSTEN TARKASTELU.....	22
7	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	24
	LÄHDELUETTELO.....	25

LIITTEET:

LIITE 1: Staattisen kuormituksen laskenta

LIITE 2: Staattiset kuormitukset yhdelle korvakkeelle neljässä asennossa

LIITE 3: Hätäjarrutuksesta aiheutuvan kuormituksen laskenta

LIITE 4: Tuulesta aiheutuvan kuormituksen laskenta

LIITE 5: FEM-laskennan von Mises-vertailujännitykset eri kuormitustapauksissa

SYMBOLILUETTELO

a	Kiihtyvyys [m/s^2]
F	Voima [N]
M	Momentti [Nm]
r	Etäisyys pyörintäpisteeseen [m]
s	Materiaalin paksuus [mm]
α	Kulmakiihtyvyys [rad/s^2]
ω	Kulmanopeus [rad/s]

1 JOHDANTO

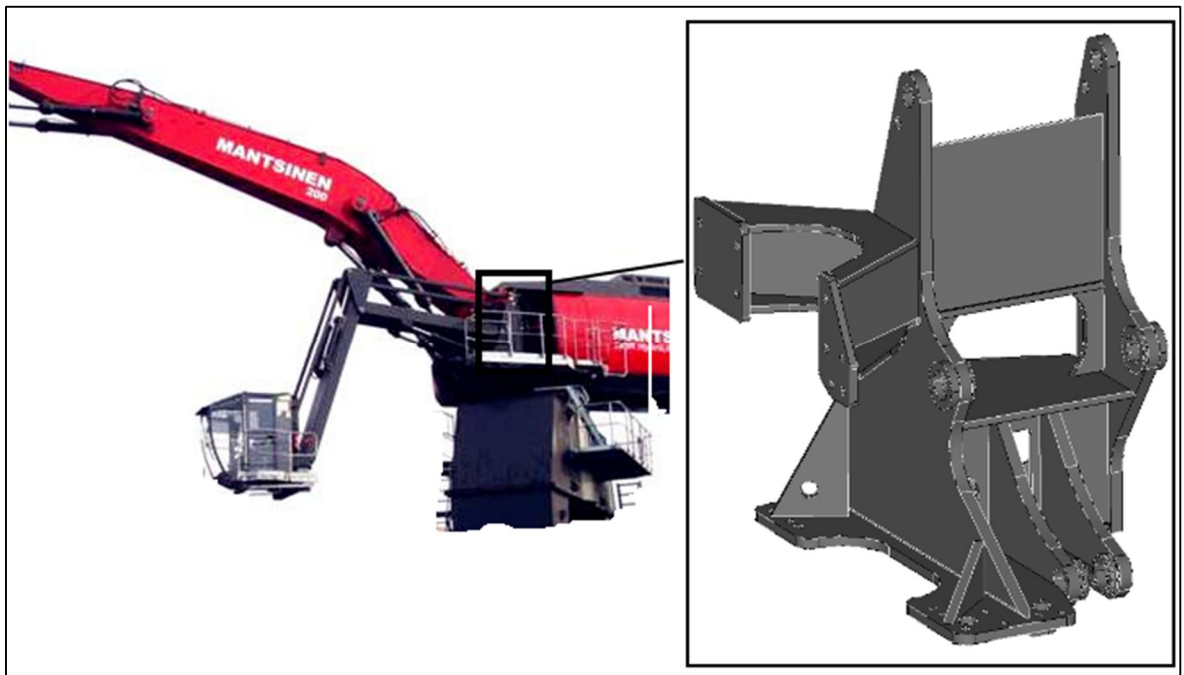
Koneiden turvallisuutta varmennetaan Euroopan Unionissa laaditulla konedirektiivillä. Direktiivin nojalla annettu asetus ohjaa sekä koneiden suunnittelua että niiden lujuuslaskentaa. Koneiden lujuustarkastelussa tulee huomioida tietyt kuormitukset, ja koneen kestävyys ja turvallisuus tulee täyttää sille asetetut vaatimukset.

Tässä työssä tutkitaan materiaalikäsittelykoneen ohjaamon nostimen kiinnitysrungon lujuutta. Kiinnitysrunkoon tulevat rasitukset lasketaan analyyttisesti. Kiinnitysrungosta laaditaan elementtimalli, johon asetetaan laskennassa saadut kuormitukset.

1.1 Tutkimuskohde

Ohjaamonostimeen kuuluvat tutkimuksen alainen perusrunko, nostovarsi, kaksi tukivartta, kolmiotuki, kaksi taiton tukivartta, taittovarsi, ohjaamon kiinnitysrunko sekä ohjaamo (Kuva 1). Sylinterit ja varsien nivelkiinnikkeet mahdollistavat ohjaamonostimen liikuttamisen eri asentoihin.

Perusrungon tulee kyetä kannattelemaan koko ohjaamonostimen massa. Lisäksi erityiskuormia aiheutuu tuulesta sekä hätäjarrutustilanteessa, jossa kone oletetaan pysäytettävän maksimipyörimisnopeudesta.



Kuva 1. Esimerkkikuva ohjaamonostimesta ja tässä työssä tutkittavasta perusrungosta.

1.2 Tutkimusmenetelmä

Perusrungon lujuuslaskennan tulee noudattaa koneasetuksen (2008/400) asettamia vaatimuksia. Lisäksi nostimille ja henkilönostimille on laadittu omat standardit (SFS-EN 13001-1, SFS-EN 280 + A2), jotka antavat tarkentavia vaatimuksia laskennan toteuttamiseen.

Tutkimus jakaantuu kahteen osaan. Ensimmäisessä vaiheessa lasketaan perusrunkoon tulevat kuormat eri kuormitustilanteissa. Kuormat määritetään analyttisesti statiikan laskusääntöjä noudattaen. Koska etukäteen ei voida varmuudella tietää mikä ohjaamonostimen asento antaa pahimman kuormituksen, lasketaan staattinen kuormitus ohjaamonostimen neljässä ääriasennossa. Kuormien laskentapohja tehdään siten, että samaa laskentapohjaa voidaan käyttää ohjaamonostimen asennon muuttuessa. Näin ollen laskulausekkeisiin tulee sisällyttää sekä nostovarren ja taittovarren kulmat. Lasketuille kuormille ja kuormitustapauksille määritetään varmuuskertoimet eurokoodin sekä nostureille laadittujen konestandardien mukaan.

Toisessa vaiheessa perusrungon 3D-mallista laaditaan elementtimalli, johon lasketut kuormat varmuuskertoimien asetaan. Elementtimallinnus tehdään FEMAP 10.3 ohjelmalla ja ratkaisijana käytetään NxNastrania. Elementtimenetelmällä saadaan laskettua rakenteen suurimmat vertailujännitykset, ja siten voidaan päätellä rakenteen kestävyys. Väsymislaskenta on rajattu tämän kandidaatintyön ulkopuolelle.

2 SUUNNITTELUA OHJAAVAT STANDARDIT

Koneille on säädetty standardeissa tietyt koneturvallisuusvaatimukset. Yleisesti koneturvallisuudella tarkoitetaan koneen kykyä suorittaa sille tarkoitettuja toimintoja sen elinaikana, kun vaarallisuuden riskiä on riittävästi pienennetty (EN-ISO 12100). Koneturvallisuutta ohjaavat yleistason standardit mutta tuotekohtaisesti voi olla yksityiskohtaisempia ja tarkempia standardeja.

2.1 Standardien vaatima koneturvallisuus

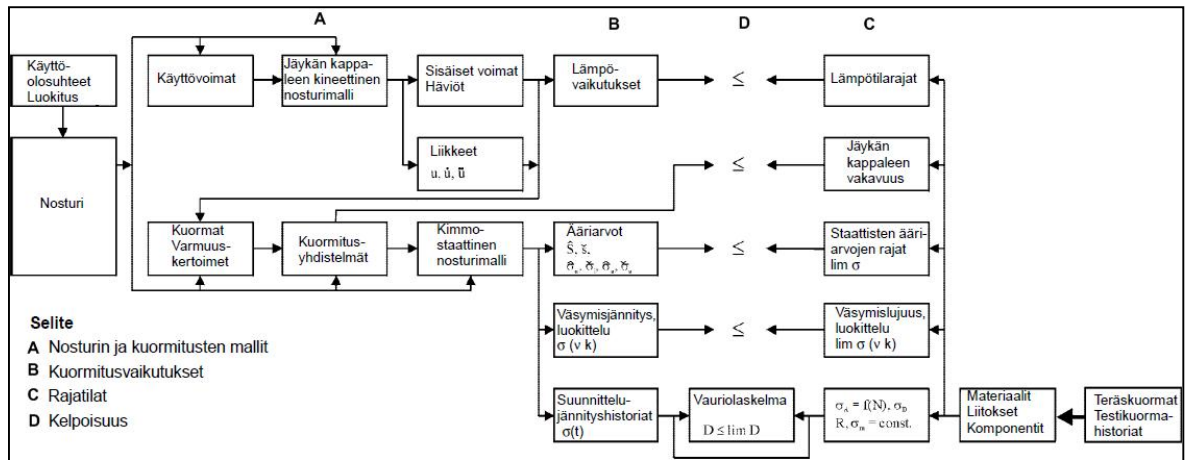
Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin pohjalta valtioneuvosto on antanut asetuksen koneiden turvallisuudesta (400/2008). Asetuksen soveltamisalaan kuuluvat tietyin poikkeuksin kaikki koneet ja osittain valmiit koneet. Koneen valmistaja on koneasetuksen nojalla velvollinen varmistamaan, että kone täyttää olennaiset terveysturvallisuusvaatimukset sekä muut konetta koskevat säädökset.

Konedirektiivin turvallisuusstandardit jaotellaan kolmiportaisen hierarkian mukaan A-, B- ja C- tyyppin standardeihin. Koneturvallisuuden A-tyypin standardit määrittelevät perusterminologian ja turvallisuussuunnittelun periaatteet. Tämän tason koneturvallisuusstandardi on yleisiä suunnitteluperusteita koskeva standardi SFS-EN ISO 12100. B-tyypin standardissa käsitellään suunnittelijoiden tarvitsemaa perustietoa kuten esimerkiksi melun ja värinän hallintaa sekä mittauksia, ergonomiaa, turvalaitteita, suojuksia ja turvaetäisyyksiä. C-tyypin standardi esittää tuotekohtaisesti tarkkoja ja yksityiskohtaisia turvallisuusvaatimuksia sekä määrittää miten A- ja B-tyypin standardeja on toteutettava. Jos suunniteltavasta koneesta on C-tyypin standardi, on se ensisijainen B-tyypin standardeihin nähden. Koneen on täytettävä C-tyypin standardissa esitetyt mahdolliset lisävaatimukset A- ja B-tyypin standardeihin nähden. (SFS-Käsikirja 93-1, s.6-24).

Nostinrakenteiden turvallisuutta, suunnitteluperusteita sekä vaatimuksia käsittelevät C-tyypin standardit ovat SFS-EN 13001-1 ja SFS-EN 13001-2. Lisäksi henkilönostimien suunnittelulaskelmille on oma C-tyypin standardi (SFS-EN 280 + A2). Tämä standardi määrittelee turvallisuusohjeet henkilöiden ja omaisuuden suojaamiseksi. Standardi sisältää pääosin ohjeistusta turvallisuusvaatimuksista ja toimenpiteistä, mutta siinä esitetään myös vaatimuksia rakenne- ja vakavuuslaskelmille.

2.2 Kelpoisuuslaskelma

Kelpoisuuslaskelmien tavoitteena on osoittaa teoreettisesti, että kone on suunniteltu niin että se täyttää turvallisuusvaatimukset mekaanisten vaarojen estämiseksi sovitussa käyttöolosuhteissa. Yksittäisten kuormitustapahtumien ja sitä edustavan käytön mukaan tehtävien kuormitusvaikutusten analyysien on kuvattava laitteen todellisia epäedullisia käyttöolosuhteita ja toimintojen jaksoja. Kelpoisuuslaskelmien toteuttamista yleinen kaavio on kuvassa 2. (EN 13001, s.12–14).



Kuva 2. Nosturirakenteen kelpoisuuslaskelman kaavio (EN 13001).

Ensimmäisessä vaiheessa laaditaan malli nosturista ja siihen tulevista kuormituksista. Nosturin sekä sen liikkeiden laskennassa käytetään jäykän kappaleen kinemaattisia malleja. Tästä mallista yhdessä kuormitusmallien kanssa voidaan johtaa kaikki siirtymien, nopeuksien sekä sisäisten voimien vaihtelut. Lasketut sisäisten voimien vaihtelut ja hetkelliset arvot edustavat ainoastaan todellisen prosessin keskiarvoja. Todellisten arvojen arvioimiseksi kuormitukset on kerrottava dynaamisilla kertoimilla Φ_1 . (EN 13001, s. 16).

Kelpoisuuslaskelman toisessa vaiheessa lasketaan kuormitusten vaikutukset. Samanaikaisesti esiintyvät kuormat asetetaan niin, että tarkastelunalaisessa tilanteessa saavutetaan kuormavaikutusten hetkelliset ääriarvonsa. Tällaisia yhteisvaikutuksia sanotaan kuormitusyhdistelmiksi (EN 13001, s. 16).

Kelpoisuutta osoitettaessa on määritettävä rajatila ja tehtävä selvitys ettei murtorajatilaa ole ylitetty. Jos rajatila ylitetään, menetetään nosturin kantokyky eikä nosturi näin ollen täytä sille asetettuja vaatimuksia. Kelpoisuuden osoittamiseksi on laadittava selvitys jossa osoitetaan; rakennosien, liitosten ja komponenttien lujuudet sekä staattisen että

jaksottaisen kuormituksen alaisena, nosturin ja sen osien stabiilitetti sekä jäykän kappaleen tasapaino. (EN 13001-1, s.16-18)

3 KUORMITUKSET

3.1 Nimelliskuorma

Henkilönostimen suunnittelulaskelmassa nimelliskuormana ovat standardin EN-280 mukaan henkilön- ja työkalujen massat. Yhden henkilön massa on 80 kg ja työkalujen vähimmäismassa 40 kg. Ohjaamo on mitoitettu siten, että sisällä voi olla yhtä aikaa kaksi henkilöä ja työkalut yhdelle henkilölle. Täten nimelliskuorma on 200 Kg. Henkilöiden ja varusteiden massa on 12 % koko ohjaamon massasta. Tässä laskelmassa tämän massan ei oleteta merkittävästi vaikuttavan ohjaamon omaan painopisteeseen, joten ohjaamossa olevalle henkilölle ja varusteille ei aseteta omaa painopistettä.

3.2 Rakennekuorma

Jäykän kappaleen tasostatiikassa oletetaan kappaleen käyttäytyvän täysin jäykästi. Tällöin kappaleen muodonmuutoksilla on erittäin pieni vaikutus kappaleen tasapainoon. Kappaleen painopisteeseen kohdistuu sen oman massan lisäksi maan vetovoima. Kappaleeseen vaikuttava voima lasketaan kertomalla kyseisen kappaleen massa maan vetovoiman kiihtyvyydellä

$$F_i = m_i \cdot a. \quad (1)$$

Tasapainoehdon mukaan jäykkä kappale on tasapainossa kun siihen vaikuttava voimasysteemi on tasapainossa. Näin ollen voidaan kirjoittaa seuraavat tasapainoyhtälöt

$$\sum F_i = 0 \quad (2)$$

$$\sum M_A = 0. \quad (3)$$

3.3 Hätäjarrutus

Hätäjarrutuksessa kone joutuu ympyräliikkeeseen. Käyräviivaiselle translaatiolle voidaan käyttää tn -ratakoordinaatistoa, jossa t kuvaa tangentiaalisuuntaa (eli kehänsuuntaa) ja n kappaleen radiaalisuuntaa. Kyseisiin suuntiin voidaan kirjoittaa voimaliikkeyhtälöt kaavan 1 tapaan.

Hätäjarrutus aiheuttaa nostimen osien rotaation kääntökoneiston ympäri. Tällöin massakeskiön kiihtyvyydet voidaan esittää tn -koordinaatistossa. Kiihtyvyys voidaan siten lausua normaalin- ja tangentialisuuntiin seuraavasti

$$a_n = r \omega^2 \quad (4)$$

$$a_t = r \alpha, \quad (5)$$

jossa ω on kulmanopeus, α on kulmakihtyvyys ja r on osan painopisteen kohtisuora etäisyys pyörintäpisteeseen. Jos kulmakihtyvyys pysyy vakiona, voidaan kulmanopeus lausua kaavalla

$$\omega = \omega_0 + \alpha t. \quad (7)$$

Kaavojen 4 ja 5 kiihtyvyysskomponenttien avulla voidaan kirjoittaa normaali- ja tangentialivoimille seuraavat summalausekkeet

$$\sum F_n = m\omega^2 r \quad (8)$$

$$\sum F_t = m\alpha r. \quad (9)$$

3.4 Tuulikuorma

Tuulivoimien oletetaan vaikuttavan vaakasuoraan nostimen osien ja varusteiden pinta-alojen keskipisteisiin (SFS-EN 280). Nosturin osaan kohtisuoraan vaikuttava tuulikuormitus lasketaan kaavalla

$$F = 0.5 \times \rho \times (1.5 \times v)^2 \times c \times A, \quad (10)$$

jossa ρ on ilman tiheys (1.25 kg/m^3), v on tuulen nopeus 10 metriä tasamaan tai merenpinnan yläpuolelta ja keskiarvona 10 minuutin ajalta, c on nosturiosan muotokerroin ja A on rakenneosan ominaispinta-ala (SFS-EN 13001-2).

Henkilönostimien suunnittelulaskelma -standardi sallii käytettäväksi tuulennopeutena 12.5 m/s . Koska nyt laskettavan ohjaamonostimen käyttöolosuhteet voivat merkittävästi vaihdella, käytetään tuulennopeutena suurinta mahdollista käyttöarvoa 20 m/s . Tätä suuremmat tuulennopeudet luokitellaan myrskyksi tai hirmumyrskyksi, jolloin nostinta ei ole sääolosuhteiden puitteissa turvallista käyttää. Ohjaamonostimen muotokertoimena voidaan käyttää suurinta mahdollista muotokerroinarvoa 1.6 , joka on tarkoitettu käytettäväksi L-, U-, T- ja I-rakenteille. Näillä lukuarvoilla saadaan laskettua kaavalla 10 tuulenpaineeksi 900 N/m^2 .

Tuulivoimat on kerrottava kertoimella 1.1, ja tuulivoiman oletetaan vaikuttavan vaakasuoraan (SFS-EN 280, s.30). Kun edellä laskettu tuulenpaine 900 N/m^2 kerrotaan varmuusluvulla 1.1, saadaan laskennalliseksi tuulenpaineeksi 990 N/m^2 .

3.5 Varmuuskertoimet

Kuormitukset luokitellaan pysyviin ja muuttuviin kuormiin. Pysyviä kuormia ovat rakenteiden oma paino ja muuttuvia kuormia ovat esimerkiksi hyöty- ja lumikuormat. Kun kuorman vaikutus on epäedullinen, pysyvä kuorma kerrotaan osavarmuuskertoimella 1.15 (SFS-EN 1990, s.88-98). Häätäpysäytystä ja tuulikuormitusta voidaan pitää kuormitustapauksena, jossa käyttövoimat aiheuttavat kiihtyvyyden. Tällöin nosturin oman painon varmuuskertoimena käytetään 1.35. Lisäksi hätäjarrutuksessa sekä nopeus että kiihtyvyys tulee kertoa arvolla 1.1 nosturin vakavuuden todentamiseksi (SFS-EN 13001-2, s.66).

Tarkastellessa rakenteen staattista tasapainoa tulee rakenteen kantokyky taata 1.5-kertaisista rakennekuormista kaikissa tutkittavissa tapauksissa. Dynaamisen suurennuskertoimen arvo riippuu ajokoneiston liikkeiden tasaisuudesta. Arvo on sitä suurempi mitä äkillisemmin voimat muuttuvat. Henkilönostimessa liikkeiden oletetaan muuttuvan suhteellisen rauhallisesti, joten suurennuskertoimena voidaan käyttää arvoa 1.5. Häätäjarrutuksessa voimat muuttuvat äkillisesti, joten dynaamisena suurennuskertoimena käytetään arvoa 2.0. (SFS-EN 1991-3 s. 34-70). Tuulikuormalle ei käytetä erillistä dynaamista kerrointa, koska tuulikuorman laskennassa on jo otettu huomioon vaativin käyttöolosuhde.

Taulukossa 1 on yhteenveto käytettävistä osavarmuuskertoimista eri laskentatapauksissa. Laskentamallissa oma paino ja sen osavarmuuskertoimet otetaan huomioon kertomalla maan putoamiskiihtyvyys kyseisellä kertoimen arvolla. Asetetut kuormitukset kerrotaan muuttuvan kuorman osavarmuuskertoimella.

Taulukko 1. Määritetyt osavarmuuskertoimet (EN 1990, EN 1991-3, EN 13001-2).

Kuormitustapaus	Pysyvä kuorma	Muuttuva kuorma	
	Oman painon osavarmuuskerroin	Kuorman osavarmuuskerroin	Dynaaminen kerroin
Normaali käyttö	1.15	1.5	1.5
Hätäpysäytys	1.35	1.5	2
Tuulikuorma	1.35	1.5	1

4 FE-MALLI JA LASKENNAN TOTEUTTAMINEN

Elementti- eli FE-menetelmällä saadaan numeerinen ratkaisu määrättyyn ongelmaan. FE-menetelmän etuna on sen monipuolisuus. Menetelmällä voidaan tutkia monimutkaisia rakenteita ja rakenteisiin voidaan asettaa lukuisia erilaisia reunaehtoja ja kuormitustapauksia. Monimutkaisissa ongelmissa menetelmällä saatu numeerinen ratkaisu on aina likimääräinen. (Cook 1995, s.1-15)

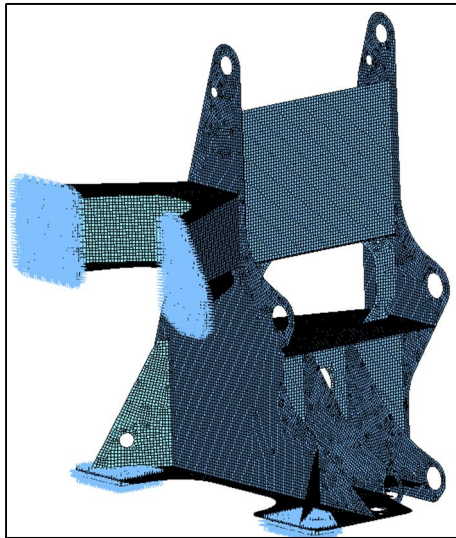
FE-menetelmässä rakenne jaetaan pienempiin osiin, joihin asetetaan kyseisen kohdan materiaaliominaisuuksia vastaavat elementit. Elementit yhdistyvät toisiinsa solmuista. Ratkaisu muodostuu algebrallisista yhtälöistä, joista laskentaohjelma ratkaisee solmujen siirtymät ja siten laskee venymät ja jännitykset. FE-menetelmän luotettavuus perustuu mallin oikeellisuuteen. Mallissa tulee olla riittävän tiheä elementtiverkko, elementtityyppi tulee olla käyttökohteeseen sopiva ja asetetut reunaehdot sekä kuormitukset tulee kuvata tutkittavan kohteen todellista käyttäytymistä. (Cook 1995, s.1-15)

4.1 Elementtimalli

Perusrungosta laadittiin elementtimalli kuorielementeillä (kuva 3). Kuorielementeillä rakenne mallinnetaan ainoastaan levyjen keskipintojen mukaan. Levyn paksuus otetaan huomioon elementtiin liittyvänä ominaisuutena. Kuorielementti kantaa kalvo-, leikkaus- ja taivutusrasituksia (Femap 2012). Hitsit oletetaan tasalujiksi, jolloin hitsien kohdassa on liittyvien levyjen paksuiset kuorielementit.

Perusrunko kiinnitetään neljästä pisteestä peruskoneen runkorakenteeseen. Kahdessa pohjakiinnityskohdassa on molemmissa kolme M20 ruuvia ja kahdessa sivukiinnityskohdassa toisessa on neljä ja toisessa viisi M20 ruuvia. Kiinnitysruuvit mallinnettiin palkkielementeillä. Palkkielementit pystyvät kantamaan vetoa, puristusta, leikkausta ja taivutusta. (Femap 2012)

Perusrungon kiinnityslevyjen ja koneen rungon väliin asetettiin kontakti- eli gap-elementit. Gap elementti asetetaan kahden solmun väliin ja ne kuvaavat kahden erotettavissa olevan pinnan välistä kontaktia. Kontaktielementille voidaan määrittää mm. puristus-, veto- ja poikittaisjäykkyydet. (Femap 2012)



Kuva 3. Perusrungon elementtimalli. Perusrunko on mallinnettu kuorielementeillä, kiinnityskohtien levyjen kontaktit mallinnettu gap-elementeillä ja kiinnitysruuvit palkkielementeillä.

4.2 Reunaehdot ja kuormitukset

Reunaehdot asetettiin koneen runkoa kuvaaviin solmuihin. Näihin elementteihin asetettiin jäykkä reunaehto eli kaikki siirtymät ja kiertymät estettiin.

Suurin staattinen kuormitus saadaan selville kun tutkitaan ohjaamonostimen neljää ääriasentoa. Periaatekuvat ohjaamonostimen neljästä asennosta näkyvät liitteen 2 taulukoista. Ohjaamonostimen asentojen, hätäjarrituksen sekä tuulikuormasta aiheutuvien kuormitusten perusteella tehtiin kahdeksan kuormitustapausta:

1. Ohjaamonostin vaaka-asennossa
2. Ohjaamonostin ala-asennossa
3. Ohjaamonostin ylä-asennossa
4. Ohjaamonostin täysin taitettuna eli ”sumppu” asennossa
5. Hätäjarrutus vastapäivään
6. Hätäjarrutus myötäpäivään
7. Tuulikuorma vastapäivään
8. Tuulikuorma myötäpäivään

Lasketut kuormat asetetaan pistevoimina korvakkeisiin. Rakenteen oma paino huomioidaan asettamalla malliin maan vetovoimankiihtyvyyks 9.81 m/s^2 (asetettu yksiköissä 9810 mm/s^2). Laskennassa käytetyt osavarmuuskertoimet on määritetty kappaleessa 3.5.

4.3 Materiaalit

Ohjaamonostimen perusrunko valmistetaan S355 rakenneteräksestä. Materiaalin kimmokerroin on 210 GPa ja Poissonin luku 0.3. Rakenteen levynpaksuudet vaihtelevat 15-40 mm välillä. Eri levynpaksuuksien materiaaliominaisuudet on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Lujuusarvot eri levynpaksuuksille standardin EN 10025-2 mukaan.

Materiaali EN 10025	Paksuus, s	Myötöraja	Murtolujuus
S355K2	$s \leq 16 \text{ mm}$	355 MPa	470 - 630 MPa
S355K2	$16 \text{ mm} < s \leq 40 \text{ mm}$	345 MPa	470 - 630 MPa

Perusrungon jännitysten tulee kestää materiaalin myötörajan alapuolella. Myötörajan alapuolella teräksen käyttäytyminen voidaan olettaa lineaariseksi, joten elementtiohjelmaan materiaalimalli luotiin lineaariseksi. Analyysissä myös geometrian ajatellaan käyttäytyvän lineaarisesti. Geometrinen epälineaarisuus syntyy silloin kun rakenteen siirtymät aiheuttavat merkittäviä kuormituksen uudelleenjakaantumista ja rakenteen jäykkyyden muuttumista.

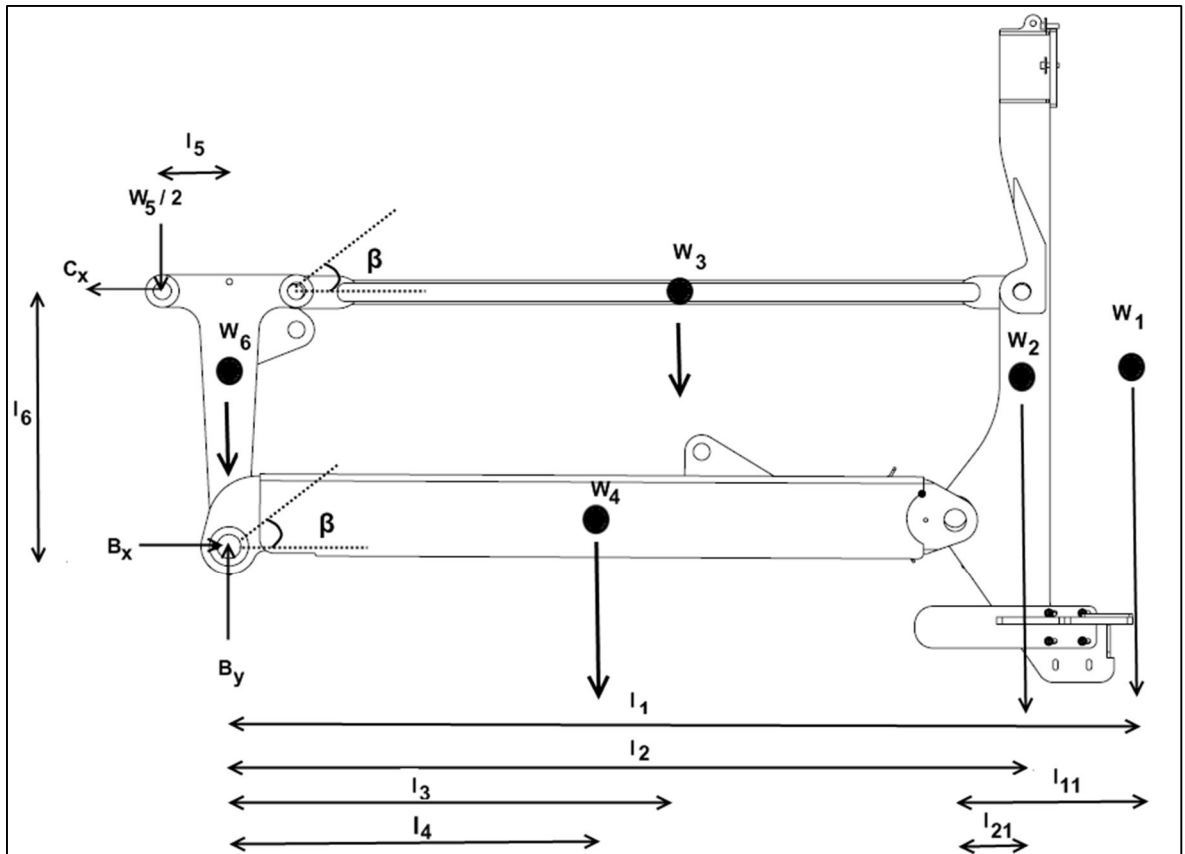
5 LASKENTATULOKSET

Laskentatulokset muodostuvat kahdesta työvaiheesta. Ensimmäisessä vaiheessa lasketaan ohjaamonostimesta aiheutuvat kuormitukset perusrunkoon. Toisessa vaiheessa kuormitukset asetetaan laadittuun elementtimalliin ja mallille tehdään staattinen analyysi rakenteen jännitysten määrittämiseksi.

5.1 Rakenteelliset kuormitukset

Suurin staattinen kuormitus saadaan selville kun tutkitaan ohjaamonostimen neljän ääriasennon aiheuttamia kuormituksia peruspukissa. Staattisen laskennan laskentapohja on liitteessä 1. Laskentapohjalla voidaan laskea kaikki asennot muuttamalla pelkästään noston ja taiton kulmia.

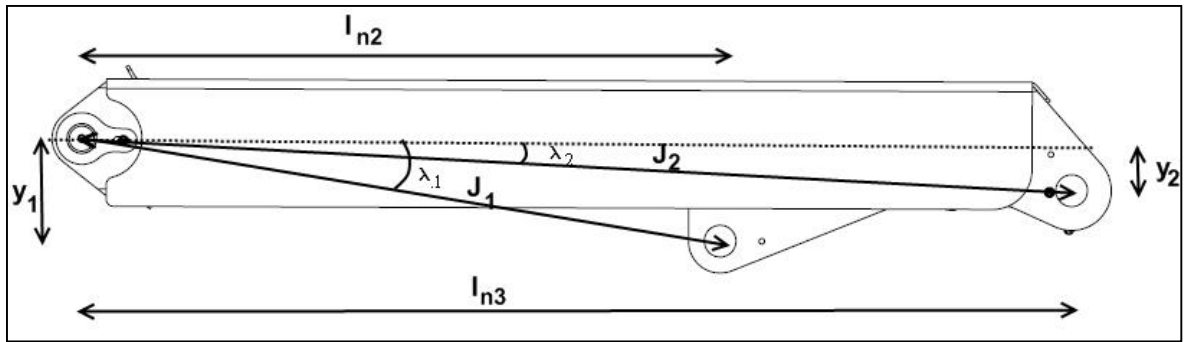
Ensimmäisessä vaiheessa laskettiin ohjaamonostimen etuosasta eli taittopuomista tulevat tukivoimat kolmiotuen korvakkeisiin (Kuva 4). Osien painopisteet sekä osien massat on määritetty ohjaamonostimen ollessa vaaka-asennossa 3D-mallista. Osien kuormat lasketaan yhtälön 1 mukaan ja tukireaktiot ratkaistaan yhtälöillä 2-3. Painopisteiden etäisyydet momenttipisteeseen on lausuttu taittovarren kulman (β) avulla. Näin samaa laskupohjaa voidaan käyttää taiton kulman muuttuessa. Ohjaamonostin (W_1) sekä ohjaamorunko (W_2) pysyvät aina suorina taiton kulman muuttuessa. Näiden momenttivarren pituus muodostuu taiton pituudesta kulman funktiona sekä kyseisten osien painopisteiden etäisyydestä taittovarren päästä (apumitat l_{11} ja l_{21}).



Kuva 4. Ohjaamonostimen taittopuomin painopisteiden etäisyydet ja kolmiotuen tukivoimat.

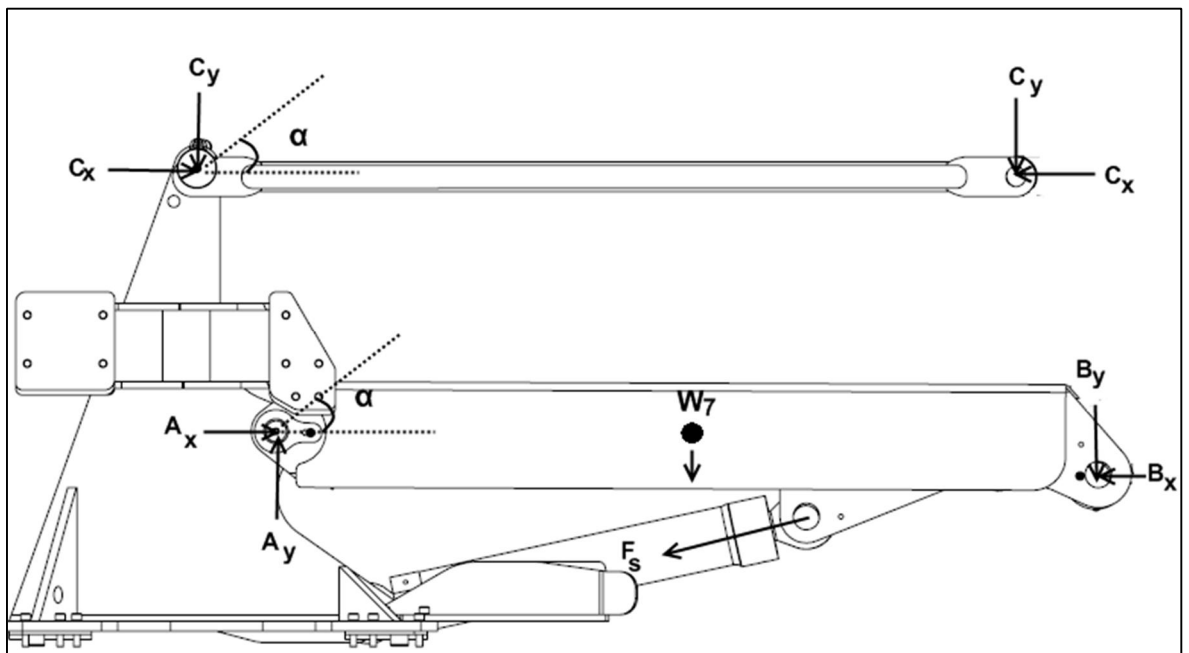
Nostonpuolen tukivarret (W_5) ovat sauvarakenteita ja ne ottavat vastaan vain puristusta tai vetoa. Näistä aiheutuva kuormitus huomioidaan kolmiotukeen (W_6) tulevana kuormana. Tukivarsien tukivoima peruspukkiin on siis sama kuin kolmiotuen tukivarren nivelessä (piste C) oleva tukivoima.

Nostovarren tukireaktioita laskettaessa on huomioitava sylinterin kulma sekä nostovarsien päiden keskinäinen asema (Kuva 5). Ensimmäisenä lasketaan kohtisuorat etäisyydet päätykiinnikkeestä sylinterikorvakkeeseen (J_1) ja toiseen päätyyn (J_2). Etäisyysmittojen avulla saadaan laskettua näiden korvakkeiden kulmat. Laskettujen apusuureiden avulla voidaan kirjoittaa lauseke sylinterin kulman laskemiseksi nostovarren kulman funktiona (kts. Liite 1, Sylinterin kulman laskenta).



Kuva 5. Nostovarren etäisyysmittoja sylinterikorvakkeeseen ja päätykorvakkeeseen.

Nostovarren ja sylinterin tukivoimat lasketaan samalla periaatteella kuten ohjaamonostimen etuosassa, tasapainoyhtälöiden 2-3 avulla. Ohjaamonostimen etuosan tukivoimat on piirretty kuvaan 6.



Kuva 6. Nostovarren, sylinterin ja tukivarren tukireaktiot.

Korvakkeita lasketut tukivoimat jaetaan korvakkeiden lukumäärällä eli kahdella. Laskentatulokset voidaan tarkistaa siten, että ohjaamonostimesta aiheutuva kuormitus ja saadut tukivoimat ovat samansuuruiset eli näiden summa on nolla. Myös nostovarren kuormitus tulee olla samansuuruinen kuin sylinterin ja nostokorvakkeen tukivoimat.

Lasketut kuormat eri asennoissa on koottu liitteeseen 5. Kuormitukset on ilmoitettu yhdelle korvakkeelle. Laskettaessa yhteen korvakkeiden y-suuntaiset voimat on tuloksena puolet

ohjaamonostimen kokonaispainosta. Taulukoihin on lisäksi laskettu eteen ja ylös suuntautuvista voimien resultanttivoima ja tämän voiman kulma.

5.2 Hätäjarrutus

Hätäjarrutuksessa kappale pysäytetään suurimmasta mahdollisesta pyörimisnopeudesta. Hätäjarrutustilanne tutkitaan pelkästään tapauksessa jossa puomit ovat vaaka-asennossa (asento 1). Vaaka-asennossa osien painopisteet ovat kauimpana käänäkoneistosta, jolloin momenttivarsi on suurimmillaan ja saadaan suurimmat mahdolliset kuormitukset perusrunkoon.

Lähtötietona tiedetään, että koneen jarrutusmomentti on 200 kNm ja suurin pyörimisnopeus 4 r/min. Näistä tiedoista saadaan laskettua kulmanopeus (ω)

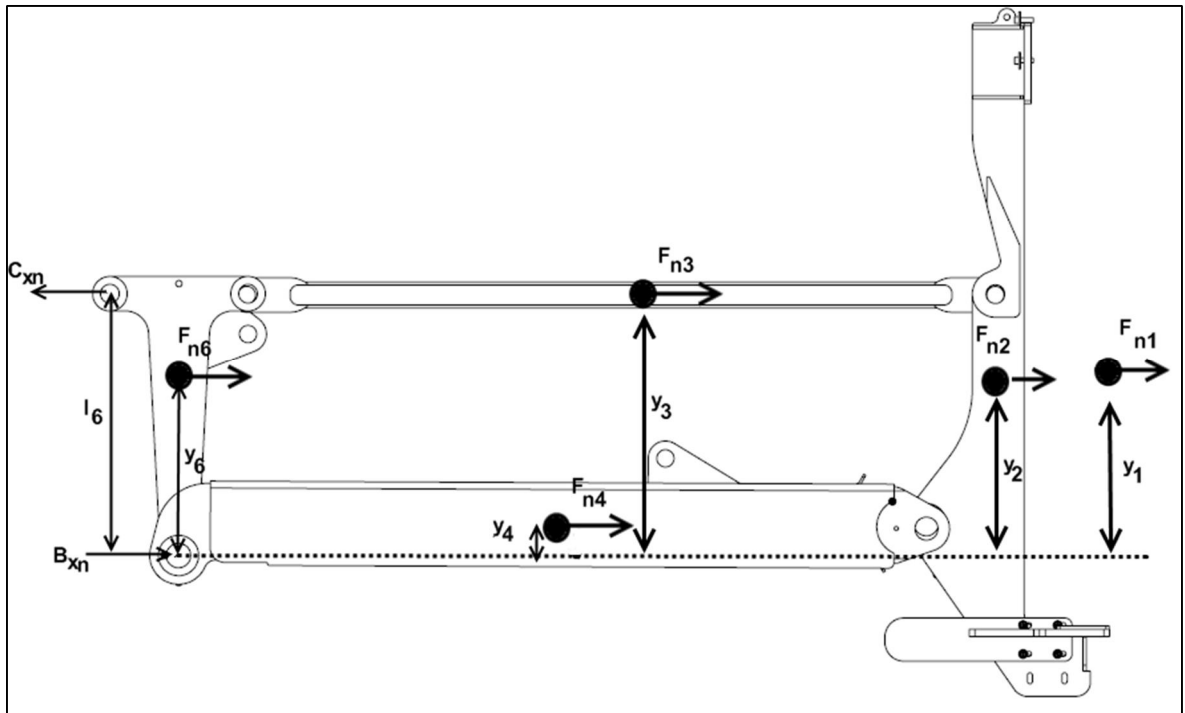
$$\omega = \frac{4 \text{ kierrosta}}{60 \text{ s}} \times 2\pi = 0.419 \frac{\text{rad}}{\text{s}}.$$

Suurimmassa pyörimisnopeudesta pysäyttäminen kestää 6 sekuntia. Kaavalla seitsemän lasketaan kulmakiihtyvyys

$$\alpha = \frac{\omega}{t} = \frac{0.419 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{6 \text{ s}} = 0.07 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}.$$

5.2.1 Radiaalivoima

Radiaalivoiman vaikutuksesta kappaleen osat pyrkivät jatkamaan liikettä pyörintäkeskiön säteen suunnassa. Jokaiselle osalle lasketaan radiaalivoima kaavalla 8. Radiaalivoiman laskentaa varten täytyy määrittää jokaisen osan painopisteen etäisyys pyörintäkeskiöstä. Ohjaamonostimen etuosan tukireaktiot lasketaan kolmiotuen nivelpisteissä C ja B (kuva 7). Laskentaa varten täytyy määrittää painopisteiden kohtisuorat etäisyydet tutkittavaan momenttipisteeseen, jonka jälkeen kaavojen 2-3 avulla ratkaistaan tukivoimat.



Kuva 7. Ohjaamonostimen etuosan radiaalivoimat

Nostovarren tukivoimat kiinnityspisteessä sekä sylinterikorvakeissa ratkaistaan samalla periaatteella kuin etuosan laskennassa. Tarkistuksena katsotaan että kaikkien osien normaalivoimat ovat samansuuruiset kuin lasketut tukivoimat

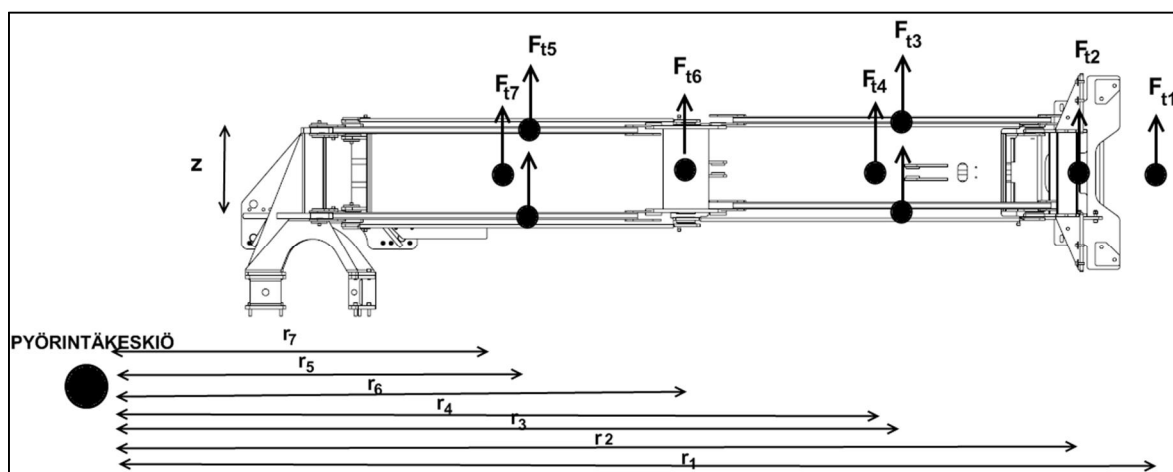
Taulukossa 3 on esitetty lasketut radiaalivoimat. Jarrutuksen aiheuttama normaalivoima ohjaamonostimessa on 4.2 kN. Lasketut tukivoimat korvakeissa (2 kpl x 2.1kN) vastaa radiaalivoimaa eli rakenne on staattisessa tasapainossa.

Taulukko 3. Radiaalivoiman aiheuttamat tukireaktiot yhdessä korvakeissa.

	Eteen [N]	Ylös [N]
Sylinterikorvake	154	53
Nostovarren nivel	844	-53
Tukivarren nivel	1 078	0
Voimien summa	2 076	0

5.2.2 Tangentiaalivoima

Kaavalla yhdeksän lasketaan jokaisen osan tangentiaalivoima (Kuva 9). Taittovarsien vääntövastus oletetaan pieneksi, joten tangentiaalivoima kulkee pelkästään nostokorvakkeiden kautta. Tangentiaalivoima aiheuttaa nostokorvakkeissa vääntöä. Laskemalla tangentiaalivoimista aiheutuvan momentin saadaan ratkaistua nostokorvakkeissa oleva voimapari.



Kuva 8. Ohjaamonostimeen tulevat tangentiaalivoimat.

Tangentiaalivoimista aiheutuvat tukivoimat nostovarren oikeaan ja vasempaan korvakkeeseen on esitetty taulukossa 4. Kun pyörimissuunta vaihtuu, muuttuu voimien etumerkki vastakkaiseksi.

Taulukko 4. Tangentiaalivoiman aiheuttamat tukivoimat nostovarren korvakkeissa

Nostovarren nivel	Pyörimissuunta vastapäivään			Pyörimissuunta myötäpäivään		
	Eteen [N]	Ylös [N]	Sivulle [N]	Eteen [N]	Ylös [N]	Sivulle [N]
Oikea korvake	5 746	350	751	-5 746	-350	-751
Vasen korvake	-5 746	-350	-751	5 746	350	751

5.2.3 Yhdistetyt voimat

Sylinteri ja tukivarren niveliin vaikuttaa pelkästään normaalivoima. Nostokorvan niveliin vaikuttaa sekä radiaali- että tangentialivoimat. Nämä voidaan laskea yhteen molemmissa pyörintäsuunnissa. Taulukossa 5 on yhdistetty hätäjarrutuksesta tulevat voimat.

Taulukko 5. Hätäjarrutuksen aiheuttamat voimat korvakeissa molempiin kiertosuuntiin.

		Pyörimissuunta vastapäivään			Pyörimissuunta myötäpäivään		
		Eteen [N]	Ylös [N]	Sivulle [N]	Eteen [N]	Ylös [N]	Sivulle [N]
Sylinteri	Oikea korvake	154	53	0	154	53	0
	Vasen korvake	154	53	0	154	53	0
Nostovarsi	Oikea korvake	6 590	297	751	-4 902	-403	-751
	Vasen korvake	-4 902	-403	-751	6 590	297	751
Tukivarsi	Oikea korvake	1 078	0	0	1 078	0	0
	Vasen korvake	1 078	0	0	1 078	0	0

5.3 Tuulikuorma

Tuulikuorma lasketaan kertomalla tuulta vastaan kohtisuorasti olevan osan pinta-ala tuulen paineella (kpl 3.4). Tuulen aiheuttama kuormitus peruspukkiin lasketaan samalla tavoin kuin hätäjarrutustilanteen tangentialivoimat. Taulukossa 6 on esitetty tuulikuormat kun tuuli puhaltaa vastapäivään ja myötäpäivään.

Taulukko 6. Tuulen aiheuttama kokonaiskuorma nostovarressa.

Nostovarren nivel	Eteen [N]	Ylös [N]	Sivulle [N]
Vastapäivään	20 549	1270	2841
Myötäpäivään	-20 549	-1270	-2841

5.4 Kuormitustapausten jännitykset

Elementtimenetelmällä laskettiin kaikkien kahdeksan kuormitustapauksen von Misesin mukaiset vertailujännitykset. Lasketut kuormat kerrottiin muuttuvan kuorman osavarmuuskertoimella ja maan vetovoiman kiihtyvyyttä kerrottiin pysyvän kuorman osavarmuudella. Kaikissa tapauksissa perusrungon siirtymät olivat 1-4 millimetrin välillä.

Taulukossa 7 on esitetty kuormitustapausten suurin jännitys sekä suurin tasainen jännitys. Liitoskohtiin muodostuu pistemäisiä jännityspiikkejä joita ei välttämättä todellisessa rakenteessa esiinny koska voimat jakaantuvat isommalle alueelle. Varmuus on laskettu tasaisesta jännityksestä jakamalla materiaalin myötöraja (345 MPa) saadulla jännityksellä. FEM-laskennan jännityskuvat ovat liitteessä 5. Kaikissa kuvissa jännityksen arvot on rajattu siten että yli 345 MPa:n jännitykset ovat punaisena.

Taulukko 7. Kuormitustapausten vertailujännitysten arvot ja varmuus

Kuormitus- tapaus		Alue perusrungossa	Jännitykset [MPa]	Varmuus
1	Suurin jännitys (piikki) Tasainen jännitys	Sivulevyn ja tukilevyn liitos Sivulevyn ja tukilevyn liitos	330 185	1.9
2	Suurin jännitys (piikki) Tasainen jännitys	Sivulevyn ja tukilevyn liitos Sivulevyn ja tukilevyn liitos	181 145	2.4
3	Suurin jännitys (piikki) Todellinen jännitys	Sylinterikorvake (piikki) Sylinterikorvakkeen reuna	321 170	2.0
4	Suurin jännitys (piikki) Todellinen jännitys	Sylinterikorvake (piikki) Sylinterilevyn ja takalevyn liitoskohta	232 170	2.0
5	Suurin jännitys (piikki) Suurin jännitys	Sivulevyn ja tukilevyn liitos (piikki) Sivulevyn ja tukilevyn liitos	330 270	1.3
6	Suurin jännitys (piikki) Suurin jännitys	Sivulevyn ja tukilevyn liitos (piikki) Sivulevyn ja tukilevyn liitos	338 280	1.2
7	Suurin jännitys (piikki) Tasainen jännitys	Sivulevyn ja tukilevyn liitos Sivulevyn ja tukilevyn liitos	225 185	1.9
8	Suurin jännitys (piikki) Tasainen jännitys	Sivulevyn ja tukilevyn liitos Sivulevyn ja tukilevyn liitos	214 170	2.0

6 TULOSTEN TARKASTELU

Neljästä tutkittavasta ohjaamonostimen ääriasennosta suurin kuormitus perusrunkoon tulee silloin kun ohjaamo on vaaka-asennossa. Lähes yhtä suuri kuormitus tulee ohjaamon ollessa yläasennossa. Tästäkin syystä oli perusteltua, että hätäjarrutustilanne ja tuulikuorma tutkittiin pelkästään ohjaamonostimen ollessa vaaka-asennossa. Kyseinen asento itsessään antaa suurimman kuormituksen ja vaaka-asennossa osien painopisteet sijaitsevat kauimpana pyörintäkeskiöstä tuottaen suurimmat tukivoimat nivelpisteisiin. Hätäjarrutustilanteissa varmuuskertoimien arvot ovat normaaliikäyttöä hiukan suuremmat.

Pahin kuormitustapaus syntyy hätäjarrutuksessa koneen liikkeessa myötäpäivään. Erot jännitysten arvoissa koneen liikkeessä myötä- tai vastapäivään ovat pienet. Pahimmassa kuormitustapauksessa rakenteen käyttöaste on lähes 99 %. Tämä käyttöaste on laskettu peruskoneeseen liittyvän sivulevyn ja sen liitoskohdassa olevan tukilevyn jännitysten perusteella. Muualla rakenteessa käyttöaste on noin 50 %.

Kaikissa kuormitustapauksissa rakenteiden siirtymät olivat erittäin pieniä. Siirtymät ovat vain prosentin luokkaa tutkittavan rakenteen dimensioista. Lähtöoletus käyttää geometrisesti lineaarista laskentamallia on näin ollen perusteltua, koska pienet muodonmuutokset eivät aiheuta merkittäviä muutoksia kuormitukseen.

Poikkeuksetta kaikissa kuormitustapauksissa syntyy kriittisiin liitoskohtiin muutamille elementeille huomattavasti muuta rakennetta suuremmat jännityksen arvot. Vaikka taulukossa 7 esitetyt varmuudet materiaalin myötäämiseen on laskettu tasaisesta jännityksestä, jäävät kaikki piikkijännityksen arvot hiukan alle myötörajan. Staattisen kestävyden kannalta piikkijännitykset eivät johda rakenteen kantokyvyn menetykseen koska todellisessa rakenteessa jännitys jakaantuu tasaisemmin. Kuitenkin väsyttävässä kuormituksissa jännityspiikkien kohdat voivat tulla kriittiseksi. Kyseisten liitoskohtien hitsin laatuun tulisi kiinnittää huomiota sillä jos samalla kohdalla hitsissä on alkusäröjä voi kyseiset säröt kasvaa kriittiseksi, ja siten menetetään hitsin kantokyky.

Laskennassa on oletettu että hitsin ovat tasalujia. Tällöin laskentamallissa hitsejä ei mallinnettu erikseen vaan levyt oletettiin olevan täysin kiinni toisissaan. Ainoastaan perusrungon pohjalevy ja sen alapuolella oleva täytelevy kiinnitettiin toisiinsa reunoistaan a-mitan omaavalla elementtiverkolla. Tarkempaa hitsien mallinnusta tarvittaisiin, jos

haluttaisiin tutkia esimerkiksi hitsien väsymiskestävyyttä. Tällöin rakenteesta tehtäisiin malli käyttäen tilavuuselementtejä. Tilavuuselementeillä pystytään mallintamaan todellinen hitsin geometria.

Perusrunko kiinnitettiin ruuveilla peruskoneeseen. Laskentamallissa reunaehto asetettiin peruskonetta kuvaavalle pinnalle, josta estettiin kaikki siirtymät ja kiertymät. Todellisuudessa peruskone saattaa antaa hiukan periksi, jolloin ei saavuteta yhtä jäykkää reunaehto kuin laskentamallissa.

Analyttisessä laskennassa määritettiin kuormitukset yksittäisille kuormitustapauksille. Myös varmuuskertoimet määritettiin yksittäisille kuormitustapauksille. Rakenteen tarkempi analysointi ja mahdollisesti tulevaisuudessa tehtävä rakenteen optimointi edellyttää että pahimmat kuormitukset yhdistetään ja rakenteen kestävyys tarkasteltaisiin myös eri kuormitusyhdistelmillä kuten esimerkiksi yhdistämällä hätäjarrutus ja tuulikuorma.

7 JOHTOPÄÄTOKSET

Materiaalikäsittelykoneen peruskoneeseen kiinnitetään ruuvein perusrunko, jonka päälle ohjaamonostin asennetaan. Tässä työssä tutkittiin ohjaamonostimen perusrunkoon tulevaa kuormitusta sekä perusrungon kestävyyttä kahdeksalla eri kuormitustapauksella. Lujuuslaskenta on tehty koneasetusta ja standardeja noudattaen.

Ohjaamonostimen perusrunkoon laskettiin staattinen kuormitus ja kuormituksille määritettiin osavarmuuskertoimet. Kaikilla tutkittavilla kuormitusyhdistelmillä jännitykset jäivät alle sallitun, joten rakenne kestää kyseiset kuormitukset ilmoitetuilla varmuuksilla. Kriittisiä liitoskohtia lukuun ottamatta rakenteen jännitystasot jäävät alhaiseksi ja monin paikoin rakenteen käyttöaste on vain 30 %:n luokkaa. Alhainen käyttöaste mahdollistaisi rakenteen optimoinnin muun muassa pienentämällä levynvahvuuksia. Optimoinnin edellytyksenä ovat tarkemmat laskelmat eri kuormitusyhdistelmillä sekä väsymislaskennan tekeminen ja hitsien liitosten kestävyuden varmistaminen.

Tässä työssä ei tutkittu rakenteeseen tulevaa väsyttävää kuormitusta. Koska ohjaamonostin on lähes jatkuvassa liikkeessä ja vaihtelevissa työolosuhteissa, on todennäköistä että rakenne menettää kantokykynsä juuri väsymisen takia. Erityisesti liitoskohdissa, joihin muodostui jännityspiikkejä voivat muodostua kriittisiksi väsymiskestävyuden kannalta.

LÄHDELUETTELO

Asetus 12.6.2008/400. Valtioneuvoston asetus koneiden turvallisuudesta.

Cook, S. 1995. Finite Element Modeling for Stress Analysis. Canada, John Wiley & Sons. 320 s.

FEMAP 10.3 User Guide. 2012. Siemens

SFS-EN 280 + A2. 2009. Siirrettävät henkilönostimet. Suunnittelulaskelmat. Vakavuus. Rakenne. Turvallisuus. Tarkastukset ja testit. 2. painos. Suomen standardisoimisliitto SFS. 143 s.

SFS-EN 1990 + A1 + AC. 2006. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Suomen standardisoimisliitto SFS. 184 s.

SFS-EN 1991-3. Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 3: Nostureista ja muista koneista aiheutuvat kuormat. Suomen standardisoimisliitto SFS. 73 s.

SFS-EN ISO 12100. 2010. Koneturvallisuus. Yleiset suunnitteluperiaatteet, riskin arviointi ja riskin pienentäminen. 3. painos. Suomen standardisoimisliitto SFS. 172 s.

SFS-EN 13001-1. 2009. Nosturit. Yleissuunnittelu. Osa 1: Yleiset periaatteet ja vaatimukset. 2. painos. Suomen standardisoimisliitto SFS. 51 s.

SFS-Käsikirja 93-1. 2005. Koneiden turvallisuus. Osa 1. Suomen standardisoimisliitto SFS. 449 s.

ASENTO 1

Puomien kulmat

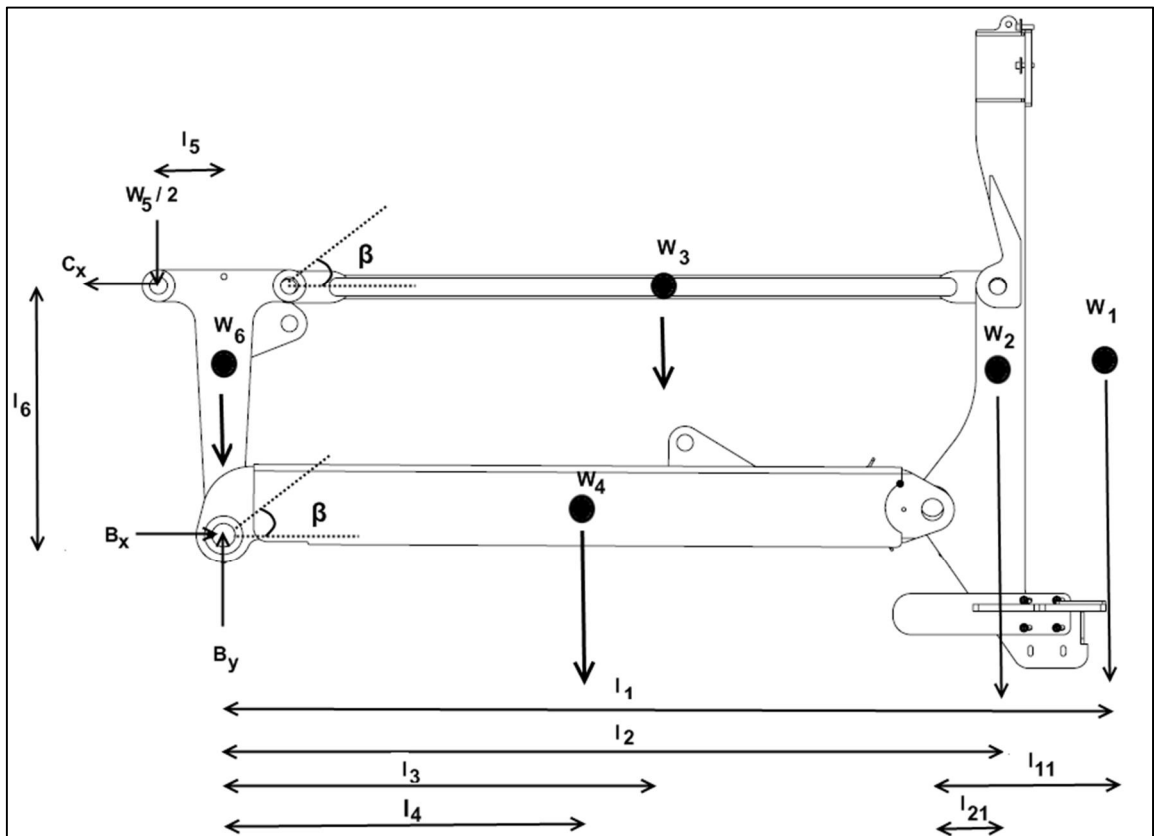
Nostopuomin ja vaakatason välinen kulma

$$\alpha := \frac{\pi}{180} \cdot 0$$

Taittopuomin ja vaakatason välinen kulma

$$\beta := \frac{\pi}{180} \cdot -5.1$$

Ohjaamonostimen etuosan:



	Kuorma	Etäisyys painopisteeseen (Kolmiotuesta)
Ohjaamo	$W_1 := 17364\text{N}$	$l_1 := 3640\text{mm}$
Ohjaamonrunko	$W_2 := 4102\text{N}$	$l_2 := 2900\text{mm}$
Taiton tukivarret	$W_3 := 693\text{N}$	$l_3 := 1300\text{mm}$
Taittovarsit	$W_4 := 588\text{N}$	$l_4 := 1342\text{mm}$

	Kuorma	Etäisyydet kolmiotuen kiinnitysreiästä
Tukivarsi	$W_5 := 660\text{N}$	$l_5 := 240\text{mm}$
Kolmiotuki	$W_6 := 1545\text{N}$	$l_6 := 800\text{mm}$
Nostovarsi	$W_7 := 7799\text{N}$	

Taiton puolen apumittoja:

Ohjaamorungon pp:en etäisyys kiinnityspisteestä	$l_{21} := 300\text{mm}$
Ohjaamon pp:en etäisyys kiinnityspisteestä	$l_{11} := 1040\text{mm}$
Taittovarren pituus	$l_{41} := 2600\text{mm}$

Taittopuomin tukireaktiot:

Given

$$\Sigma F_x := 0 \quad B_x - C \cdot \cos(\alpha) = 0$$

$$\Sigma F_y := 0 \quad -W_1 - W_2 - W_3 - W_4 - \frac{W_5}{2} - W_6 - C \cdot \sin(\alpha) + B_y = 0$$

$$\Sigma M_B := 0 \quad -W_1 \cdot (\cos(\beta) \cdot l_{41} + l_{11}) - W_2 \cdot (\cos(\beta) \cdot l_{41} + l_{21}) - W_3 \cdot (\cos(\beta) \cdot l_3 + l_5) \dots = 0$$

$$+ -W_4 \cdot (\cos(\beta) \cdot l_4) + \frac{W_5}{2} \cdot l_5 + C \cdot \cos(\alpha) \cdot l_6 + C \cdot \sin(\alpha) \cdot l_5$$

$$\begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ C \end{pmatrix} := \text{Find}(B_x, B_y, C)$$

$$B_x = 104.657\text{kN}$$

$$B_y = 29.915\text{kN}$$

$$C = 104.657\text{kN}$$

Nostopuomi :

Nostopuomin painopisteen etäisyys nostokorvakkeesta

$$l_7 := 1320\text{mm}$$

Etäisyys sylinterin korvakkeeseen:

$$l_{n2} := 1630\text{mm}$$

Nostovarren pituus:

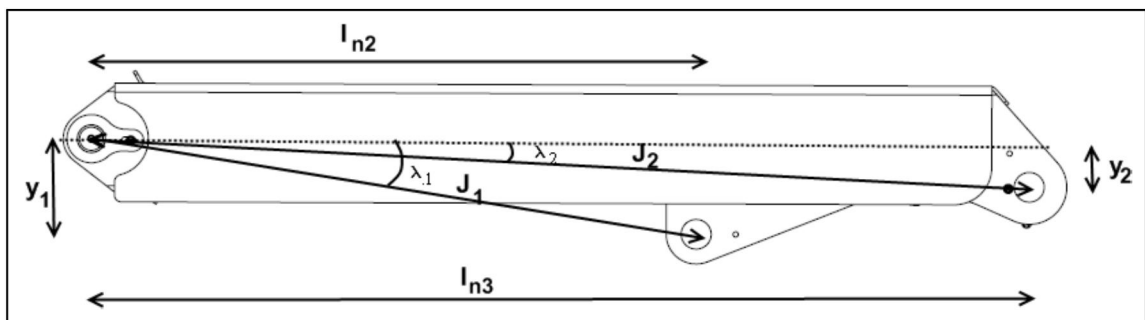
$$l_{n3} := 2500\text{mm}$$

Sylinterikorvakkeen ja päätykorvakkeen korkeusero:

$$y_1 := 87\text{mm}$$

Päätykorvakkeiden korkeuksien ero:

$$y_2 := 130\text{mm}$$



Kulma:

Suora etäisyys:

Sylinterikorvake:

$$\lambda_1 := \text{atan}\left(\frac{y_1}{l_{n2}}\right) = 0.053$$

$$J_1 := \sqrt{y_1^2 + l_{n2}^2} = 1632\text{mm}$$

Päätykorvake

$$\lambda_2 := \text{atan}\left(\frac{y_2}{l_{n3}}\right) = 0.052$$

$$J_2 := \sqrt{y_2^2 + l_{n3}^2} = 2503\text{mm}$$

Sylinterin kulman laskenta:

Sylinteri- ja nostokorvakkeiden etäisyydet:

$$y_s := 560\text{mm}$$

$$x_s := 260\text{mm}$$

Vaakasivun pituus

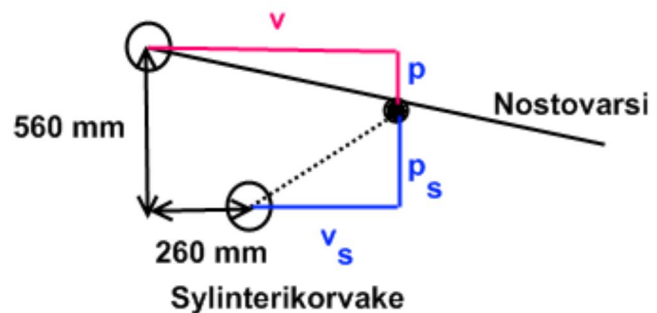
$$v := \cos(\alpha - \lambda_1) \cdot J_1 = 1630\text{mm}$$

$$v_s := v - x_s = 1370\text{mm}$$

Pystysivun pituus

$$p := \sin(\alpha - \lambda_1) \cdot J_1 = -87\text{mm}$$

$$p_s := p + y_s = 473\text{mm}$$



$$\text{Sylinterin kulma} \quad \gamma_1 := \text{atan}\left(\frac{p_s}{v_s}\right) = 0.332 \quad \text{Asteina} \quad \gamma_1 \cdot \frac{180}{\pi} = 19.048$$

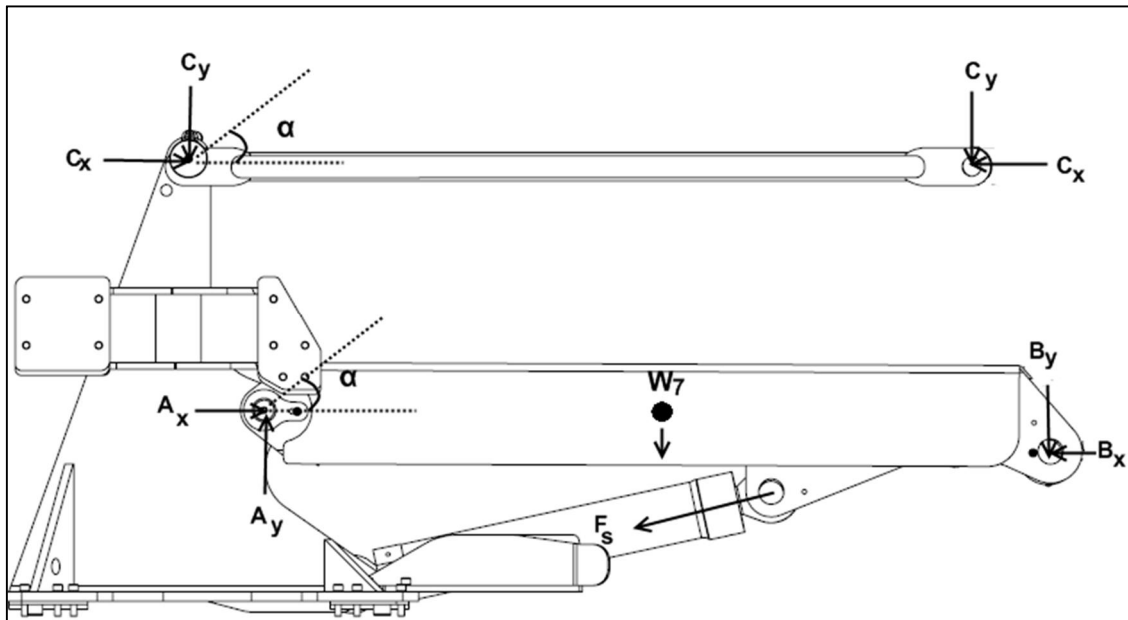
$$\text{Kulma korvakkeesta sylinteriin} \quad \gamma := \gamma_1 - \alpha = 0.332 \quad \text{Asteina} \quad \gamma \cdot \frac{180}{\pi} = 19.048$$

Kulman laskenta yhdistettynä yhteen lausekkeeseen:

Sylinterin kulma

$$\zeta := \text{atan}\left(\frac{y_s + J_1 \cdot \sin(\alpha - \lambda_1)}{J_1 \cdot \cos(\alpha - \lambda_1) - x_s}\right) = 0.332 \quad \zeta \cdot \frac{180}{\pi} = 19.048 \quad \text{Saadaan sama tulos kuin edellä}$$

Nosto- ja sylinterikorvakkeen tukireaktiot:



Given

$$\Sigma M_A := 0 \quad F_s \cdot \sin(\zeta) \cdot \cos(\alpha - \lambda_1) \cdot J_1 - F_s \cdot \cos(\zeta) \cdot \sin(\alpha - \lambda_1) \cdot J_1 - B_y \cdot \cos(\alpha - \lambda_2) \cdot J_2 \dots = 0$$

$$+ B_x \cdot \sin(\alpha - \lambda_2) \cdot J_2 - W_7 \cdot l_7 \cdot \cos(\alpha)$$

$$F_s := \text{Find}(F_s)$$

Given

$$\Sigma F_x = 0 \quad A_x - B_x + F_s \cdot \cos(\zeta) = 0$$

$$\Sigma F_y := 0 \quad A_y + F_s \cdot \sin(\zeta) - B_y - W_7 = 0$$

$$\begin{pmatrix} A_x \\ A_y \end{pmatrix} := \text{Find}(A_x, A_y)$$

$$A_x = -47.2249 \text{ kN}$$

$$A_y = -14.72394314146132 \text{ kN}$$

$$F_s = 160.679 \text{ kN}$$

Jaetaan voimat kahdelle korvakkeelle:

Tukivarsi

$$C_y := \frac{C}{2} \cdot \sin(\alpha) - \frac{W_5}{4} = -0.165 \text{ kN}$$

$$C_x := \frac{C}{2} \cdot \cos(\alpha) = 52.328 \text{ kN}$$

Nostokorvakket

$$A_{y1} := \frac{-A_y}{2} = 7.362 \text{ kN}$$

$$A_{x1} := \frac{-A_x}{2} = 23.612 \text{ kN}$$

Sylinterikorvake

$$F_y := \frac{-F_s}{2} \cdot \sin(\zeta) = -26.219 \text{ kN}$$

$$F_x := \frac{-F_s}{2} \cdot \cos(\zeta) = -75.941 \text{ kN}$$

TARKISTUS

1. Nostovarren tukireaktiot:

$$\text{Tukivoima} := 2 \cdot (F_y + A_{y1}) = -37.714 \text{ kN}$$

$$\text{Kuorma} := B_y + W_7 = 37.714 \text{ kN}$$

$$\text{Tukivoima} + \text{Kuorma} = 0 \text{ kN}$$

2. Ohjaamonostimen tukivoimat:

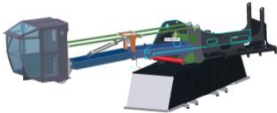
$$W_{\text{tot}} := W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_6 + W_7 = 38.044 \text{ kN}$$

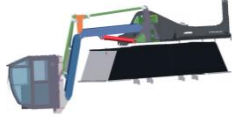
$$\text{Tukivoima2} := 2 \cdot (F_y + A_{y1} + C_y) = -38.044 \text{ kN}$$


$$W_{\text{tot}} + \text{Tukivoima2} = 0 \text{ kN}$$


LIITE 2:

Staattiset kuormitukset yhdelle korvakkeelle neljässä asennossa

ASENTO 1				
Puomien kulmat	Nostopuomi Taittopuomi	$\alpha = 0^\circ$ $\beta = -5.1^\circ$		
	Eteen [N]	Ylös [N]	Resultanttivoima [N]	Kulma [°]
Sylinterikorvake	-75 941	-26 219	80 339,7	19,0
Nostovarren nivel	23 613	7 362	24 733,6	17,3
Tukivarren nivel	52 329	-165	52 328,8	-0,2
Voimien summa	0	-19 022		

ASENTO 2				
Puomien kulmat	Nostopuomi Taittopuomi	$\alpha = -2.4^\circ$ $\beta = -78.6^\circ$		
	Eteen [N]	Ylös [N]	Resultanttivoima [N]	Kulma [°]
Sylinterikorvake	-70 741	-20 981	73 786,8	16,5
Nostovarren nivel	50 394	2 977	50 481,9	3,4
Tukivarren nivel	20 347	-1 018	20 372,4	-2,9
Voimien summa	0	-19 022		

ASENTO 3				
Puomien kulmat	Nostopuomi Taittopuomi	$\alpha = 85.6^\circ$ $\beta = 13.5^\circ$		
	Eteen [N]	Ylös [N]	Resultanttivoima [N]	Kulma [°]
Sylinterikorvake	2 053	-92 776	92 798,2	-88,7
Nostovarren nivel	-12 540	-62 368	63 615,9	78,6
Tukivarren nivel	10 487	136 121	136 524,4	85,6
Voimien summa	0	-19 022		

ASENTO 4				
Puomien kulmat	Nostopuomi Taittopuomi	$\alpha = 85.6^\circ$ $\beta = -78.7^\circ$		
	Eteen [N]	Ylös [N]	Resultanttivoima [N]	Kulma [°]
Sylinterikorvake	1 084	-48 981	48 993,0	-88,7
Nostovarren nivel	-5 171	-22 993	23 567,3	77,3
Tukivarren nivel	4 087	52 952	53 109,1	85,6
Voimien summa	0	-19 022		

HÄTÄJARRUTUS

Pyörintäkeskiön etäisyys perusrungon origoon (nostokorvake)

$$r_x := 595\text{mm}$$

	Pituudet	Lisätään pituus pyörintäkeskipisteeseen
Ohjaamo	$l_{1_keski} := (3640 + 2500)\text{mm}$	$r_1 := l_{1_keski} + r_x = 6.735\text{m}$
Ohjaamonrunko	$l_{2_keski} := (2900 + 2500)\text{mm}$	$r_2 := l_{2_keski} + r_x = 5.995\text{m}$
Taiton tukivarret	$l_{3_keski} := (1342 + 2500 + 240)\text{mm}$	$r_3 := l_{3_keski} + r_x = 4.677\text{m}$
Taittovarsit	$l_{4_keski} := (1300 + 2500)\text{mm}$	$r_4 := l_{4_keski} + r_x = 4.395\text{m}$
Tukivarsi	$l_{5_keski} := 1217\text{mm}$	$r_5 := l_{5_keski} + r_x = 1.812\text{m}$
Kolmiotuki	$l_{6_keski} := (2500 + 240)\text{mm}$	$r_6 := l_{6_keski} + r_x = 3.335\text{m}$
Nostovarsi	$l_{7_keski} := 1320\text{mm}$	$r_7 := l_{7_keski} + r_x = 1.915\text{m}$

1: Radiaalivoima

$$\text{Kulmanopeus} \quad \omega_{nim} := \frac{4 \cdot 2 \cdot \pi}{60\text{s}} = 0.419 \frac{1}{\text{s}}$$

$$\text{Varmuuskertoimella} \quad \omega := \omega_{nim} \cdot 1.1$$

$$m_1 := 1770\text{kg} \quad F_{n1} := m_1 \cdot \omega^2 \cdot r_1 = 2531 \cdot \text{N}$$

$$m_2 := 418\text{kg} \quad F_{n2} := m_2 \cdot \omega^2 \cdot r_2 = 532 \cdot \text{N}$$

$$m_3 := 71\text{kg} \quad F_{n3} := m_3 \cdot \omega^2 \cdot r_3 = 70 \cdot \text{N}$$

$$m_4 := 599\text{kg} \quad F_{n4} := m_4 \cdot \omega^2 \cdot r_4 = 559 \cdot \text{N}$$

$$m_5 := 67\text{kg} \quad F_{n5} := m_5 \cdot \omega^2 \cdot r_5 = 26 \cdot \text{N}$$

$$m_6 := 157\text{kg} \quad F_{n6} := m_6 \cdot \omega^2 \cdot r_6 = 111 \cdot \text{N}$$

$$m_7 := 795\text{kg} \quad F_{n7} := m_7 \cdot \omega^2 \cdot r_7 = 323.22 \cdot \text{N}$$

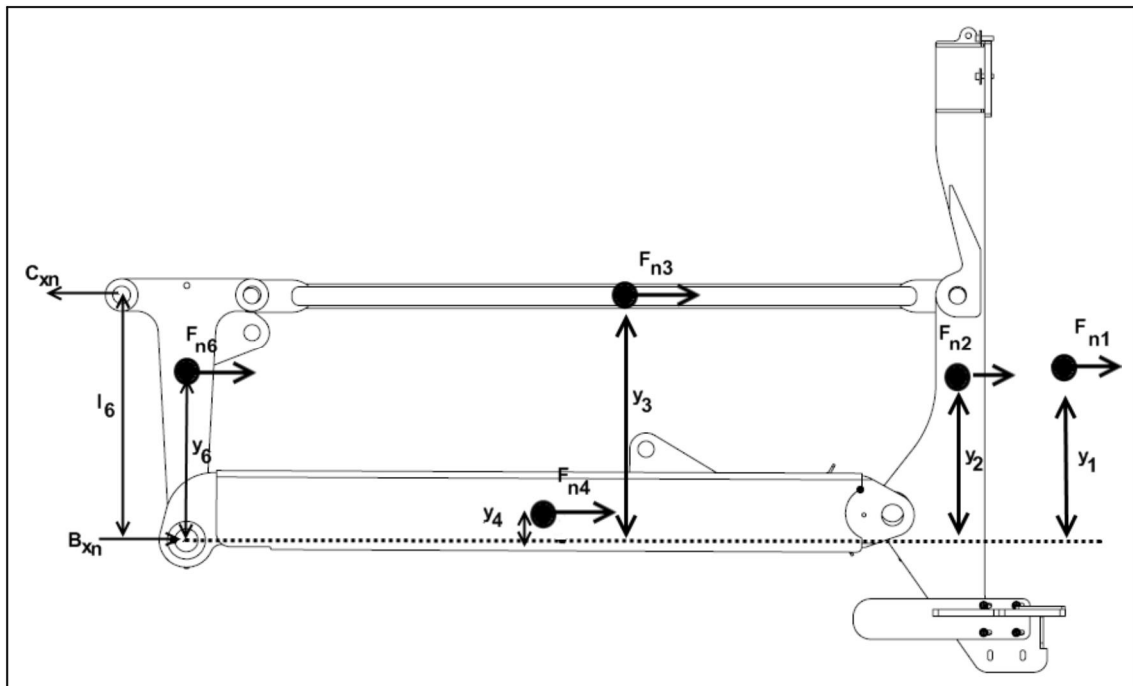
$$\text{VOIMIEN SUMMA} \quad F_{n_tot} := F_{n1} + F_{n2} + F_{n3} + F_{n4} + F_{n5} + F_{n6} + F_{n7} = 4.152 \text{kN}$$

LIITE 3:

Hätäjarrutuksesta aiheutuvan kuormituksen laskenta

Osien mitat painopisteeseen ja kuorma:

	Korkeus	Etäisyys	Kuorma
Ohjaamo	$y_1 := 500\text{mm}$	$l_1 := 3640\text{mm}$	$W_1 := 17364\text{N}$
Ohjaamonrunko	$y_2 := 425\text{mm}$	$l_2 := 2900\text{mm}$	$W_2 := 4102\text{N}$
Taiton tukivarret	$y_3 := 800\text{mm}$	$l_3 := 1300\text{mm}$	$W_3 := 693\text{N}$
Taittovarsit	$y_4 := 165\text{mm}$	$l_4 := 1342\text{mm}$	$W_4 := 5881\text{N}$
Tukivarsi		$l_5 := 240\text{mm}$	$W_5 := 660\text{N}$
Kolmiotuki	$y_6 := 578\text{mm}$	$l_6 := 800\text{mm}$	$W_6 := 1545\text{N}$
Nostovarsi	$y_7 := 55\text{mm}$	$l_7 := 1320\text{mm}$	$W_7 := 7799\text{N}$



Taittopuomin tukireaktiot:

Given

$$\Sigma M_B := 0 \quad F_{n1} \cdot y_1 + F_{n2} \cdot y_2 + F_{n3} \cdot y_3 + F_{n4} \cdot y_4 + F_{n6} \cdot y_6 - C_{xn} \cdot l_6 = 0$$

$$C_{xn} := \text{Find}(C_{xn})$$

Given

$$\Sigma F_x := 0 \quad F_{n1} + F_{n2} + F_{n3} + F_{n4} + F_{n6} + B_{xn} - C_{xn} = 0$$

$$B_{xn} := \text{Find}(B_{xn})$$

$$B_{xn} = -1.673 \text{ kN}$$

$$C_{xn} = 2.131 \text{ kN}$$

$$C_{xn2} := C_{xn} + F_{n5} = 2.156 \text{ kN}$$

Nostopuomi :

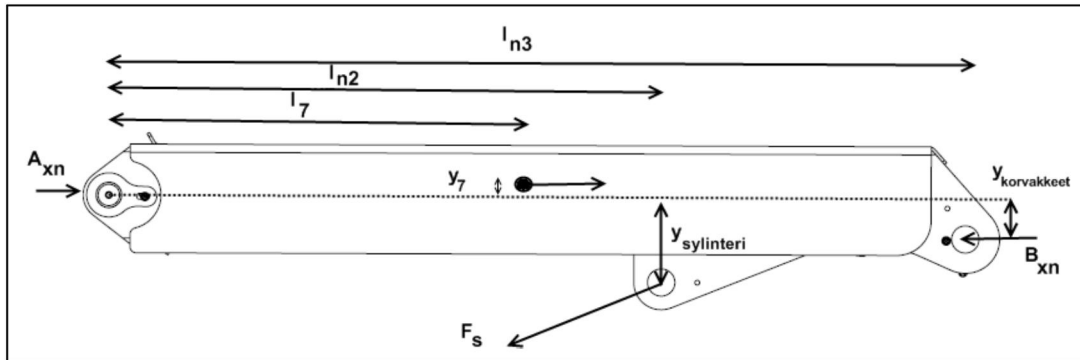
Puomien kulmat

Nostopuomin ja vaakatason välinen kulma

$$\alpha := \frac{\pi}{180} \cdot 0$$

Taittopuomin ja vaakatason välinen kulma

$$\beta := \frac{\pi}{180} \cdot -5.1$$



Etäisyys sylinterin korvakkeeseen:

$$l_{n2} := 1630 \text{ mm}$$

Nostovarren pituus:

$$l_{n3} := 2500 \text{ mm}$$

Sylinterikorvakkeen ja päätykorvakkeen korkeusero:

$$y_{\text{sylinteri}} := 87 \text{ mm}$$

Päätykorvakkeiden korkeuksien ero:

$$y_{\text{korvakkeet}} := 130 \text{ mm}$$

Sylinterikorvakon etäisyys nostopuomin nivelestä

$$x_s := 260 \text{ mm}$$

$$y_s := 560 \text{ mm}$$

LIITE 3:

Hätäjarrutuksesta aiheutuvan kuormituksen laskenta

Kulma:

Suora etäisyys:

$$\text{Sylinterikorvake: } \lambda_1 := \text{atan}\left(\frac{y_{\text{sylinteri}}}{l_{n2}}\right) = 0.053$$

$$J_1 := \sqrt{y_{\text{sylinteri}}^2 + l_{n2}^2} = 1632 \text{ mm}$$

$$\text{Päätykorvake } \lambda_2 := \text{atan}\left(\frac{y_{\text{korvakkeet}}}{l_{n3}}\right) = 0.052$$

$$J_2 := \sqrt{y_{\text{korvakkeet}}^2 + l_{n3}^2} = 2503 \text{ mm}$$

Sylinterin kulma

$$\zeta := \text{atan}\left(\frac{y_s + J_1 \cdot \sin(\alpha - \lambda_1)}{J_1 \cdot \cos(\alpha - \lambda_1) - x_s}\right)$$

$$\zeta = 0.332$$

$$\zeta \cdot \frac{180}{\pi} = 19.048$$

Nosto- ja sylinterikorvakkeen tukireaktiot:

Given

$$\Sigma M_A := 0 \quad F_s \cdot \sin(\zeta) \cdot l_{n2} + F_s \cdot \cos(\zeta) \cdot y_{\text{sylinteri}} - B_{xn} \cdot y_{\text{korvakkeet}} - F_{n7} \cdot y_7 = 0$$

$$F_s := \text{Find}(F_s)$$

Given

$$\Sigma F_x = 0 \quad A_{xn} - B_{xn} + F_s \cdot \cos(\zeta) + F_{n7} = 0$$

$$A_{xn} := \text{Find}(A_{xn})$$

$$A_{xn} = -1.689 \text{ kN} \quad F_s = -0.325 \text{ kN}$$

Jaetaan voimat kahdelle korvakkeelle:

Tukivarsi

$$C_x := \frac{C_{xn2}}{2} = 1078.2 \text{ N}$$

Nostokorvakket

$$A_{x1} := \frac{-A_{xn}}{2} = 844 \text{ N}$$

$$A_{y1} := \frac{F_s \cdot \sin(\zeta)}{2} = -53.058 \text{ N}$$

Sylinterikorvake

$$F_x := \frac{-F_s}{2} \cdot \cos(\zeta) = 153.676 \text{ N}$$

$$F_y := \frac{-F_s}{2} \cdot \sin(\zeta) = 53.058 \text{ N}$$

TARKISTUS

$$F_{n_tot} = 4.2 \text{ kN}$$

$$\text{Tukivoimat} := 2(F_x + A_{x1} + C_x)$$

$$\text{Voimien_summa} := F_{n_tot} - \text{Tukivoimat} = 0 \text{ N}$$

2: Tangentiaalivoima

$$\text{Kulmakiihtyvyys} \quad \alpha_{\text{nim}} := \frac{\omega_{\text{nim}}}{6\text{s}} = 0.07 \frac{1}{\text{s}^2}$$

$$\text{Varmuuskertoimella} \quad \alpha_{\text{kiihtyvyys}} := \alpha_{\text{nim}} \cdot 1.1$$

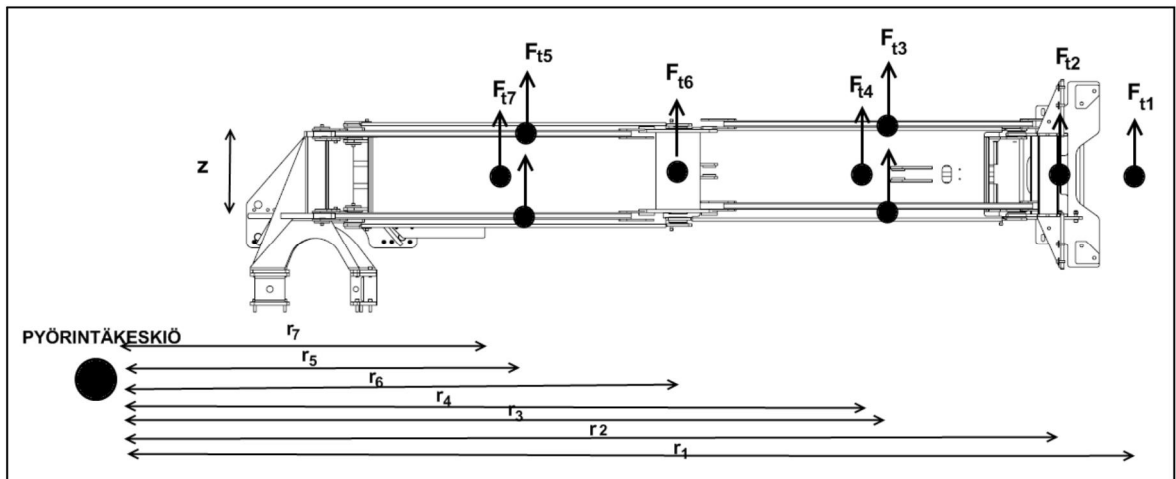
$$F_{t1} := m_1 \cdot \alpha_{\text{kiihtyvyys}} \cdot r_1 = 915\text{N} \quad F_{t5} := m_5 \cdot \alpha_{\text{kiihtyvyys}} \cdot r_5 = 9\text{N}$$

$$F_{t2} := m_2 \cdot \alpha_{\text{kiihtyvyys}} \cdot r_2 = 192\text{N} \quad F_{t6} := m_6 \cdot \alpha_{\text{kiihtyvyys}} \cdot r_6 = 40\text{N}$$

$$F_{t3} := m_3 \cdot \alpha_{\text{kiihtyvyys}} \cdot r_3 = 26\text{N} \quad F_{t7} := m_7 \cdot \alpha_{\text{kiihtyvyys}} \cdot r_7 = 117\text{N}$$

$$F_{t4} := m_4 \cdot \alpha_{\text{kiihtyvyys}} \cdot r_4 = 202\text{N}$$

$$\text{Voimien summa} \quad F_{t,t} := F_{t1} + F_{t2} + F_{t3} + F_{t4} + F_{t5} + F_{t6} + F_{t7} = 1.502\text{kN}$$

**Taiton puolen apumittoja:**

$$\text{Ohjaamorungon pp:en etäisyys kiinnityspisteestä} \quad l_{21} := 300\text{mm}$$

$$\text{Ohjaamon pp:en etäisyys kiinnityspisteestä} \quad l_{11} := 1040\text{mm}$$

$$\text{Taittovarren pituus} \quad l_{41} := 2600\text{mm}$$

$$\text{Tukivarren painopisteen etäisyys nostokorvakkeesta} \quad l_{5_pp} := 1010\text{mm}$$

$$\text{Päätykorvakkeiden erotus} \quad y_8 := 130\text{mm}$$

$$\text{Nostokorvakkeiden etäisyys} \quad z := 634\text{mm}$$

Taittopuomin tukireaktiot:

Given

$$\Sigma F_z := 0 \quad F_{t1} + F_{t2} + F_{t3} + F_{t4} + F_{t5} + F_{t6} + F_{t7} - A_z = 0$$

$$A_z := \text{Find}(A_z)$$

Momentti nostokorvakeissa:

$$M_1 := F_{t1} \cdot (l_{n3} + \cos(\beta) \cdot l_{41} + l_{11}) + F_{t2} \cdot (l_{n3} + \cos(\beta) \cdot l_{41} + l_{21}) + F_{t3} \cdot (l_{n3} + \cos(\beta) \cdot l_3 + l_5) \dots$$

$$+ F_{t4} \cdot \cos(\beta) \cdot l_4 + F_{t5} \cdot l_{5_pp} \cdot \cos(\alpha) + F_{t6} \cdot l_{n3} \cdot \cos(\alpha) + F_{t7} \cdot l_7 \cdot \cos(\alpha)$$

$$M_2 := F_{t1} \cdot (y_1 - y_8) + F_{t2} \cdot (y_2 - y_8) + F_{t3} \cdot (y_3 - y_8) + F_{t4} \cdot (y_4 - y_8) + F_{t6} \cdot (y_6 - y_8) + F_{t7} \cdot y_7$$

$$M_1 = 7286 \text{ N}\cdot\text{m} \quad M_2 = 444.097 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$A_x := \frac{M_1}{z} = 11.5 \text{ kN} \quad A_y := \frac{M_2}{z} = 700.468 \text{ N} \quad A_z = 1502 \text{ N}$$

Jaetaan voimat kahdelle korvakeelle:

Nostokorvakket

$$A_{x_n} := \frac{A_x}{2} = 5746 \text{ N} \quad A_{y_n} := \frac{A_y}{2} = 350.234 \text{ N} \quad A_{z_n} := \frac{A_z}{2} = 751.01 \text{ N}$$

TUULIKUORMA

$$\text{Tuulen paine } q := 990 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Pinta-alat:

$$\text{Ohjaamo } A_1 := 3.3\text{m}^2$$

$$\text{Ohjaamonrunko } A_2 := 0.52\text{m}^2$$

$$\text{Taiton tukivarret } A_3 := 0.21\text{m}^2$$

$$\text{Taittovarsit } A_4 := 0.63\text{m}^2$$

$$\text{Tukivarsi } A_5 := 0.20\text{m}^2$$

$$\text{Kolmiotuki } A_6 := 0.20\text{m}^2$$

$$\text{Nostovarsi } A_7 := 0.68\text{m}^2$$

$$F_{\text{tuuli1}} := q \cdot A_1 \quad F_{\text{tuuli2}} := q \cdot A_2 \quad F_{\text{tuuli3}} := q \cdot A_3 \quad F_{\text{tuuli4}} := q \cdot A_4$$

$$F_{\text{tuuli5}} := q \cdot A_5 \quad F_{\text{tuuli6}} := q \cdot A_6 \quad F_{\text{tuuli7}} := q \cdot A_7$$

Voimien summa

$$F_{\text{tuuli}} := F_{\text{tuuli1}} + F_{\text{tuuli2}} + F_{\text{tuuli3}} + F_{\text{tuuli4}} + F_{\text{tuuli5}} + F_{\text{tuuli6}} + F_{\text{tuuli7}} = 5.683\text{kN}$$

Taittopuomin tukireaktiot:

Given

$$\sum F_z := 0 \quad F_{\text{tuuli1}} + F_{\text{tuuli2}} + F_{\text{tuuli3}} + F_{\text{tuuli4}} + F_{\text{tuuli5}} + F_{\text{tuuli6}} + F_{\text{tuuli7}} - A_{\text{zTuuli}} = 0$$

$$A_{\text{zTuuli}} := \text{Find}(A_{\text{zTuuli}})$$

$$M_{\text{tuuli1}} := F_{\text{tuuli1}} \cdot (l_{n3} + \cos(\beta) \cdot l_{41} + l_{11}) + F_{\text{tuuli2}} \cdot (l_{n3} + \cos(\beta) \cdot l_{41} + l_{21}) \dots \\ + F_{\text{tuuli3}} \cdot (l_{n3} + \cos(\beta) \cdot l_3 + l_5) + F_{\text{tuuli4}} \cdot \cos(\beta) \cdot l_4 + F_{\text{tuuli5}} \cdot l_{5_pp} \cdot \cos(\alpha) \dots \\ + F_{\text{tuuli6}} \cdot l_{n3} \cdot \cos(\alpha) + F_{\text{tuuli7}} \cdot l_7 \cdot \cos(\alpha)$$

$$M_{\text{tuuli2}} := F_{\text{tuuli1}} \cdot (y_1 - y_8) + F_{\text{tuuli2}} \cdot (y_2 - y_8) + F_{\text{tuuli3}} \cdot (y_3 - y_8) + F_{\text{tuuli4}} \cdot (y_4 - y_8) \dots \\ + F_{\text{tuuli6}} \cdot (y_6 - y_8)$$

$$A_{\text{xTuuli}} := \frac{M_{\text{tuuli1}}}{z} = 41\text{kN}$$

$$A_{\text{yTuuli}} := \frac{M_{\text{tuuli2}}}{z} = 2540\text{N}$$

$$A_{\text{zTuuli}} = 5.683\text{kN}$$

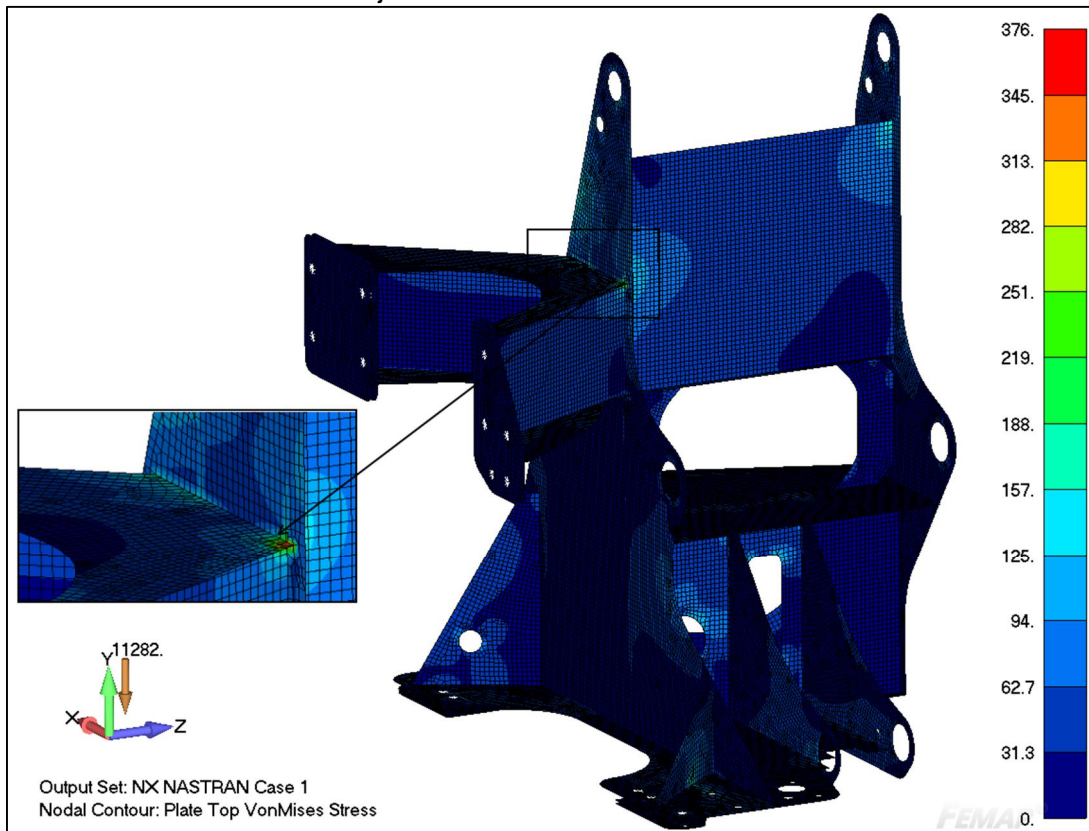
Jaetaan voimat kahdelle korvakkeelle:

$$A_{\text{x_Tuuli}} := \frac{A_{\text{xTuuli}}}{2} = 20549\text{N}$$

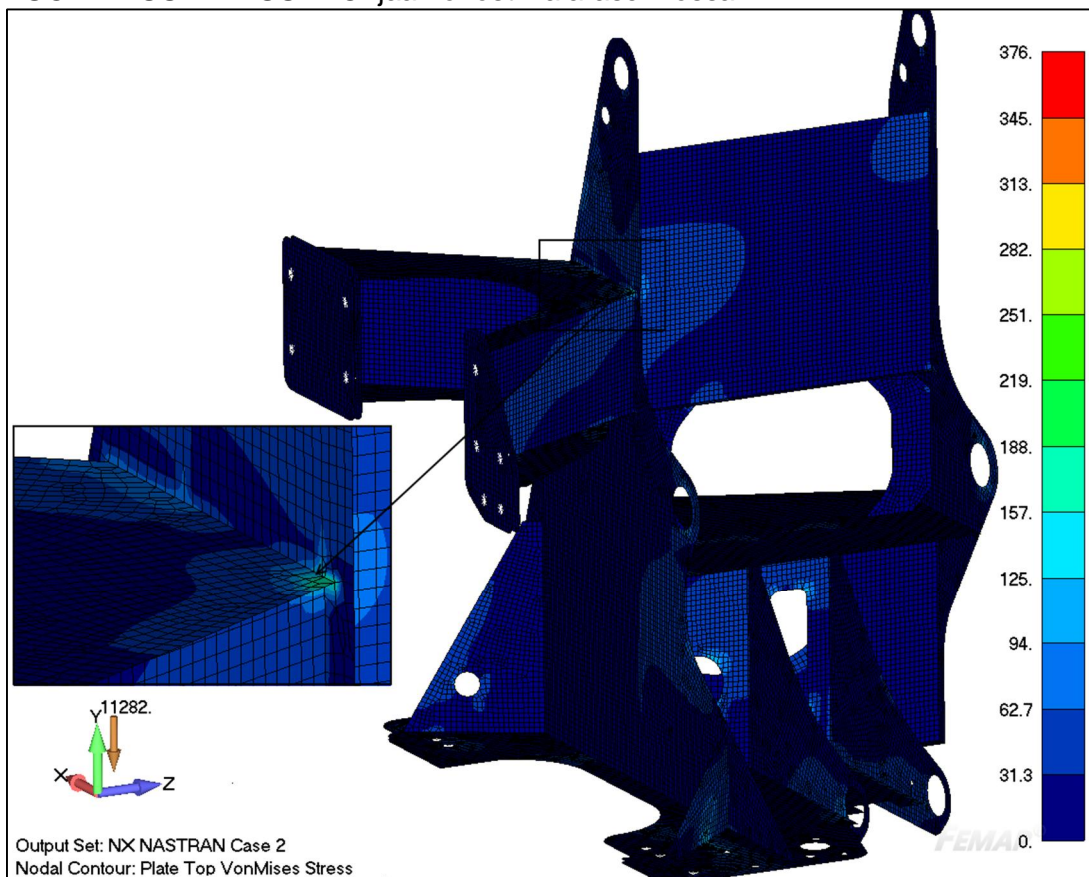
$$A_{\text{y_Tuuli}} := \frac{A_{\text{yTuuli}}}{2} = 1270\text{N}$$

$$A_{\text{z_Tuuli}} := \frac{A_{\text{zTuuli}}}{2} = 2841\text{N}$$

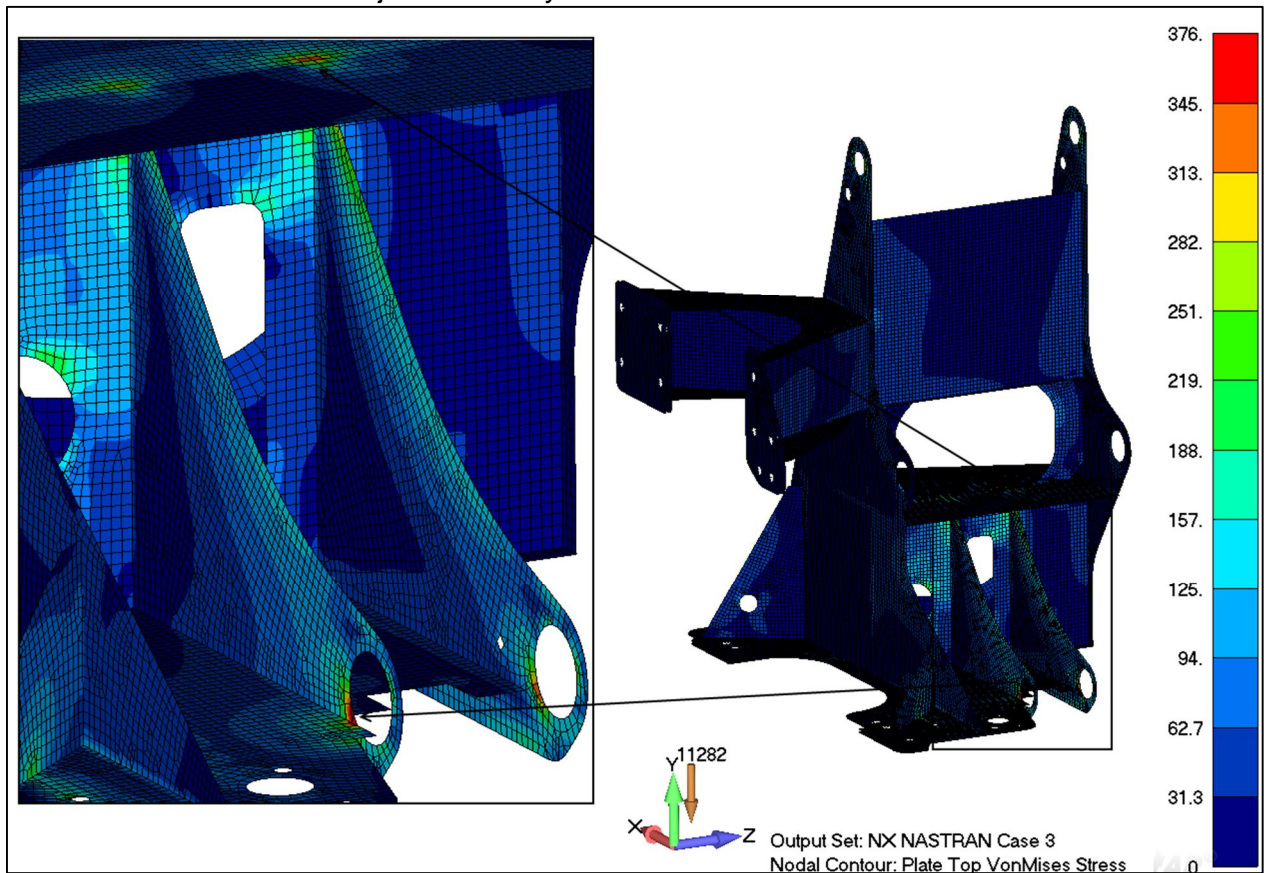
KUORMITUSTAPAUS 1. Ohjaamonostin vaaka-asennossa



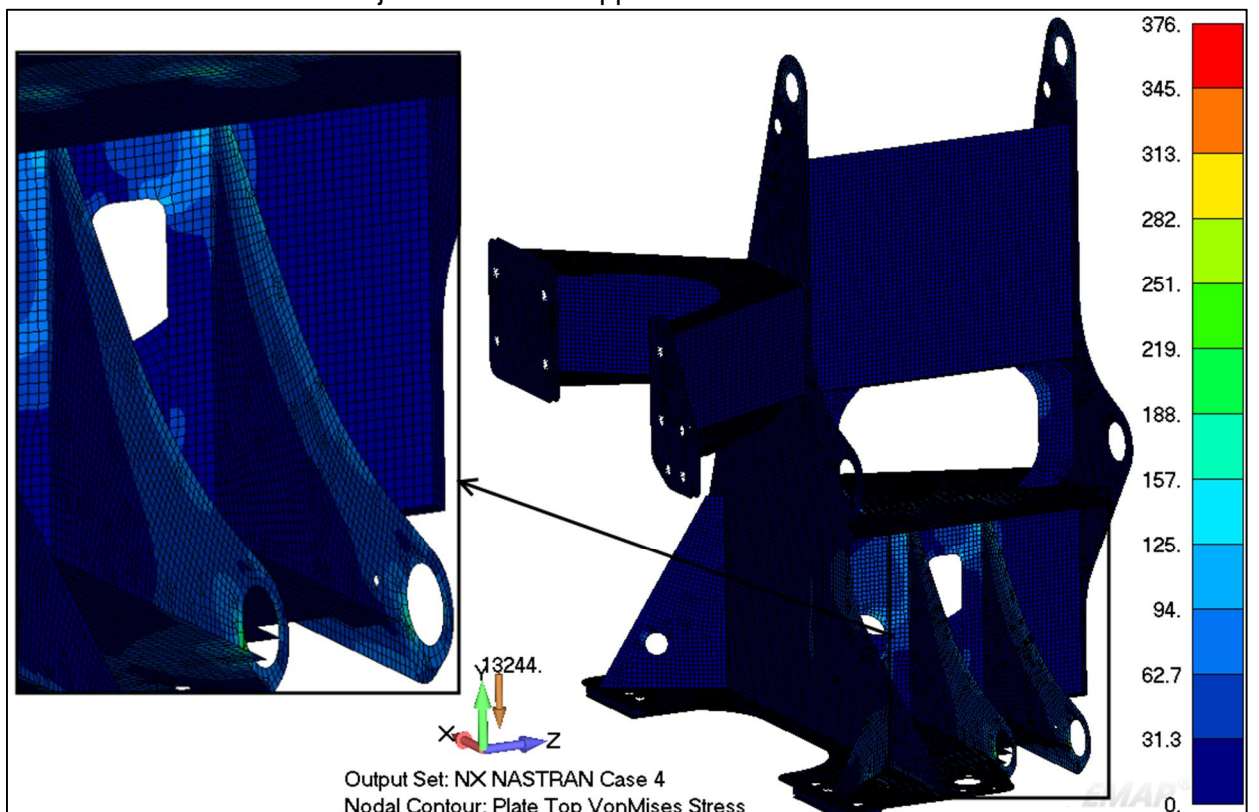
KUORMITUSTAPAUS 2: Ohjaamonostin ala-asennossa



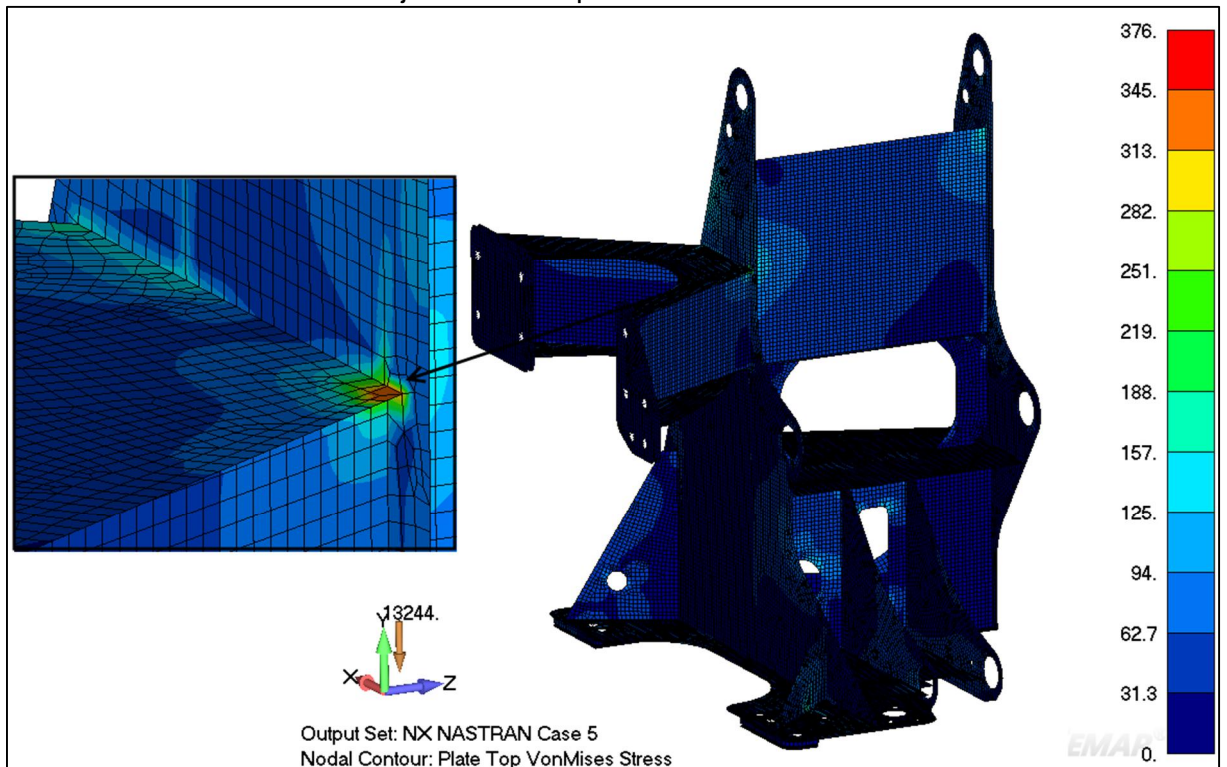
KUORMITUSTAPAUS 3: Ohjaamonostin ylä-asennossa



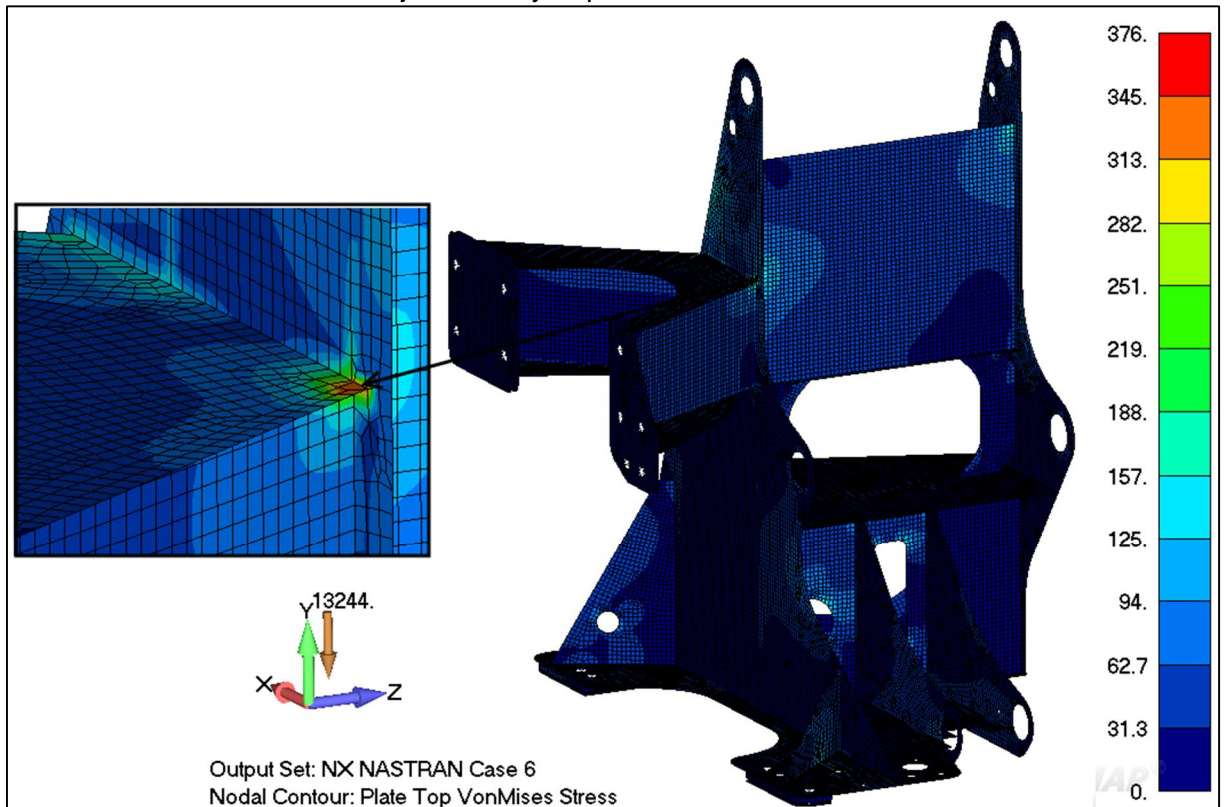
KUORMITUSTAPAUS 4: Ohjaamonostin sumppu-asennossa



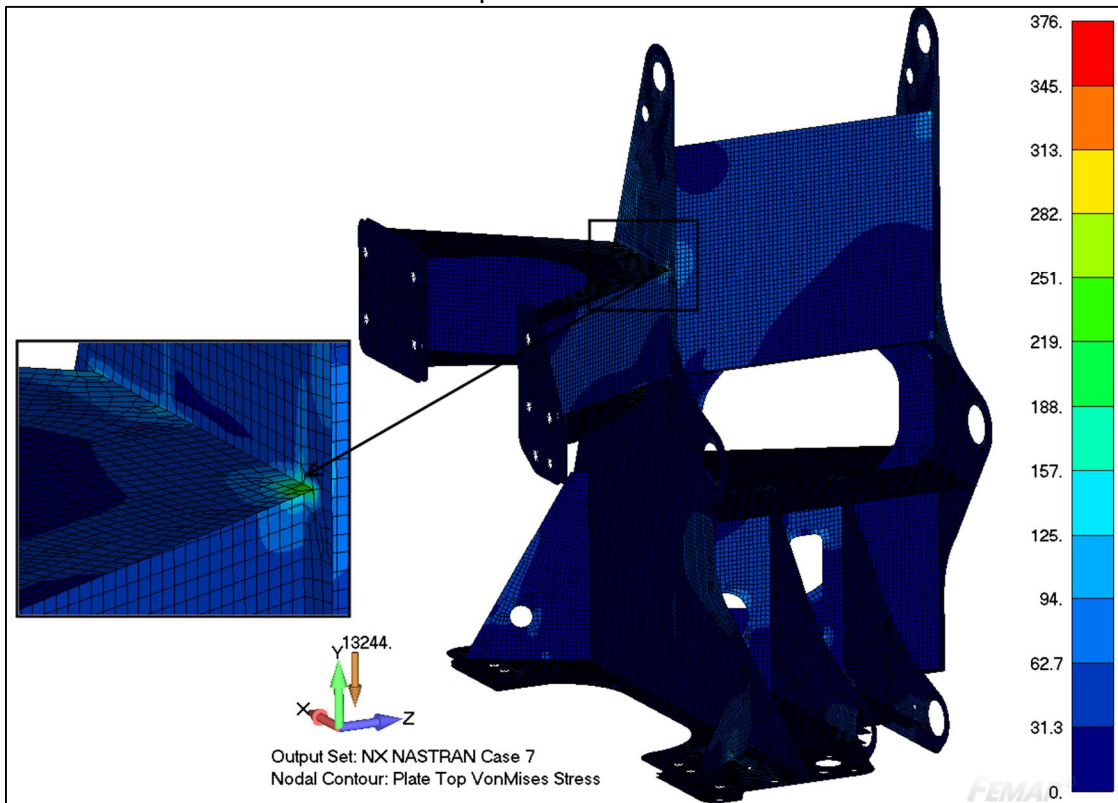
KUORMITUSTAPAUS 5: Hätäjarrutus vastapäivään



KUORMITUSTAPAUS 6: Hätäjarrutus myötäpäivään



KUORMITUSTAPAUS 7: Tuuli vastapäivään



KUORMITUSTAPAUS 8: Tuuli myötäpäivään

