

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

Henri Rautajärvi

PUKKINOSTURIN PÄÄKANNATTIMEN UUDELLEEN MUOTOILU

Työn tarkastaja(t)

Professori Timo Björk

TkT Hannu Oja

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
LUT Kone

Henri Rautajärvi

Pukkinosturin pääkannattimen uudelleen muotoilu

Diplomityö

2016

57 sivua, 21 kuvaa, 10 taulukkoa ja 6 liitettä

Tarkastajat: Professori Timo Björk
TkT Hannu Oja

Hakusanat: Pukkinosturi, nosturi, pääkannatin

Tässä työssä tutkittiin eräässä nosturipatentissa esitettyjä innovatiivisia pääkannatinratkaisuja suurissa telakkapukkinostureissa. Erityisesti keskityttiin tuulen paineesta tuleviin kuormituksiin ja niiden pienentämiseen. Käytännössä haluttiin selvittää kuinka nosturin rakennelaskelmissa käytettävää tuulen vastuskerrointa voitaisiin pienentää ja onko patentissa esitetty rakenne toteuttamiskelpoinen. Työssä myös vertaillaan yhden ja kahden pääkannattimen vahvuuksia sekä heikkouksia, koska Konecranes monien kilpailijoiden sijaan suosii yhdenpääkannattimen ratkaisua suurissa telakkapukkinostureissa.

Innovatiivisessa telakkapukkinosturi patentissa nosturi on ideoitu kahdenpääkannattimen nosturiksi, jossa alavaunu on sijoitettu pääkannattimien väliin. Pääkannattimeen on suunniteltu erilliset hyllyt sekä ylä- että alavaunun kiskoille, joilla vaunut kulkevat. Patentissa esitettiin, että pääkannattimeen tehtävillä pyörityksillä voitaisiin tuulen vastuskerrointa pienentää merkittävästi.

Lujuuslaskelmien avulla saatiin selvitettyä pääkannattimen koko sekä painoarvio, jos käytettäisiin patentin esittämiä ratkaisuja. Näin saatiin selkeästi painavampi pääkannatin verrattuna nykyiseen Konecranesin käyttämään ratkaisuun. Lisäksi patentin esittämää profiiliä sekä Konecranesin nykyisin käyttämälle pääkannattimen profiilille tehtiin virtausanalyysit. Virtausanalyysin tuloksista ei voitu selvästi todeta, kumpi pääkannatin profiileista olisi parempi ratkaisu. Pyöritykset eivät näyttäneet tuovan selvää hyötyä vastuskertoimen pienentämiseen. Jatkotutkimuksena profiilien pienoismalleille tulisi tehdä tuulitunnelikokeet, jolla saataisiin tarkat sekä vertailu kelpoiset muotokertoimet tutkittaville pääkannattimen profiileille.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Henri Rautajärvi

New design for the main girder of the Goliath gantry crane

Master's thesis

2016

57 pages, 21 figures, 10 tables and 6 appendices

Keywords: Goliath gantry crane, crane, main girder

This thesis studied new and innovative main girder profiles for the Goliath gantry cranes, which were presented in a patent. The thesis particularly focused on how to reduce effect of the wind load on the main girder. In practice, the aim was to find out how the wind load coefficient could be reduced in the calculations of the crane structure and whether the structure that was presented in the patent was actually feasible to produce. The thesis also compares the strengths and weaknesses of the cranes, which are made with the one main girder method or the two main girder method. Konecranes, unlike the many competitors, favors the one main girder method when it designs new Goliath gantry cranes.

In the innovative Goliath gantry crane patent, an idea is thought up that the crane is designed with two main girders where the lower trolley is located between the main girders. The main girder is designed to have separate shelves for both the upper trolley and the lower trolley rails. The main idea presented in the patent is to round off the main girder's profile so that it would significantly reduce the wind load coefficient.

Structural calculations were used to estimate the main dimensions and the weight of the main girder, if the proposed method would be used from the patent. The calculations resulted in a significantly heavier main girder compared to the method that Konecranes currently uses. Flow analyzes were made to the main girder profile presented in the patent and Konecranes' standard main girder profile. Flow analyzes didn't show clearly which profile was better. The rounded off profile did not seem to bring clear benefits to reduce the wind load coefficient. Further studies should be made with scale models of the profiles in wind tunnel tests. These tests would give clear and comparable results for the wind load coefficients of the profiles.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Konecranes Finland osakeyhtiölle. Työssä tutkittiin erilaisia vaihtoehtoja suuren telakkapukkinosturin pääkannattajaksi. Kiitän lämpimästi tästä mahdollisuudesta koko Konecranes PORTS osastoa, etenkin työni ohjaajaa TkT Hannu Ojaa, joka ehdotti kyseistä aihetta.

Kiitän myös esimiestäni sekä työtovereita, joiden lievistä painostuksista lähdin päivittämään tutkintoani Diplomi-Insinööriksi. Olen saanut heiltä paljon tukea sekä motivaatiota opiskeluni eri vaiheissa. Työni ohjaajaa professori Timo Björkiä haluan kiittää asiantuntevasta ohjauksesta, kannustuksesta ja hyvistä neuvoista työn eri vaiheissa.

Erityisen lämmin kiitos myös vaimolle sekä pojille suuresta tuesta, kärsivällisyydestä sekä auttamisesta löytää aikaa opiskelulle.

Henri Rautajärvi

Hyvinkäällä 21.6.2016

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO	9
1.1	Työn tausta ja tavoitteet	9
1.2	Työnrajaus	11
2	PÄÄKANNATTAJA RATKAISUT TELAKKAPUKKINOSTUREISSA	12
2.1	Vaunuratkaisut	14
2.2	Nosturin nurkkakuormat	16
2.3	Päämittoihin vaikuttavia tekijöitä	17
2.4	Valmistus	18
2.5	Voimien kulku pääkannattimessa	19
2.5.1	Vinoutuminen	20
2.5.2	Tuulikuorma.....	21
3	TERÄSRAKENTEEN SUUNNITTELU	23
3.1	Laskenta F.E.M-normin mukaan	23
3.1.1	Nosturiluokan γ_c valinta.....	23
3.1.2	Nostolisän Ψ valinta.....	26
3.1.3	Kuormitustapaukset F.E.M- normin mukaan	26
3.1.4	Tuulenpaine nosturin suunnittelussa.....	27
3.2	Uusi pääkannatin design	32
4	LASKENNAN TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI	36
4.1	Nosturin tekniset tiedot	36
4.2	Sopivan profiilin iterointi.....	38
4.3	Pääkannattimen painon tarkastelu	40
4.4	Lommahdustarkastelu	40
5	VIRTAUSANALYYSI	42

5.1	Pääkannattimen virtauslaskenta.....	42
5.1.1	Standardi $k - \varepsilon$ -turbulenssimalli.....	43
5.1.2	$k - \omega$ SST-turbulenssimalli.....	44
5.2	Virtauslaskennan tulokset.....	44
5.3	Yhteenvedo virtauslaskennasta.....	48
6	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	50
7	YHTEENVETO.....	55
	LÄHTEET.....	56
	LIITTEET	

LIITE I: Case nosturin pääkuvat.

LIITE II: Karkea käsin laskenta.

LIITE III: Pääkannattimen lohkot

LIITE IV: Pääkannattimen profiilit laskennassa

LIITE V: Pääkannattimen jännitykset eri tapauksissa

LIITE VI: Painolaskenta

SYMBOLILUETTELO

A	kannattimen nettotuulipinta-ala
A_e	bruttotuulipinta-ala
A_{ref}	otsapinta-ala
C_D	vastusvoimakerroin
C_f	muotokerroin
F_1	ensimmäinen palkkiin kohdistuva tuulivoima
F_2	toiseen palkkiin kohdistuva tuulivoima
F_n	n. palkkiin kohdistuva tuulivoima
F_{total}	kokonais tuulivoima
M_v	vääntömomentti
m_{li}	kuormien syklimäärä
m_{max}	maksimikuorma
n_i	syklien määrä
n_{max}	kokonaissyklimäärä
k_p	kuormaspektrikerroin
q	tuulenpaine [N/mm ²]
S_G	nosturin omasta massasta tuleva kuormitus [kN]
S_L	kuormasta tuleva kuormitus [kN]
S_H	horisontaalinen kuormitus [kN]
S_T	purkureille törmäyksestä aiheuttama kuormitus [kN]
S_W	maksimi käyttötuulen aiheuttama kuormitus [kN]
S_{Wmax}	myrskytuulentuulen aiheuttama kuormitus [kN]
S_W	maksimi käyttötuulen aiheuttama kuormitus [kN]

t	profiilin seinämänpakuus
U	tuulen nopeus
V_L	nostonopeus [m/s]
V_S	tuulen nopeus [m/s]
ρ_1	dynaamisentestin ylikuormakerroin
ρ_2	staattisentestin ylikuormakerroin
γ_c	vahvistuskerroin
Ψ	nostolisä
ξ	kokeellisesti selvitetty kerroin nostolisän laskennassa
τ	leikkausjännitys
η	varjostuskerroin

1 JOHDANTO

Konecranes on yksi maailman johtavista nostolaiteratkaisujen, nostureiden ja nostureiden kunnossapitopalveluiden toimittajista. Konecranes on jo pitkään ollut nosturiteollisuuden teknologinen kehittäjä ja uranuurtaja. Konecranesin tuotevalikoiman suurimmat ja samalla monimutkaisimmat laitteet ovat satamanostureita. Satamanosturit sisältävät useita eri kone- ja laitejärjestelmiä ja jokainen nosturi on suunniteltu asiakkaan käyttötavan ja – ympäristön mukaan yksilöllisesti.

Telakkapuominostureita GGC (Goljat Gantry Crane) käytetään suurten laivalohkojen käsittelyyn, joiden nostokyky voi olla 2000 t, raideväli yli 200 m ja korkeus yli 100 m. Nosturin teräsrakenteen yhtenä merkittävimmistä kuormituksista on tuuli, jossa rakenteen muotoilulla on oleellinen merkitys. Tuulipinta-ala vaikuttaa myös merkittävästi nosturin lujuuslaskentaan ja tätä kautta nosturin lopulliseen painoon sekä hintaan.

1.1 Työn tausta ja tavoitteet

Tutkimuskohteena on uuden innovatiivisen nosturin pääkannattajan profiilin toteuttamiskelpoisuuden arviointi ja sen vertailu perinteisiin rakenneratkaisuihin. Työn tavoitteena on perehtyä telakkapukkinosturin teräsrakenteen toteutustapoihin ja erityisesti uuden konseptin toteuttamiskelpoisuuden arviointiin.

Suuret telakkapukkinosturit ovat pysyneet samankaltaisina aina niiden alkuajoista lähtien. Suuria mullistuksia tai muutoksia ei vuosien varrella ole tapahtunut ja kaikki perusratkaisut ovat pysyneet samana. Jotkut valmistajat suosivat yhden, toiset kahden pääkannattimen mallia, mutta muuten nostureissa ei ole juurikaan suuria eroavaisuuksia. Jos katsotaan suuria telakkapukkinostureita, joita on valmistettu 1960-luvulla ja nostureita, joita valmistetaan nykypäivänä, niin suuria muutoksia ratkaisuissa ei ole. Sähkölaitteita ja noston seurannan rajoja on tullut jonkin verran lisää ja nostureiden koot sekä nostokuormat ovat nousseet, mutta mitään mullistavaa ei ole tapahtunut. (Nevsimal-Weidenhoffer, 2009, s. 3.)

Syitä siihen, miksi suurien telakkapukkinostureiden suunnittelussa ei ole tullut uusia innovaatioita voidaan selittää seuraavilla tekijöillä (Nevsimal-Weidenhoffer, 2009, s. 2.):

- Kokoneiden suunnittelijoiden valtava katoaminen monilta laitevalmistajilta, koska suurten telakkapukkinostureiden kysyntävälit ovat olleet pitkiä.
- Jäljelle jääneet valmistajat ovat tarjonneet samoja ratkaisuja kilpailun pienentyessä, kehitystä ei ole tapahtunut.
- Uusilla aasialaisilla valmistajilla ei ole ollut kiinnostusta nostureiden kehitykseen.
- Monilla satamilla, joille uusia nostureita on toimitettu 2000-luvulla, ei ole ollut aikaisemmin suuria telakkapukkinostureita tai heillä on vähäinen tietämys näistä nostureista.

Käytännössä sammoilla ratkaisuilla on jatkettu yli 30 vuotta tai pidempään. Nosturin suunnittelussa täytyy ottaa huomioon seuraavia vaatimuksia (Nevsimal-Weidenhoffer, 2009, s. 3):

- 1) Teknologia on edennyt 50 vuodessa paljon eteenpäin ja tämän takia vanhat juurtuneet ratkaisut täytyisi tarkastella uudestaan.
- 2) Nosturin käyttökustannukset
- 3) Huoltokustannukset
- 4) Tiukentuneet ympäristöstandardit
- 5) Turvallisuusaspekti
- 6) Nykyisten kapasiteettien riittämättömyys

Telakkapukkinostureissa käytetään edelleen paljon vanhoja, tosin toimiviksi huomattuja teräksiä. Nosturit valmistetaan käytännössä edelleenkin S235 sekä S355 teräksistä, joilla on erinomaiset hitsausominaisuudet. Nosturithan ovat käytännössä suuria hitsattuja rakenteita. Uusia materiaaleja kuten suurlujateräksiä ei ole nosturivalmistuksessa käytetty, johtuen sekä siitä niiden saatavuusongelmista maailmalla, että huonosta tiedosta niiden hitsausominaisuuksista sekä suurlujuusterästen standardoinnin puutteesta suunnittelu prosessissa. Suurlujateräksiä käyttämällä nostureista voisi saada lujempia sekä kevyempiä. Nosturin keveydellä saadaan myös aikaan ympäristöystävällisiäkkin ratkaisuja. (Nevsimal-Weidenhoffer, 2009, s. 4.)

Myös suunnittelutyökalut ovat muuttuneet vuosien aikana. Nykyään voidaan kappale suunnitella ja laskea paljon tarkemmin kuin ennen uusien suunnittelu ohjelmien avulla. Kappaleista voidaan tehdä aerodynaamisempia kuin vanhoista nostureista. Näin saadaan

tuulen vaikutusta pienemmäksi, kun tuuli kulkee nosturia pitkin jouhevammin. (Nevsimal-Weidenhoffer, 2009, s. 4.)

Nosturin paino ja tuulipinta-ala vaikuttavat myös erityisesti nosturin käytön aikaiseen energiankulutukseen. Ympäristöystävällinen ajattelu on lisääntynyt myös raskaassa teollisuudessa kuin myös nosturien lopullisissa käyttäjissä. Tosin tähän vaikuttaa myös energian hinnan tulevaisuuden näkymät, jotka monissa arvioissa on kasvava. Kevyempi sekä aerodynaamisempi nosturi tarvitsee vähemmän energiaa liikkumiseen ja näin ollen rahaa säästyy loppukäyttäjältä. (Nevsimal-Weidenhoffer, 2009, s. 5.)

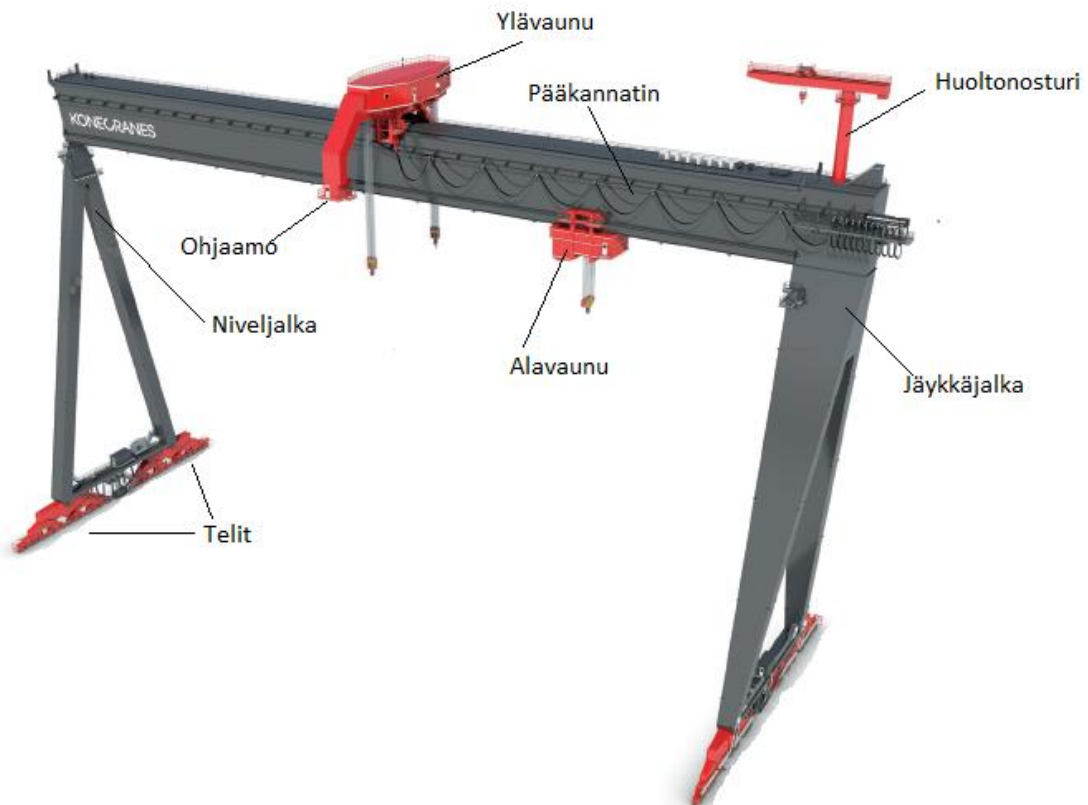
1.2 Työnrajaus

Työssä keskitytään telakkapukkinosturi pääkannattimen laskentaan ja uudelleen muotoiluun. Pääkannatin on telakkapukkinostureissa suurin sekä painavin rakenne, jonka tuulikuormituksilla on erittäin merkittävä vaikutus lopun nosturin mitoittamiseen sekä nosturiradan / laiturin suunnitteluun. Laskennan tuloksena ei ole tarkoitus saada täysin optimoitua ratkaisua vaan tarkoituksena on selvittää uuden patentin mukaisen pääkannattimen päämitat ja paino riittävällä tarkkuudella.

Tarkoituksena on laskea ja vertailla uuden innovatiivisen ratkaisun mahdollisuuksia ja toteutumiskelpoisuutta telakkapukkinosturin pääkannattimessa verrattuna Konecranesin nykyiseen ratkaisuun. Erityisesti kuinka uusi innovatiivinen muotoilu vaikuttaa tuulen aiheuttamaan kuormitukseen.

2 PÄÄKANNATTAJA RATKAISUT TELAKKAPUKKINOSTUREISSA

Suuret telakkapukkinosturit ovat erittäin tärkeässä asemassa telakoilla laivan rakennuksessa sekä offshore-teollisuudessa. Ilman suuria pukkinostureita suurten laivojen / öljynporauslauttojen valmistus olisi käytännössä mahdotonta. Kun suuret laivalohkot ovat valmiita siirrettäväksi ulos, se tapahtuu telakkapukkinostureilla. Offshore-teollisuudessa saatetaan siirtää kokonaisia, valmiiksi rakennettuja öljynporauslauttojen yläosia suoraan kuljetusta suorittavaan laivaan. Kuvassa 1 on esitetty periaatekuva tavallisesta Konecranesin valmistamasta telakkapukkinosturista. (Konecranes, 2012, s. 42.)



Kuva 1. Telakkapukkinosturi (Konecranes, 2012, s. 52).

Nosturin koostuu pääkannattimesta, johon kiinnittyy jäykkäjalka sekä niveljalka. Suurissa telakkapukkinostureissa on ylävaunu, jonka kokonaisnostokyky vaihtelee nykyään 700 – 500 t välillä. Ylävaunussa on kaksi nostokoukkua, joita kumpaakin nostaa oma nostokoneistonsa. Nykyään Konecranes on asentanut ohjaamon myös ylävaunuun, mutta

ohjaamo voidaan suunnitella myös jäykkään jalkaan. Alavaunun nostokyky vaihtelee 300–750 t välillä. Alavaunussa on yleensä vain yksi nostokoukku, jota nostaa yhdestä kahteen nostokoneistoa, koneistojen määrään vaikuttaa tarvittava nostokuorma. Jos asiakas haluaa, alavaunuun saa myös niin sanotun apunostokoneiston, jolla voidaan nostaa pienempiä kuormia. Apunostokoneiston nostokyky vaihtelee yleensä 25–50 t välissä. Nostureihin kuuluu myös huoltonosturi, joka yleensä sijaitsee jäykän jalan puolella. Tällä voidaan nostella pieniä tarvikkeita ylös nosturiin sekä varaosia vaunuihin. (Konecranes, 2012, s. 52.)

Suuret telakkapukkinosturit voidaan jakaa kahteen pääryhmään yhdellä; pääkannattimella tai kahdella pääkannattimella toteutettuihin ratkaisuihin. Kummassakin ratkaisussa on omat hyvät ja huonot puolensa. Konecranes on omissa laskelmissaan ja tutkimuksissaan tullut siihen tulokseen, että yhden pääkannattimen nosturi tulee kokonaismassaltaan kevyemmäksi ja halvemmaksi valmistaa kuin kahden pääkannattimen malli. Kuitenkin monet kilpailijat suosivat kahden pääkannattimen mallia, kuten saksalainen Krupp sekä kiinalainen ZPMC. (Konecranes, 2012, s. 53.)

Suurten telakkapukkinostureiden eli goljattinostureiden koko on kasvanut 1960-luvulta lähtien valtavasti. Sen on saanut aikaan asiakkaiden vaatimukset yhä suuremmista nostokorkeuksista ja – kuormista. Matkailu- ja rahtilaivojen koot ovat viime vuosina kasvaneet, koska halutaan kuljettaa mahdollisimman paljon kerralla ja näin säästää kustannuksissa. Tämä tietenkin vaikuttaa heti valmistuslohkojen kokoon ja näin ollen nosturiin asetettavaan kuormitus- sekä nostokorkeusvaatimukseen. Goljattinostureiden ensimmäinen suuri tuleminen voidaan ajoittaa karkeasti 1960- sekä 1980-luvun väliin. Noin 20 vuotta myöhemmin seuraava suurempi kysyntä alkoi 1990-luvun lopulla ja kesti aina vuoden 2008 talouskriisiin asti. Kysynnän nousuun vaikutti merkittävästi laivojen koon kasvaminen ja uudet telakat, joita syntyi Kiinaan sekä Brasiliaan. Tietysti vanhojen 1960-luvulla tehtyjen nostureiden eliniän päätyminen vaikutti myös positiivisesti kysyntään. (Nevsimal-Weidenhoffer, 2009, s. 2.)

Telakkapukkinostureiden koon kehitys vuosien mittaan (Nevsimal-Weidenhoffer, 2009, s. 2):

- Jänneväli: alkujaan 40 – 60 m, myöhemmin 80 – 140 m, nykyään jopa yli 200 m
- Nostokorkeus: alkujaan noin 60 m, myöhemmin noin 80 m, nykyään yli 100 m

- Nostokapasiteetti: alkujaan 150–300 t, myöhemmin 900–1000 t, nykyään 1000–2000 t.

Konecranes valmistaa pääsääntöisesti telakkapukkinostureita yhdellä pääkannattimella. Poikkeuksiakin on tehty, mutta sellaiset telakkapukkinosturit, joissa on kaksi pääkannatinta, ovat olleet suhteellisen pieniä ja nosturin jänneväli on ollut alle 100 metriä ja nostokyvyltään vain noin 300 t. Kun Konecranes valmisti ensimmäiset telakkapukkinosturit 1970-luvulla (tuolloin vielä KONE), pääkannattimen muotoon otettiin mallia saksalaisilta, jotka olivat jo tämän tyyppisiä nostureita valmistaneet. Sen jälkeen kyseistä pääkannattimen muotoa on laskennallisesti parannettu ja luotu tähän pääkannattimeen omat tarkat laskentatavat, jolla saadaan paras mahdollinen lopputulos eli kestävä, mutta myös mahdollisimman kevyt rakenne. (Stenholm, 2015.)

2.1 Vaunuratkaisut

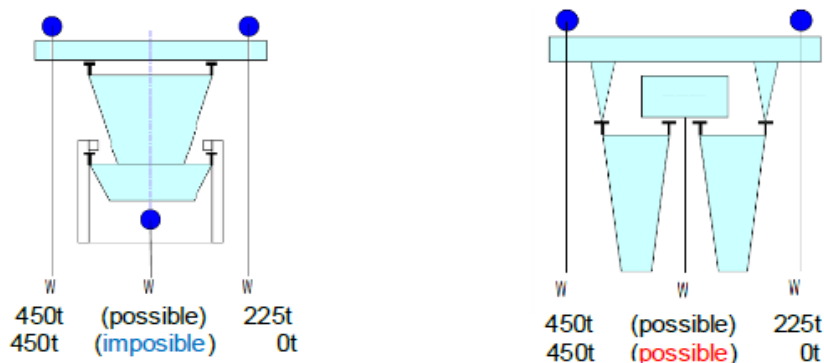
Yhden pääkannattimen mallissa vaunujen radat pysyvät aina samansuuntaisina kaikissa tilanteissa (Auringon paistaessa, tuulen vaikutuksesta, epäsymmetrinen nostokuorma). Jos tehdään epäsymmetrinen nosto ja kuormaa paljon toisella koukulla. Tällaisessa tilanteessa kahden pääkannattimen pukkinosturissa vain toinen pääkannatin taipuu ja toinen pysyy melkein suorana. Tämä ilmiö lisää vaunun pyörien ja radan kulumista, koska kiskon ja pyörän kosketuspinta kapenee merkittävästi. (Vainio, 2015.)

Erityisesti auringonpaiste voi aiheuttaa ongelmia kahden pääkannattimen mallin vaunujen ajossa. Konecranesilla on kokemuksia kahden pääkannattimen pukkinostureista, joissa on ollut selviä ongelmia, kun aurinko on lämmittänyt toista pääkannatinta ja se on alkanut teräksen lämpölaajenemisen takia taipumaan. Tämä niin sanottu banaani efekti on pahimmillaan saattanut tiputtaa koko vaunun pois kiskoiltaan, kun toinen pääkannatin lämpenee rajummin kuin toinen. Erityisesti tämä ongelma ilmenee, jos pääkannattimen pituus on yli 100 metriä. (Vainio, 2015.)

Yhden pääkannattimen mallissa banaani efekti ei ole niin selkeä, koska käytännössä pääkannattimesta tulee jäykempi. Jos banaani efektiä tulee, kaareutuvat kiskot saman verran. Monet asiakkaat vaativat, että pääkannatin ei saa taipua kuormasta enempää kuin $\frac{\text{Jänneväli}}{800}$. Konecranes on huomannut, että samoilla jännityksillä kahden pääkannattimen nosturi on

löysempi ja tähän vaatimukseen on vaikeampi päästä. Tämä tarkoittaa, että pääkannattimeen täytyy lisätä enemmän terästä, mikä lisää painoa. (Vainio, 2015.)

Yksi selkeä etu kahden pääkannattimen pukkinosturissa on verrattuna yhden pääkannattimen malliin. Pukkinostureissa on ylävaunussa käytännössä aina kaksi nostokoukkuja. Yhden pääkannattimen mallissa täytyy asettaa rajoituksia koukun nostokuormien erolle. Jos ylävaunun toisessa koukussa on täysi kuorma, niin silloin myös toisessakin koukussa täytyy olla kuormaa noin 30–50 % maksimikuormasta. Kahden pääkannattimen pukkinosturissa tällaista ongelmaa ei ole koska ylävaunun kiskojen väli on paljon pidempi ja näin ollen stabiilimpi ratkaisu (kuva 2). (Stenholm, 2015.)



Kuva 2. Vaunun stabiiliteettiä vertailla (possible = mahdollinen, impossible = mahdoton) (Krupp, 1998, s. 2).

Tämä kuitenkin vaikuttaa paljon siihen, kuinka leveä pääkannattimen yläpaarre on yhden pääkannattimen mallissa. Epästabiilius ei tule aina automaattisesti ja sen korjaamiseenkin on ratkaisuja kuten erillinen teli, joka estää vaunun nurkan nousua. Tietenkin tämä lisää valmistuskustannuksia. Tämä ongelma on erittäin harvinainen ja riippuu käytännössä juuri pääkannattimen suhteista. (Stenholm, 2015.)

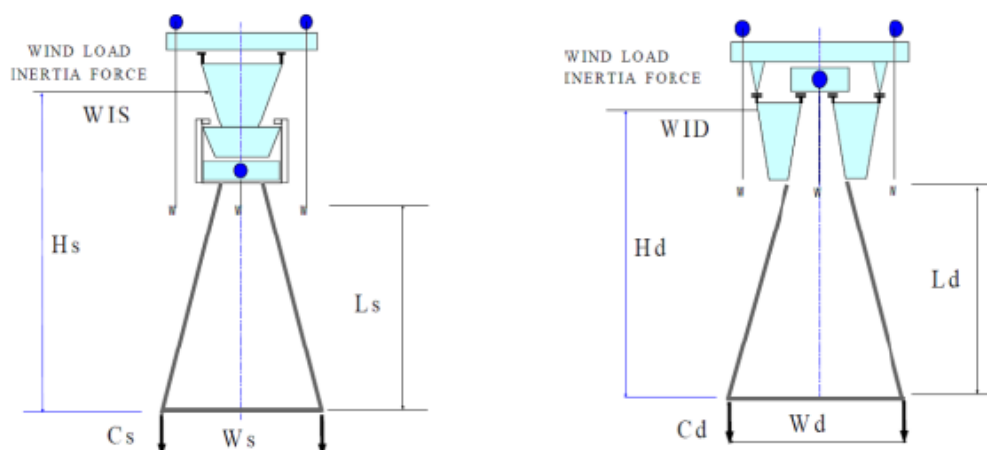
Yhden pääkannattimen ylävaunun kiskoväli jää yleensä niin pieneksi, että vaunu kippaa, jos koukkujen kuormaero kasvaa liian suureksi. Kahden pääkannattimen mallissa kiskoväli tulee pakostakin niin suureksi, että kippaamisen mahdollisuutta ei edes tule. Jos koukkuväli erittäin suuri, tämä sama ongelma voi tulla ongelmaksi myös kahden pääkannattimen nostureissa. (Stenholm, 2015.)

Ylävaunun nostokoneistojen koukkuväli ja sen muunneltavuus käytön aikana on monelle telakalle erittäin tärkeä. Lohkojen koot vaihtelevat suuresti ja samalla nosturilla voidaan joutua nostamaan erittäin suuria lohkoja tai suhteellisen pieniä lohkoja. Konecranesin telakkapukkinosturit on suunniteltu koukkublokin siirtokoneistolla, jolla voidaan muuttaa ylävaunun nostokoukkujen väliä. Tietenkin tämä voidaan tehdä myös nosturissa, jossa on kaksi pääkannattinta, mutta yhden pääkannattimen etuna on se, että kiskoväli ylävaunussa on selkeästi pienempi kuin kahden pääkannattimen mallissa. Näin ollen koukut saadaan erittäin lähelle toisiaan ja tarvittaessa riittävän kauaksi toisistaan. Yleensä koukkujen väli voidaan säätää 13:sta 18 m:n nostureissa, jotka nostavat vähintään 600 t. Pienemmissä nostureissa säätöväli on pienempi. (Konecranes, 2012, s. 52.)

2.2 Nosturin nurkkakuormat

Nosturin paino on monesti ratkaisevassa asemassa, kun suunnitellaan asiakkaalle uutta nosturia. Paino vaikuttaa suoraan pyöräkuormiin ja tätä kautta nosturin radan suunnitteluun ja valmistukseen. Nosturiradan valmistus kuuluu pääsääntöisesti asiakkaalle, mutta sen takia asiakkaalta tulee yleensä tiukat raja-arvot, joita nosturin pyöräkuormat eivät saa missään nimessä ylittää. Tämän takia Konecranes suosii yhden pääkannattimen ratkaisua, koska vuosien varrella tehdyissä laskelmissa on todettu, että yhden pääkannattimen telakkapukkinosturi on noin 10–20% kevyempi kuin kahden pääkannattimen telakkapukkinosturi. Painon säästö riippuu nosturin koosta. (Stenholm, 2015.)

Kahdella pääkannattimella tehdystä nosturista tulee aina noin viisi metriä matalampi kuin vastaavalla alavaunun nostokorkeudella suunniteltu yhden pääkannattimen pukkinosturi, koska alavaunu kahdenpääkannattimen nostureissa sijoitetaan myös pääkannattimen päälle. Kun kuormaa nostetaan, alavaunun koukkublokin köydet kulkevat pääkannattajien välistä. Tästä seuraa, että pääkannattimeen tuulesta aiheutuvalla voimalla on suurempi vipuvarsi kuin yhden pääkannattimen pukkinosturissa (kuva 3). Tämä aiheuttaa nurkille ja jaloille suuremmat kuormitukset myrskytilanteissa ja nostaa muutenkin nurkkakuormia. (Krupp, 1998, s. 5.)



Kuva 3. Tuulivoiman vipuvarren vertailu (wind load inertia force = tuulikuorman jatkuva voima) (Krupp, 1998, s. 5).

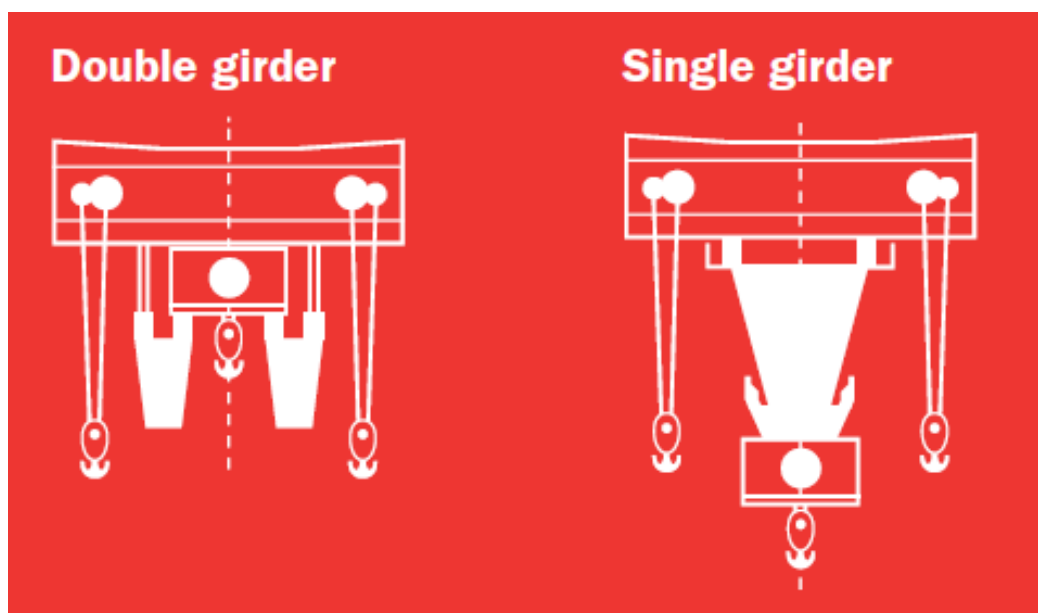
Vaikka nosturin korkeudessa säästetään ja näin ollen myös jalkojen painossa, on todennäköisempää, että nosturista tulee silti painavampi ja näin ollen kalliimpi nosturi. Myös valmistus on hankalampaa ja kalliimpaa kuin yhden pääkannattimen tapauksissa: kahden pääkannattimen nosturissa on enemmän hitsattavaa ja kokoonpantavaa, mikä lisää työtunteja valmistuksessa. (Stenholm, 2015.)

2.3 Päämittoihin vaikuttavia tekijöitä

Valmistajat, jotka käyttävät enemmän kahden pääkannattimen mallia, perustelevat monesti, että näin tulee 5–10 metriä matalampi nosturi kuin yhdellä pääkannattimella, vaikka alavaunun nostokorkeus on sama. Tämä on kuitenkin visuaalinen haitta. Jos alueella, johon nosturi tulee, on tarkat rajat sille kuinka korkea nosturi voi olla, niin silloin kahden pääkannattimen mallissa on enemmän mahdollisuuksia tilan käytölle. Yleensä korkeus ei ole rajoittava tekijä telakkapukkinostureissa. Nosturin korkeuksissa on silloin väliä, jos nosturilla ajetaan toisen nosturin ali tai sen täytyy alittaa jokin muu rakennelma. Suuret pukkinosturit ovat sen verran isoja kokonaisuuksia, että niiden yli ei ajeta, joten nosturin korkeuden rajoittamiseen ei yleensä ole mitään järkevää syytä. Joillakin laivanrakentajilla on suuret hallit, joissa nostureita käytetään valmistuksessa. Silloin uuden nosturin korkeudelle on tarkat, rajat joita ei saa ylittää. (Krupp, 1998, s. 5.)

Kahden pääkannattimen huonoksi puoleksi voidaan sanoa, että nosturista tulee jonkin verran korkeampi kuin nosturista, joka tehdään kahdella pääkannattimella. Tämä johtuu siitä, että

asiakas yleensä vaatii tietyn nostokorkeuden, mihin he haluavat alavaunulla päästä. Yhden pääkannattimen mallissa alavaunu roikkuu pääkannattimen alla (kuva 4). Näin ollen alavaunun maksimi nostokorkeus on reilusti pääkannattimen pohjan alapuolella. Kun taas kahden pääkannattimen mallissa maksimi nostokorkeus on pääkannattimien pohja. Pelkkä koukku tai pieni kuorma voidaan nostaa jopa pääkannattimien väliin (kuva 4). Tämä johtuu siitä, että alavaunu on myös ylävaunun tapaan pääkannattimen päällä. Tästä johtuen nosturin jaloista ei tarvitse tehdä niin korkeita kuin yhden pääkannattimen mallissa. Vaikka jaloista joudutaan yhden pääkannattimen mallissa valmistamaan korkeammat ja näin ollen jalat painavat enemmän kuin kahden pääkannattimen mallissa, tulee nosturin kokonaispainosta pienempi kuin kahden pääkannattimen mallissa. Painossa säästö pääkannattimessa on tällöin merkittävä. (Krupp, 1998, s. 5; Stenholm, 2015.)



Kuva 4. Kahden ja yhden pääkannattimen poikkileikkaukset (double girder = kaksi palkkia, single girder = yksi palkki) (Konecranes, 2012, s. 52).

2.4 Valmistus

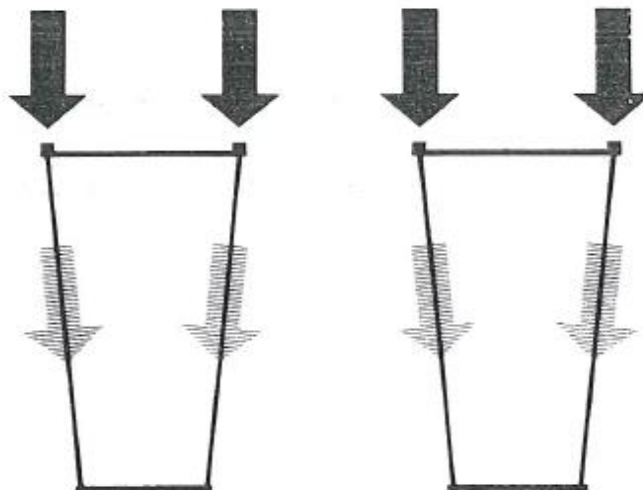
Valmistus on myös Konecranesin kokemusten perusteella helpompaa ja halvempaa yhden pääkannattimen malleissa. Erityisesti voitetaan hitsauksien määrässä ja ajassa. Tietenkin hitsit ovat jonkin verran suurempia kuin kahden pääkannattimen mallissa, mutta kokoonpanoon ja koko hitsausprosessiin menee vähemmän aikaa, kun se tehdään vain kerran. (Stenholm, 2015.)

Tämä tulee esiin selvästi esiin uumien jäykisteiden hitsauksessa. Saman koko luokan nosturissa pääkannattimen korkeus on käytännössä sama: on se sitten tehty yhdellä tai kahdella pääkannattimella. Jäykisteiden sekä jäykisteiden hitsin koko ei käytännössä muutu, jos verrataan keskenään yhden ja kahden pääkannattimen malleja, näin ollen jo pelkästään jäykisteiden hitsaamiseen menee tupla-aika kahdenpääkannattimen mallissa koska samat asiat joudutaan tekemään kumpaakin pääkannattimeen. Myös hitsattavien porttien määrä käytännössä tuplaantuu. (Stenholm, 2015.)

Nosturin, jossa on kaksi pääkannattinta, valmistuksen aikaiset lohkot ja yksittäiset palkit ovat kevyempiä ja pienempiä kuin nosturin, jossa on vain yksi pääkannatin. Korkeudessa ei ole suurta eroa. Näin nosturin valmistuksessa ei tarvitse siirrellä niin painavia lohkoja. Tämä helpottaa vaatimuksia, jota asetetaan valmistus pajan laitteille. Kahdessa pääkannattimen nosturissa, joudutaan hitsaamaan enemmän, mikä lisää hitsausvirheiden mahdollisuutta valmistuksessa. Työn valvonta erityisesti pääkannattimessa tuplaantuu ja tarkistettavien pisteiden määrä myös lisääntyy.

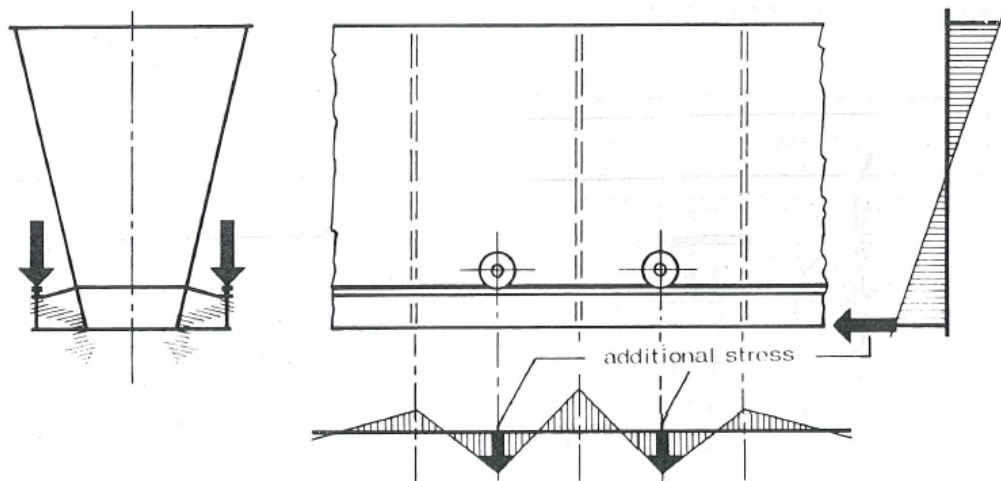
2.5 Voimien kulku pääkannattimessa

Kahden pääkannattimen mallissa pyöräkuormat niin ylä- kuin alavaunustakin kulkevat suoraan pääkannattimen pääuunia pitkin (kuva 5). Näin pääkannattimelle ei tule lisäkuormitusta alavaunun kiskon taivutusmomentista, niin kuin yhden pääkannattimen mallissa. Yhden pääkannattimen mallissa, jossa on erillinen alakotelo vain ylävaunun pyöräkuormat kulkevat pääkannattimen uunia pitkin. (Krupp, 1998, s. 2.)



Kuva 5. Pyöräkuormien kulku pääkannattimessa. (Krupp, 1998, s. 2.)

Alavaunun pyöräkuormista tulee lisäjännitystä alakotelon hitseihin jäykisteettömältä osalta, kun nosturissa on vain yksi pääkannatin. Pyöräkuormat aiheuttavat lisää taivutusjännitystä alakotelon hitseille. Lisäksi jännityshuipun aiheuttama lovivaikutus on erittäin hankala laskea tarkasti kiskon ja jäykisteiden liitoksissa (kuva 6). (Krupp, 1998, s. 4.)

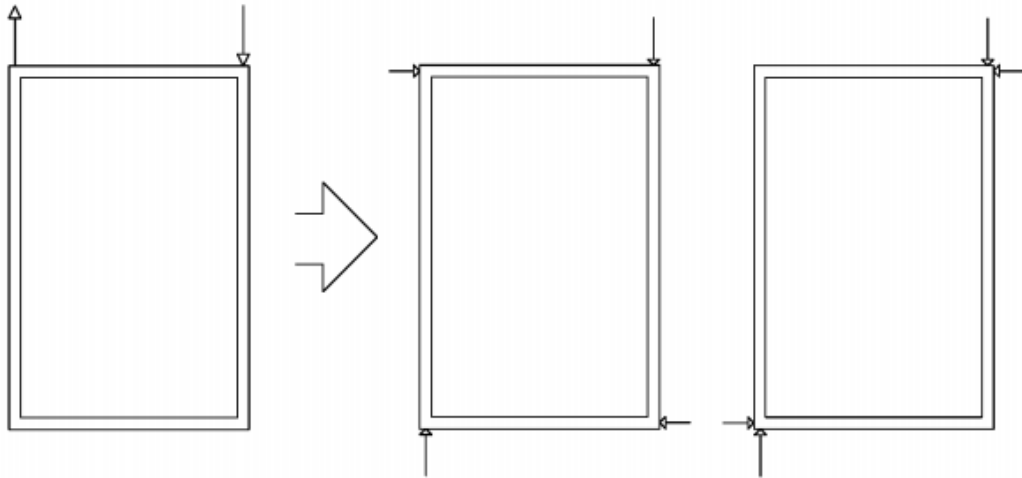


Kuva 6. Lisäjännitys alakotelon hitseissä yhdenpääkannattimen mallissa. (Krupp, 1998, s. 4).

2.5.1 Vinoutuminen

Pääkannattajissa erityisesti kahdenpääkannattimen mallissa voi esiintyä puhdasta Bredtin vääntöä, koska pääkannattimien profiili on yhtenäinen kotelopalkki. Yhdenpääkannattimen mallissa vinoutumista estää jonkin verran alakotelo. Tämä ilmiö voi esiintyä erityisesti epätasaisen noston aikana. Kahdenpääkannattimen mallissa vinoutuminen on läsnä koko ajan, kun taas yhdenpääkannattimen mallissa ainoastaan epätasaisessa nostossa.

Kaksoissymmetrisen kotelopalkin vääntökuormitus voidaan jakaa vinouttavaan voimaan ja puhtaaseen vääntöön. Kuvassa 7 on esitetty periaatteellinen kuva, jossa kotelopalkin voimapari on jaettu vääntäviin sekä vinouttaviin voimiin.



Kuva 7. Väännön aiheuttama voimien jako (Ahlfors, 2014, s. 5).

Ohut seinäiselle profiilille puhtaasta väännöstä muodostuva keikkausjännitys voidaan olettaa vakioksi koko seinämä paksuudella. Jolloin leikkausjännitys τ voidaan laskea Bredt'in kaavalla (Ylinen, 1970, s. 641)

$$\tau = \frac{M_v}{2 \cdot t \cdot A} \quad (1)$$

Yhtälössä (1) M_v on vääntömomentti, t on profiilin seinämäpaksuus ja A on profiilin poikkipinnan keskiviivan rajaamaa pinta-alaa. (Pennala, 2000, s. 215.)

Vääntö aiheuttaa profiilissa vinoutumista eli salmiakki efektin. Vinoutumista vastaan pääkannattimen sisälle on hitsattu portteja tasaisin välein, jotka estävät profiilin vinoutumisen. Varsinkin kahdenpääkannattimen mallissa, jossa vinoutuma on koko ajan läsnä, vinoutumista estävät portit ovat yleensä mitoitettu vahvemmiksi kuin yhdenpääkannattimen mallissa. (Tuomainen, 2015.)

2.5.2 Tuulikuorma

Tuulesta aiheutuvat voimat vaikuttavat pääkannattimen kautta selkeästi nosturin jalkojen mitoitukseen sekä nurkka kuormiin. Mitä korkeammalla pääkannatin sitä suurempi vipuvarsi pääkannattimeen aiheutuvalla tuulikuormalla on (kuva 3).

Tuulikuorma aiheuttaa myös rasituksia suoraan pääkannattimeen. Tuuliaiheuttaa puhtaan taivutuksen tuulen suunnassa. Kahdenpääkannattimen mallissa taivutus on suurempi kuin tuulenpuoleisessa pääkannattimessa, kun taas taaemmassa pääkannattimessa tuulesta johtuva taivutus ei ole merkittävä. Tämä aiheuttaa suurempia siirtymiä tuulen puoleisessa palkissa sekä vääntöä. Vääntö taas herkistää palkin vinoutumiselle. Epätasaisesti taipuvat kannattimet voivat aiheuttaa ongelmia kiskolinjoissa.

Yhdenpääkannattimen mallissa tällaista palkkien välistä eroavaisuutta ei tule. Tuuli aiheuttaa samalla lailla taivutusta. Näin ollen taipumisella ei ole vaikutusta vaunun kulkuun kiskoilla, kun siirtymät ovat samat.

3 TERÄSRAKENTEEN SUUNNITTELU

Nosturin laskennassa voidaan käyttää monia eri standardeja. Peruseriaatteen ovat jokaisessa standartissa samoja, mutta eroavaisuuksiakin varsinkin varmuuskertoimissa. F.E.M-normi on globaali ja tunnettu normi nostureiden suunnittelussa. EN standardin nosturinormi EN 15011 on korvaamassa kansallisia standardeja (DIN, BS, NEN jne.) sekä F.E.M-normin Euroopan alueella. Viimeisin versio F.E.M-normista on tehty 1998 eikä sitä ole sen jälkeen päivitetty, mutta silti se on edelleenkin erittäin käytetty ja tunnettu normin nosturipiireissä maailmalla.

3.1 Laskenta F.E.M-normin mukaan

F.E.M-normista löytyy seuraavat säädökset nosturin suunnitteluun (Verschoof, 1999, s. 144):

1. Tavoite ja soveltaminen
2. Luokitus ja kuormitus rakenteille ja mekanismeille
3. Jännitysten laskeminen rakenteissa
4. Väsymistarkastelut sekä mekaanisten komponenttien valitseminen
5. Sähköiset laitteet
6. Stabiilius ja turvallisuus tuulen aiheuttamaa liikettä vastaan
7. Turvallisuussäännöt
8. Testikuormat ja toleranssit

Nosturin laskentaa varten täytyy ensiksi määrittää laskentaa tarvittavia kertoimia kuten vahvistuskerroin ja nostolisä. Nämä saadaan selvitettyä nosturiluokan ja nosturin tyyppin avulla. (Verschoof, 1999, s. 144.)

3.1.1 Nosturiluokan γ_c valinta

Normissa jokaiselle nosturille määritellään nosturiluokka A, jonka avulla laskentaa varten valitaan ns. vahvistuskerroin γ_c . Taulukossa 1 on esitetty vahvistuskertoimet sekä niihin johtavat nosturiluokat. (F.E.M. 1.001 3nd, 1998a, s. 34.)

Taulukko 1. Vahvistuskertoimet eri nosturiluokissa (muk. F.E.M. 1.001 3nd, 1998a, s. 34).

Nosturiluokka	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
γ _c	1,00	1,02	1,05	1,08	1,11	1,14	1,17	1,20

Nosturiluokat on jaettu kahdeksaan ryhmään. Nosturiluokka valitaan taulukon 6 mukaan käyttäen apuna nosturille suunniteltua nostosyklien määrää sekä kuormaspektrikerrointa. Taulukossa 5 on esitetty nosturiluokkien eri vahvistuskertoimet laskennassa. (F.E.M. 1.001 3nd, 1998a, s. 7.)

Taulukko 2. Nosturiluokan määrittäminen (muk. F.E.M. 1.001 3nd, 1998a, s. 7).

Kuormitus- luokka	Käyttöluokka									
	U0	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9
Q1	A1	A1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Q2	A1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A8
Q3	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A8	A8
Q4	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A8	A8	A8

Nosturille suunnitellut / halutut syklimäärät valitaan nosturityypin sekä asiakkaan käyttötarpeiden mukaan. Suurissa telakkapukkinostureissa syklimäärät eivät ole kovin suuria verrattuna vaikkapa konttinostureihin, joille valitut nostosyklit ovat yleensä luokassa U7-U9 (2 000 000–4 000 000 sykliä). Suurissa telakkapukkinostureissa käytetään yleensä luokkia U4 tai U5 (125 000–500 000 sykliä). Suurin osa telakkapukkinostureista suunnitellaan 250 000 nostosykliin, mutta esimerkkinosturissa on telakkapukkinosturille aika suuri nostosyklien vaatimus. Sykliden määrä vaikuttaa nosturiluokkaan ja siten laskentaan isontaan vahvistuskerrointa. Toisin kuin esimerkiksi konttinostureissa mitoittava kuormitus telakkapukkinostureille, tulee staattisesta tilanteesta eikä niinkään väsyttävästä kuormituksesta. Taulukossa 7 on esitetty luokat, joihin syklit on jaettu. (Tuomainen, 2015.)

Taulukko 3. Sykliluokat F.E.M. normin mukaan (muk. F.E.M. 1.001 3nd, 1998a, s. 5).

Sympoli	Kokonois syklimäärä (n _{max})			
U0			n _{max}	≤ 16 000
U1	16 000	<	n _{max}	≤ 32 000
U2	32 000	<	n _{max}	≤ 63 000
U3	63 000	<	n _{max}	≤ 125 000
U4	125 000	<	n _{max}	≤ 250 000
U5	250 000	<	n _{max}	≤ 500 000
U6	500 000	<	n _{max}	≤ 1 000 000
U7	1 000 000	<	n _{max}	≤ 2 000 000
U8	2 000 000	<	n _{max}	≤ 4 000 000
U9	4 000 000	<	n _{max}	

Kuormaspektrikerrointa määritettäessä lasketaan, kuinka monta tapausta kutakin nostotapahtumaa on, eli kuinka monta kertaa nostetaan kokonaissyklimäärästä maksimikuormaa tai puolta kuormaa. (F.E.M. 1.001 3nd, 1998a, s. 6.)

$$k_p = \sum_{i=1}^r \left[\left(\frac{m_{li}}{m_{max}} \right)^3 * \left(\frac{n_i}{n_{max_i}} \right) \right] \quad (2),$$

Yhtälössä 2 on esitetty kuormaspektrikerroimen k_p laskenta, jossa m_{li} on kuorma kyseisellä syklimäärällä, m_{max} on maksimikuorma, n_i on syklien määrä sekä n_{max} kokonaissyklimäärä. Yhtälöstä saadaan ratkaistua kuormaspektrikerroin taulukon 4 mukaan. (F.E.M. 1.001 3nd, 1998a, s. 6.)

Taulukko 4. Kuormaspektrikerroin luokat (F.E.M. 1.001 3nd, 1998a, s. 6).

Sympoli	Spektrikerroin k _p			
Q1			k _p	≤ 0,125
Q2	0,125	<	k _p	≤ 0,250
Q3	0,250	<	k _p	≤ 0,500
Q4	0,500	<	k _p	≤ 1,000

Kun kuormaspektriluokka sekä syklimäärä tiedetään, voidaan taulukosta 2 hakea oikea nosturiluokka ja sen jälkeen löydetään taulukosta 1 F.E.M-normin vaatima vahvistuskerroin. (F.E.M. 1.001 3nd, 1998a, s. 7.)

3.1.2 Nostolisän Ψ valinta

Nostolisän laskentaan alkutietoina tarvitaan nosturin tyyppi sekä nostonopeus. Yhtälössä 3 on esitetty nostolisän laskenta

$$\Psi = 1 + \xi V_L \quad (3)$$

, jossa ξ on kokeellisesti selvitetty kerroin, joka määrittyy nosturityypin mukaan ja V_L on nostonopeus m/s. Kokeissa on todettu, että kerroin ξ on 0,6 kaikissa muissa nostureissa, paitsi puominostureissa 0,3. (F.E.M. 1.001 3nd, 1998a, s. 16.)

3.1.3 Kuormitustapaukset F.E.M- normin mukaan

Nosturin laskennassa nosturia tarkastellaan kolmen eri tapauksen mukaan;

- työskentely tuulettomassa tilanteessa (Tapaus I),
- työskentely maksimi käyttötuulella (Tapaus II),
- poikkeukselliset kuormitukset (Tapaus III).

Jokaiselle tapaukselle on F.E.M-normissa määritetty sallitut jännitykset, jotka on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Sallitut jännitykset eri tapauksissa F.E.M. normin mukaan (muk. F.E.M. 1.001 3nd, 1998b, s. 15).

Arvot γ_E	Tapaus I 1,5	Tapaus II 1,33	Tapaus III 1,1
Sallitu jännitys	$\sigma_E / 1,5$	$\sigma_E / 1,33$	$\sigma_E / 1,1$

Tapaus I otetaan huomioon staattinen kuormitus, joka tulee nosturin omasta massasta S_G , kuormasta tulevasta kuormituksesta S_L sekä horisontaalisesta S_H kuormituksesta. Tähän ei lasketa mukaan puskureille ajoa. Yhteiskuormitus kerrotaan vahvistuskertoimella, kuten yhtälössä 4 on esitetty, (F.E.M. 1.001 3nd, 1998a, s. 32.)

$$\gamma_c(S_G + \Psi S_L + S_H). \quad (4)$$

Tapaus II lasketaan samat tilanteet, mutta lisäksi otetaan maksimi käyttötuulen S_W vaikutus mukaan laskentaan, kuten yhtälössä 5 on esitetty, (F.E.M. 1.001 3nd, 1998a, s. 32)

$$\gamma_c(S_G + \Psi S_L + S_H) + S_W. \quad (5)$$

Tapaus III eli poikkeuksellisissa tilanteissa tarkastellaan kolmea tilannetta; myrskytuulta, puskureille törmäystä sekä nosturin testausta, joko staattisena tai dynaamisena testinä. Telakkapukkinostureissa tehdään staattinen testi. Pukin hätäjarrutus täytyy myös tarkastaa, mutta yleensä puskureille törmäys on pahempi tilanne. Yhtälössä 5, 7 sekä 8 on esitetty tapaus III laskettavat tilanteet, (F.E.M. 1.001 3nd, 1998a, s. 33)

$$S_G + S_{W \max}, \quad (6)$$

$$S_G + S_L + S_T, \quad (7)$$

$$S_G + \rho_1 S_L \text{ tai } S_G + \rho_2 S_L, \quad (8)$$

joissa $S_{W \max}$ on myrskytuulesta aiheutuvat kuormitukset, S_T on puskureille törmäyksestä aiheutuvat kuormitukset, ρ_1 on dynaamisentestin ylikuormakerroin ja ρ_2 on staattisen testin ylikuormakerroin. F.E.M-normin mukaan $\rho_1 = 1,2$ ja $\rho_2 = 1,4$. (F.E.M. 1.001 3nd, 1998c, s. 2.)

3.1.4 Tuulenpaine nosturin suunnittelussa

Tuuli on yksi ilmastollisista kuormituksista, joita voi syntyä nosturiin. Muut ilmastolliset kuormitukset tulevat lumesta ja lämpövaihtelusta. Nosturille määritellään suurin sallittu työskentely tuuli sekä suurin tuulen voimakkuus, kun nosturi on pois käytöstä. Sallitut tuulet oletetaan puhaltavan epäedullisemmasta suunnasta. Taulukossa 6 & 7 on esitetty normaaleja tuulenpaineita nostureille, jotka työskentelevät tuulen vaikutuksen alaisena F.E.M-normin mukaan. (F.E.M. 1.001 3nd, 1998a, s. 24.)

Taulukko 6. Normaaletta F.E.M:n mukaisia käyttötuuli paineita (muk. F.E.M. 1.001 3nd, 1998a, s. 24).

Käyttö	Tuulen paine käytössä (Mpa)	Tuulen nopeus (m/s)
Nostolaite on voidaan helposti suojata tuulta vastaan tai suunniteltu käytettäväksi kevyeseen tuuleen	125	14
Kaikki normaalit nosturi tyypit asennettuna ulos.	250	20
Laite, jonka on jatkettava työtä kovassa tuulella.	500	28

Taulukko 7. F.E.M normin mukaisia nosturi pois käytöstä tuulia (muk. F.E.M. 1.001 3nd, 1998a, s. 24).

Korkeus maanpinnasta (m)	Nosturi pois käytöstä tuulen paine (MPa)	Myrskytuuli (m/s)
0...20	800	36
20...100	1100	42
Enemmän kuin 100	1300	46

$$q = 0,613 * V_s^2 \quad (9)$$

Yhtälössä 9 on esitetty kuinka tuulen paine q lasketaan F.E.M-normin mukaan. V_s on tuulen nopeus. (F.E.M. 1.001 3nd, 1998a, s. 23.)

Tuulen vaikutus riippuu oleellisesti rakenteen muodoista. Onko rakenteessa pyöristyksiä, ristikoita vai pitääkö ottaa huomioon varjostuskertoimia. Muodoille on määritelty F.E.M-standardissa tietyt muotokertoimet (C_f), joka ottavat huomioon paine- ja imuvaikutukset erilaisiin pintoihin. Normi määrittää erilaisille muodoille omat muotokertoimet, joita täytyy käyttää rakenteiden laskennassa katso taulukko 8. Yksittäisiä muotokerroin arvoja voidaan pienentää, jos tuulitunnelikokeilla voidaan osoittaa, että taulukkoarvot ovat liian korkeat. (F.E.M. 1.001 3nd, 1998a, s. 26.)

$$F = A * q * C_f \quad (10)$$

Yhtälössä 10 on esitetty, kuinka rakenteeseen vaikuttava voima määritellään F.E.M. normin mukaan. A on rakenteen pinta-ala. (F.E.M. 1.001 3nd, 1998a, s. 26.)

$$F = 2,5 * A * q \quad (11)$$

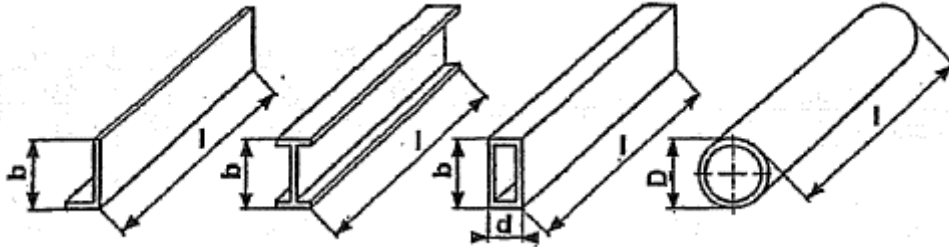
Yhtälössä 11 on esitetty kuormaan vaikuttava tuulivoima. Sellaisissa nostureissa, jotka eivät nosta pääsääntöisesti kontteja vaan erimuotoisia kappaleita ja niiden muotoa ei tarkalleen tiedetä. Kaavassa 11 käytetään kuorman pinta-alana minimissään pinta-alaa joka saadaan, kun koukun suunniteltu kuorma kerrotaan 0,5 m² per tonni. (F.E.M. 1.001 3nd, 1998a, s. 25.)

Taulukko 8. F.E.M normin-mukaisia muotokertoimia erilaisille muodoille (muk. F.E.M. 1.001 3nd, 1998a, s. 27).

Tyyppi	Kuvaus	Aerodynaaminen hoikkuus l/b tai l/D (1)						
		< 5	10	20	30	40	50	>50
Yksittäinen kappale	Pyöristetetyt kohdat []	1,15	1,15	1,3	1,4	1,45	1,5	1,6
	Suorakaideputki 356mm neliö asti	1,4	1,45	1,5	1,55	1,55	1,55	1,6
	ja 254 x 457 mm suorakulmio	1,05	1,05	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
	Muut kappaleet	1,3	1,35	1,60	1,65	1,70	1,80	1,8
	Pyöreät kappaleet:							
	D.Vs < 6m ² /s	0,60	0,70	0,80	0,85	0,90	0,90	0,90
	D.Vs > 6 m ² /s	0,60	0,65	0,70	0,70	0,75	0,80	0,80
Suorakaideputki yli 356mm neliö ja 245 x 457 suorakulmio	b/d							
	2	1,55	1,75	1,95	2,10	2,20		
	1	1,40	1,40	1,75	1,85	1,90		
	0,5	1,0	1,0	1,30	1,35	1,40		
	0,25	0,80	0,80	0,90	1,0	1,0		
Yksittäiset ristikko rakenteet	Littea sivuinen kappale	1,7						
	Pyöreät kappaleet:							
Konehuoneet jne.	D.Vs < 6m ² /s	1,10						
	D.Vs > 6 m ² /s	0,80						
	Suorakulmaiset rakenteet maassa tai pehmeällä tasolla	1,10						

Kuten taulukosta 8 voidaan päätellä, kannattimen muoto vaikuttaa muotokertoimiin. Jotta oikea muotokerroin saadaan selvitettyä, täytyy tietää aerodynaaminen hoikkuus. Se saadaan

selville, kun kappaleen pituus jaetaan kappaleen leveydellä eli b/l tai D/l (kuva 10). (F.E.M. 1.001 3nd, 1998a, s. 28.)



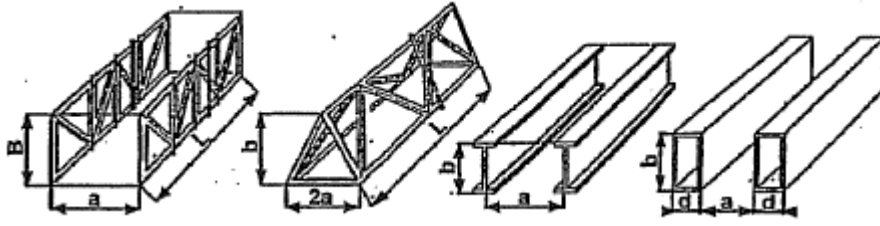
Kuva 8. Aerodynaamisen hoikkuuden määrittäminen. (F.E.M. 1.001 3nd, 1998a, s. 28).

Kun kannatin tai kannattimen osa on toisen kannattimen takana tuulensuojassa, lasketaan tuulivoimalle tälle kannattimen kohdalle vähennyskerroin eli niin sanottu varjostuskerroin. Taulukossa 9 on esitetty, kuinka tuo kerroin määritellään. (F.E.M. 1.001 3nd, 1998a, s. 28.)

Taulukko 9. Varjostuskertoimen η määrittäminen (muk. F.E.M. 1.001 3nd, 1998a, s. 29).

Välikerroin a/b	Kiinteyskerroin A/A_e					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	$\geq 0,6$
0,5	0,75	0,40	0,32	0,21	0,15	0,10
1,0	0,92	0,75	0,59	0,43	0,25	0,10
2,0	0,95	0,80	0,63	0,50	0,33	0,20
4,0	1,0	0,88	0,76	0,66	0,55	0,45
5,0	1,0	0,95	0,88	0,81	0,75	0,68
6,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Tämä kerroin määrittyy b ja a sekä suhteesta A/A_e , jossa A on kannattimen nettotuulipinta-ala (aukot vähennetty) ja A_e on kannattimen bruttotuulipinta-ala (aukkoja ei vähennetty). Jos tämä suhde on enemmän kuin 0,6, niin silloin käytetään ehjän kannattimen vähennyskerrointa. Välikerroin määritellään kuvan 9 mukaan. (F.E.M. 1.001 3nd, 1998a, s. 28.)



Kuva 9. Välikerroin saadaan korkeuden ja kannattimien välin suhteesta a/d tai a/B . (F.E.M. 1.001 3rd, 1998a, s. 28).

$$F_1 = A * q * C_f \quad (12)$$

Yhtälössä 12 on esitetty, kuinka, tuulesta aiheutuva voima lasketaan yhdelle kannattimelle.

$$F_2 = \eta * A * q * C_f \quad (13)$$

Yhtälössä 13 on esitetty, kuinka tuulesta aiheutuva voima lasketaan toiselle kannattimelle.

$$F_n = \eta^{(\eta-1)} * A * q * C_f \quad (14)$$

Yhtälössä 14 on esitetty, kuinka tuulesta aiheutuva voima lasketaan kannattimille 3-8.

$$F_n = \eta^{(8)} * A * q * C_f \quad (15)$$

Yhtälössä 15 on esitetty, kuinka tuulesta aiheutuva voima lasketaan yhdeksännelle kannattimelle.

$$F_{total} = [1 + \eta + \eta^2 + \eta^3 + \dots + \eta^{(\eta-1)}] * A * q * C_f \quad (16)$$

Yhtälössä 16 on esitetty, kuinka kokonaistuulivoima lasketaan, kun kannattimia on enintään yhdeksän kappaletta.

$$F_{total} = [1 + \eta + \eta^2 + \eta^3 + \dots + \eta^8 + (\eta - 9)^8] * A * q * C_f \quad (17)$$

Yhtälössä 17 on esitetty, kuinka kokonaistuulivoima lasketaan, kun kannattimia on enemmän kuin yhdeksän kappaletta. (F.E.M. 1.001 3nd, 1998a, s. 29.)

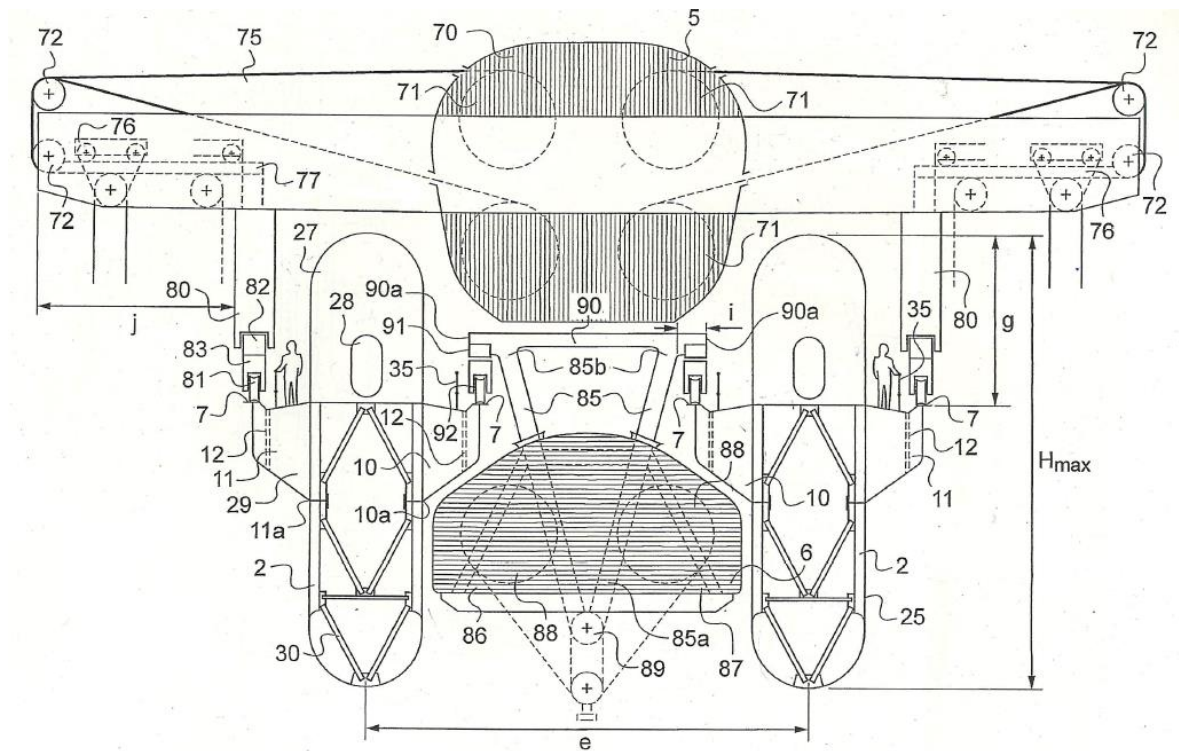
3.2 Uusi pääkannatin design

Patentissa WO 2009125127 esitetään uuden sukupolven pukkinosturi, jossa on pyritty ratkaisemaan nykyisissä nostureissa havaittuja ongelmia. Patentti ottaa kantaa koko nosturiin, mutta tässä työssä on keskitetty pääkannattimen muotoiluun ja tuulen vaikutuksen minimoimiseen. Ideat patentin mukaan sopivat kaikenkokoisille telakkapukkinostureille, jotka täyttävät seuraavat vaatimukset (Pat. WO 2009125127, 2009, s. 10):

- Nosturin korkeus 50–150 m
- Paino 2000–8000 t
- Raideväli 50–250 m
- Nostokuorma 600 t tai korkeampi

Patentti 2009125127 tuo esiin uusia ratkaisuja telakkapukkinostureiden suunnitteluun. Patentissa keskitytään nosturin uuteen muotoiluun, erityisesti pääkannattimessa sekä tuulesta aiheutuvien kuormitusten vähentämiseen. Uudella muotoilulla pyritään myös vähentämään korroosiosta aiheutuvia kustannuksia, jotka voivat olla jopa 60 % huollon kokonaiskustannuksista. Patentissa WO 2009125127 innovaationosturia on paranneltu paljon juuri tuulen avulla eli siinä on pyritty saamaan tuulen vaikutus mahdollisimman pieneksi. (Nevsimal-Weidenhoffer, 2009, s. 5.)

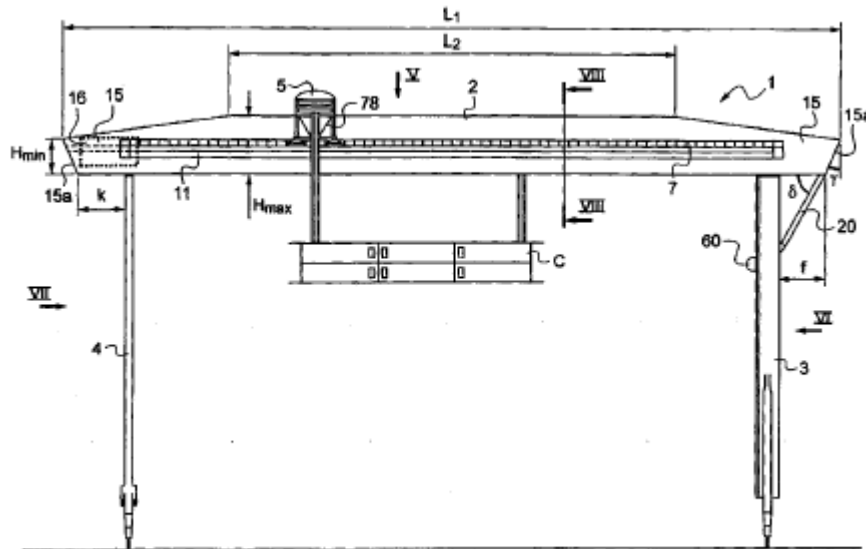
Patentissa on oletettu, että nosturista tulisi kahden pääkannattimen malli ja siinä on sivuutettu kokonaan yhden pääkannattimen tuomat mahdollisuudet. Tämä johtuu ehkä siitä, että patentin keksijällä on vahva Krupp tausta, joka valmistaa pääsääntöisesti telakkapukkinostureita kahdella pääkannattimella. Kuvassa 10 on esitetty pääkannattimen poikkileikkaus. (Pat. WO 2009125127, 2009, s. 10.)



Kuva 10. Uuden innovatiivisen telakkapukkinosturin pääkannattimen poikkileikkaus (Pat. WO 2009125127, 2009, s. 27).

Toinen syy, miksi patentissa on lähdetty tutkimaan suoraan kahta pääkannattinta, on se, että patentin omistajalla on virheellistä tietoa asiakkaisten tarpeista. Patentissa ja patenttiin viittaavissa artikkeleissa puhutaan pukkinostureilla nostettavien lohkojen suurentumisesta vuosien aikana ja tulevaisuudessa. Tämä on osittain totta, mutta asiakkailla on tullut enemmissä määrin vaatimuksia myös nosturin koukkuvälin säädeltävyydestä. Pienimmät koukkuvälit, joita halutaan nosturille, joka nostaa jopa 2000 t, on monissa kyselyissä ollut noin 13 -15 m. Siihen on käytännössä mahdotonta päästä, jos nosturissa on kaksi pääkannattinta. (Pat. WO 2009125127, 2009, s. 27; Stenholm, 2015.)

Patentin ideassa alavaunu on laitettu pääkannattimien väliin, jotta vaunusta tuleva tuulipinta-alaa saadaan piilotettua. Pääkannattinta on myös kevennetty päistä, jotta tuulipinta-alaa saadaan mahdollisimman paljon pois ja kuormitusta saadaan myös siltä osin pienennettyä (kuva 11). Pääkannattimen patentissa on arvioitu, että pääkannattimen korkeus H_{max} – H_{min} olisi 4–10 m välissä ja nousukulma 5° - 20° välillä.

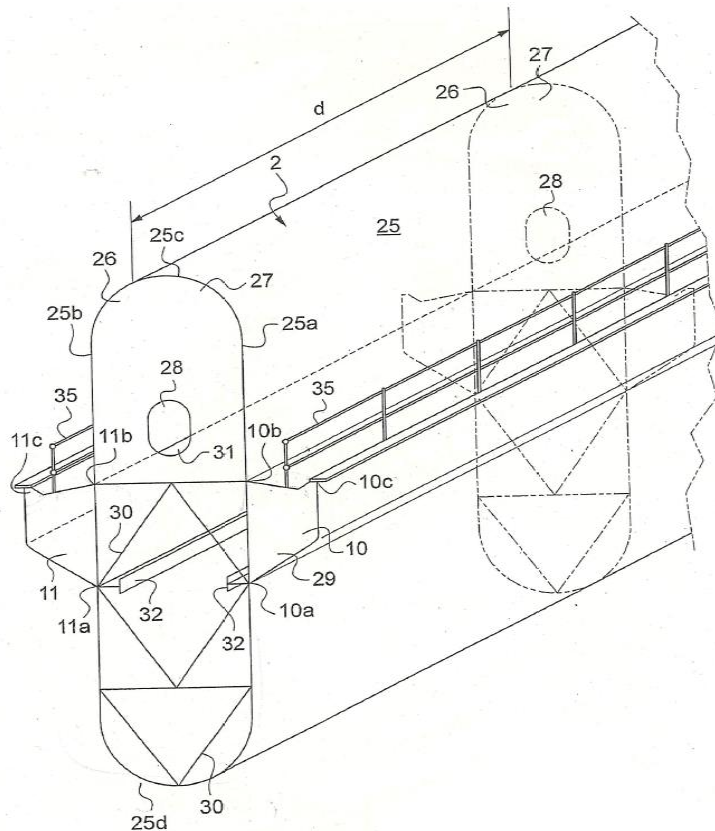


Kuva 11. Patentin WO 2009125127 mukainen telakkapukkinosturi (Pat. WO 2009125127, 2009, s. 27).

Myös tuulen vaikutusta on pyritty vähentämään pääkannattimen ylä- ja alapaarteeseen tehdyillä pyöristyksillä. Pyöristyksen säteeksi on annettu maksimissaan puolet pääkannattimen leveydestä. Pyöristyksillä pyritään myös vähentämään korroosiota, jota voi esiintyä pääkannattimessa. Pyöristysten avulla sadevedet sekä kosteudesta tuleva vesi eivät kerääny pääkannattimen päälle. Pyöreän muodon avulla vesi ei jää seisomaan vaan valuu pois. Kannattimen poikkileikkauksessa (kuva 10) on näytetty, että kannattimen päältä valuva vesi juoksetetaan kiskohyllyjen eli osien 11 ja 10 välistä putkella maahan (osa 12) Pyöristetyllä muodolla myös estetään lumen kertyminen pääkannattimen päälle. (Pat. WO 2009125127, 2009, s. 16.)

Tarkkoihin mittoihin tai levynpaksuuksiin patentti ei ota kantaa. Pääkannattimien etäisyys e tulisi olla korkeintaan H_{max} , koska näin etäisyyden ja korkeuden suhde on yksi tai se voi olla myös pienempi. Näin takana olevan pääkannattimen varjostuskerroin pitäisi jäädä riittävän pieneksi. (Pat. WO 2009125127, 2009, s. 13.)

Profiilia jäykistetään porteilla lommahduksen estämiseksi, joiden väli d ei saa olla enempää kuin H_{max} (kuva 10). Sekä ylä-, että alavaunun kiskot kulkevat hyllyillä, jotka sijaitsevat keskellä, pääkannattimen neutraaliakselilla. (Pat. WO 2009125127, 2009, s. 15.)



Kuva 12. Patentin pääkannattimen profiilia (Pat. WO 2009125127, 2009, s. 28).

Kuten kuvasta 12 näkyy, rakennetta jäykistetään myös ristikkorakenteella kannattimen sisäpuolella sekä T-jäykisteillä hyllyjen alaosissa. Patentin idea ei ota kantaa siihen, kuinka uumat tulisi jäykistää. Kuvan 10 mukaiset jäykisteet tuskin riittävät, mutta patentti muutenkaan ei ota kauheasti kantaa rakennedetaljeihin, patentissa esitetyt rakenteet ovat enemmän ideoita kuin todellisia ratkaisuja. (Pat. WO 2009125127, 2009, s. 16.)

4 LASKENNAN TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI

Jotta uutta patentin mukaista pääkannatin ideaa voidaan vertailla Konecranesin nykyiseen ratkaisuun, täytyy asiaa tutkia lähemmin oikean projektin avulla. Tässä työssä ei tuoda oikean asiakkaan tietoja julki, mutta nosturille tehdyt laskelmat on tehty Konecranes Ports:n parhaan osaamisen mukaan ja niihin laskelmiin patentin innovaatista pääkannatinratkaisua tullaan vertailemaan. Kun tuloksia vertaillaan, täytyy muistaa, että Konecranes Ports:lla on yhden pääkannattimen suunnittelusta kokemuksia aina 1970-luvulta lähtien ja kyseistä rakennetta on paranneltu sekä optimoitu vuosien varrella paljon.

Kyseisen projektin nosturi oli myös Konecranesin aikaisempiin nosturitoimituksiin verrattuna hieman erikoinen, erityisesti nosturin koon puolesta. Nosturin suuren jännevälin sekä suuren nostettavan kuorman takia pääkannattimesta tuli yhdenkin pääkannattimen mallilla niin painava, että kannattimen omasta massasta tuli suurempia jännityksiä kuin nostettavasta kuormasta. Yleensä nostettavasta kuormasta tulee selkeästi suuremmat jännitykset kuin kannattimen omasta massasta, mutta nyt asiakkaan vaatimus pitkistä jännevälillä muutti tilanteen toiseen suuntaan. Nosturi menee laivateollisuuteen ja sillä nostetaan suuria laivalohkoja. Erikoista on myös se, että nosturin ali kulkee pienempien pukkinostureiden kiskot. Osaksi tämän takia jänneväli on jouduttu venyttämään suhteellisen pitkäksi, jotta törmäystarkastelut eivät aiheuta ongelmia. Nämä pienemmät pukkinosturit nostavat vain 300 t kuormia. (Tuomainen, 2015.)

4.1 Nosturin tekniset tiedot

Nosturin kokonaiskuorma, mitä voidaan nostaa ilman rajoituksia 1200 t. Tällöin sekä ylä- että alavaunu ovat nosturin keskellä ja nostavat kummatkin 600 t. Jos vaunujen väli rajoitetaan 20 metriin, niin silloin nosturilla voidaan nostaa jopa 1500 t. Vaunujen välin rajoituksilla voidaan nosturin nostokykyä lisätä muuttamatta rakennetta. Tästä on silloin hyötyä, jos asiakkaalla on tiukat vaatimukset nostettaville kuormille ja nosturin radalle asetetut pyöräkuormarajat ovat myös erittäin tiukat. Rajoitusten avulla saadaan kevyempi nosturi tietyille kuormalle kuin, jos nosturi olisi suunniteltu rajoittamattomasti. (Tuomainen, 2015.)

Konecranesin tapauksessa nosturi on tyypillinen suuri telakkapukkinosturi, mutta suuri jänneväli tuo sen suunnitteluun omat haasteensa. Maksimikuorma on nykyajan pukkinostureille tyypillinen. Yleensä kuormatarve asiakkailla on 800 – 1500 t. Nostokorkeus on suhteellisen korkea, mutta ei vielä suurimmasta päästä. Nosturissa on ylävaunu, jossa on kaksi nostokoneistoa, jotka nostavat 500 t koukkua. Alavaunussa on myös kaksi nostokoneistoa ja ne nostavat yhdessä 750 t koukkua.

Alhaalla on listattu nosturin tärkeimpiä tietoja pääkannattimen laskentaan (Liite 1):

- Kokonaisnostokapasiteetti ilman rajoituksia 1200 t
- Jänneväli 230 m
- Pukin ajonopeus 30 m/min.
- Nosturiluokka Q2-U5=A5
- Ylävaunu
 - o Nostokapasiteetti 2 x 500 t (kaksi nostokoneistoa)
 - o Nostokorkeus 108 m.
 - o Nostonopeus 500 – 110 t; 4,5 – 9 m/min, 110 – 30 t; 9 – 18 m/min
 - o Vaununajonopeus 30 m/min
- Alavaunu.
 - o Nostokapasiteetti 750 t (kaksi nostokoneistoa)
 - o Nostokorkeus 98 m.
 - o Nostonopeus 750 – 120 t; 4,5 – 9 m/min, 120 – 30 t; 9 – 18 m/min
 - o Vaunun ajonopeus 30 m/min
 - o 50 t apunostokoneisto

Maksimikäyttötuuli tässä tapauksessa on 20 m/s ja myrskytuuli 50 m/s. Nosturin laskelmat on tehty F.E.M-normin mukaan ja vertailulaskelmat, joissa käytetään patentin WO 2009125127 ideoimaa pääkannatinta, tehdään myös kyseisen normin vaatimusten mukaan.

Laskelmat päätettiin suorittaa Finsap FEM-analysointiohjelmalla ja mallinnuksessa käytettiin palkkielementtejä. Näin siksi koska vertailulaskelmat oli tehty myös samalla laskentaohjelmalla sekä elementeillä. Näin tulokset ovat paremmin vertailukelpoisia. Laskennassa pyrittiin saamaan aikaan järkevä profiili, käyttäen patentissa WO 2009125127 esille tuotuja ideoita sekä ratkaisuja. Laskennassa keskityttiin ainoastaan

telakkapukkinosturin pääkannattimeen. Tämän takia muuta nosturia ei mallinnettu laskentaan. Laskenta suoritettiin nosturinormi F.E.M. mukaan ja sen sallimilla jännityksillä.

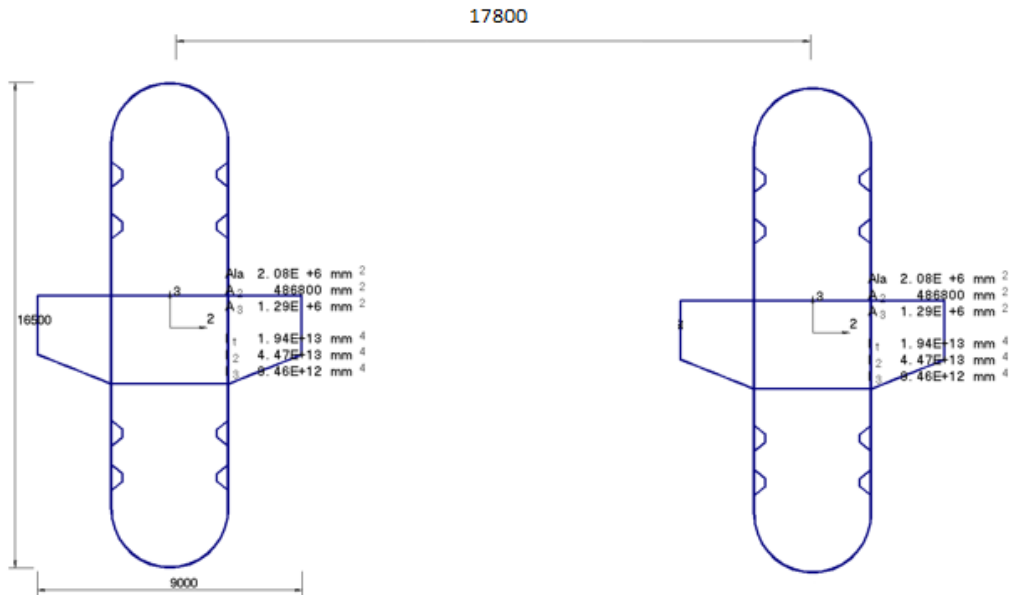
4.2 Sopivan profiilin iterointi

Konecranes Ports:lla on suhteellisen vähän kokemuksia telakkapukkinostureista, jotka on toteutettu kahdella pääkannattimella. Näin ollen ennen alustavia käsin tehtyjä laskelmia ei oikein ollut tarkkaa tietoa, mitkä tulisivat olemaan tutkittavan profiilin päämitat. Konecranesin johtavien lujuuslaskijoiden kanssa sovittiin, että pääkannattinta voidaan tutkia kaksitukisena palkkina, jonka toinen pää on nivellellisesti tuettu ja toinen jäykkä. Käsin laskennassa käytettiin tekniikan taulukkokirjan tapausta 25, joka parhaiten kuvaa kyseistä tilannetta. (Valtanen, 2007, s. 388.)

Näin saatiin selville kuinka paljon taivutusvastusta pääkannattimella suurin piirtein täytyisi olla, jotta pysyttäisiin sallituissa jännityksissä. Käsin laskennassa otettiin oma paino huomioon pienentämällä sallittua jännitystä. F.E.M. normin mukaan S355 rakenneteräkselle sallittu jännitys tapaus I:ssä on $\frac{355 \text{ MPa}}{1,5} = 237 \text{ MPa}$. Käsin laskennassa sallittu jännitys on puolitettu 120 MPa:n. Näin ollen yhdelle pääkannattimelle saatiin tarvittavaksi taivutusvastukseksi $W = 5\,510\,416\,666 \text{ mm}^3$ (Liite II). Näin pyrittiin saamaan laskentaan mahdollisimman oikeankokoinen profiili heti alussa.

Pääkannattimesta tehtiin palkkimalli Finsap laskentaohjelmalla. Patentin WO 2009125127 mukainen pääkannattimen profiilin tekeminen Finsap laskentaohjelmalla osoittautui erittäin hankalaksi sekä aikaa vieväksi. Kyseisestä ohjelmasta ei löytynyt standardipoikkileikkauksista sopivia profiilityyppejä. Jokainen laskentaan tarvittava lohkon profiili tuli tehdä erikseen. Sen jälkeen ne ajettiin Finpron kautta Finsapin lähtötietoihin. Kuvassa 13 on esitetty ensimmäisen laskelman pääkannattimen keskilohkojen profiili. Muut profiilit olivat päämitoiltaan samankokoisia, mutta levynpaksuudet olivat uumissa sekä ylä- ja alapaarteessa hieman erilaiset. Perusajatuksena oli, että jäykempää ja vahvempaa profiilia olisi pääkannattimen keskellä ja kevyempää profiilia pääkannattimen päissä. Laskentamallissa on kumpikin pääkannatin jaettu 32 lohkokoon eli yhteensä laskennassa on 64 lohkoa (Liite III). Pääkannattimen keskipisteiden etäisyydet ovat 17 800mm. Lohkojen pituudet ovat 5000 – 8000 mm, mutta nosturin keskellä on laskentaa varten tehty pari pienempää lohkoa. Näin kuormitukset on saatu laitettua oikeisiin kohtiin sillä tapaus I sekä

tapaus II kuormitukset katsotaan kolmessa eri kohdassa. Näissä tapauksissa vaunujen paikka muuttuu. Kuormitukset tarkastellaan tilanteissa, joissa vaunut ovat jäykän jalan puolella, niveljalan puolella ja keskellä pääkannatinta. Kun kuorma on keskellä pääkannatin, tulee suurimmat jännitykset rakenteeseen.



Kuva 13. Keskilohkon profiili ensimmäisessä laskennassa.

Ensimmäisissä laskelmissa, jossa käytettiin suoraan patentin WO 2009125127 ideaa puolipyöreistä ylä- ja alapaarteesta sekä ylä- ja alavaunun kiskojen lohkot olivat neutraaliakselilla, pääkannattimen kokonaispainoksi tuli noin 7000 t ja laskelmien mukaan jännitykset olivat liian suuria. Suurin ongelma profiilissa on se, että materiaali on väärässä paikassa eli neutraaliakselilla. Tätä asiaa täytyi muuttaa ja materiaalia piti siirtää oikeaan paikkaan, sekä pääkannattimen korkeutta piti myös alkuperäisestä suunnitelmasta lisätä. Lisäksi ylä- alapaarre, joka on puolipyöreä, on erittäin hankala tehdä varsinkin, kun levykentät ovat suhteellisen isoja. Näin ollen paarteiden pyöristyksiä muutettiin niin, että pyöristys tulee vain profiilin kulmiin 800 mm säteellä. Näin saadaan profiiliin muotoa, joka helpottaa tuulen aiheuttamaan kuormitusta. (Liite IV).

Lisäksi hyllyjen, joihin ylä- ja alavaunujen kiskot tulevat, paikkoja muutettiin kauemmaksi neutraaliakselilta. Näin saatiin paljon enemmän materiaalia oikeaan paikkaan ja lisättyä

taivutusvastusta (Liite III). Tällä tavalla saatiin painoltaan järkevä ja taivutusvastusta omaava profiili. Liitteessä IV on esitetty lopullisen laskelman profiilit. Laskelmissa on käytetty vain neljää profiilia. Vahvempia profiileita on keskellä pääkannatinta ja kevyempiä pääkannattimen laidoilla. Näin on saatu pääkannattimen päämitat selville ja painoarvio tarpeeksi lähelle todellista tilannetta. Optimoimalla profiileja ja lisäämällä uusia profiileja saataisiin painoa jonkin verran alaspäin.

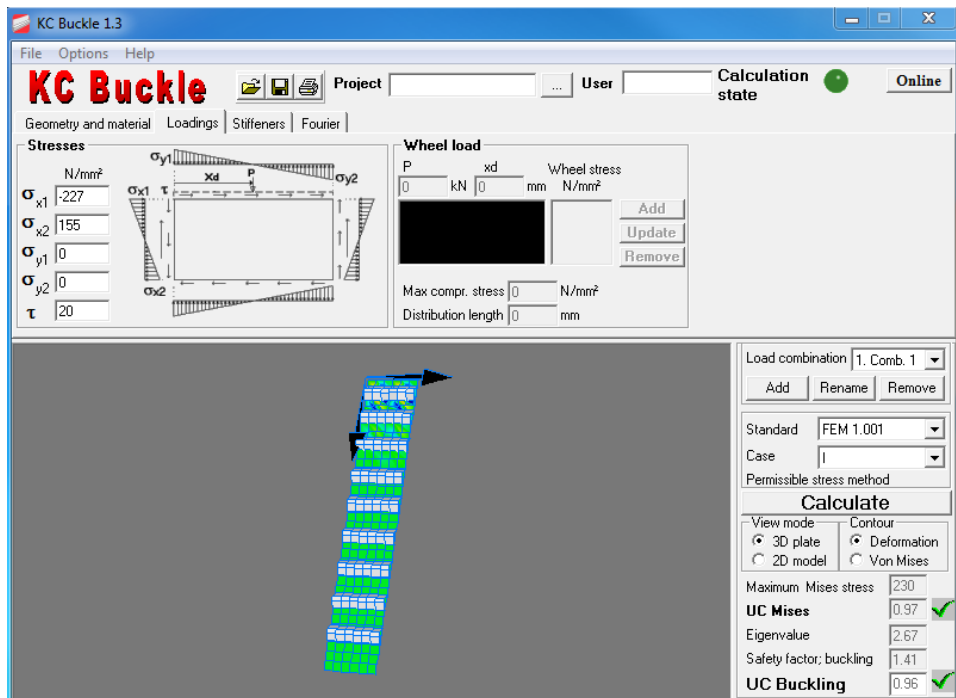
4.3 Pääkannattimen painon tarkastelu

Pääkannattimen kokonaispainoksi tuli laskennan mukaan 5088 t. Yhdellä pääkannattimella laskettuna pääkannattimen painoksi tuli 4531 t samankokoisille nostureille. Kahdella pääkannattimella tehtynä ja käyttäen hyväksi standardin WO 2009125127 ideoita, pääkannattimen painoksi tuli 12,3 % painavampi kuin nykyinen ratkaisu.

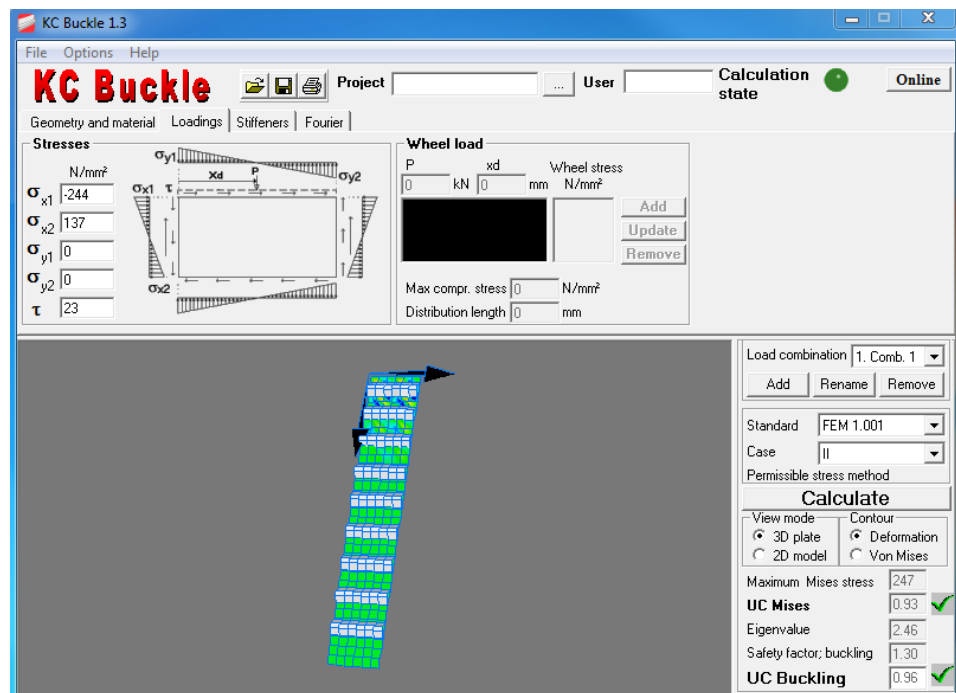
Painossa on mukana teräsrakenne, kiskot, varustelu sekä portit. Varustelu ja portit on lisätty lisämässana 840 kg/m kummallekin pääkannattimelle sekä materiaalin tiheytenä on käytetty 8000 kg/m³. Näin on pyritty ottamaan huomioon hitseistä aiheutuvat lisämässat. Liitteessä VI on esitetty painolaskelmaesimerkki nosturista yhdenpääkannattimen mallilla sekä painolaskelma uudella innovatiivisella pääkannattinratkaisulla.

4.4 Lommahdustarkastelu

Pääkannattimien uumien lommahdustarkastelu tehtiin Konecranesin omalla lommahduksen tarkasteluun tarkoitettulla laskenta ohjelmalla KC Bucklella. Jokaisessa profiilissa uumat ovat suhteellisen ohuita 25 -15 mm ja erittäin herkkiä lommahdukselle. Lommahduksen estämiseksi uumat täytyy vahvistaa. Uumat vahvistettiin trapetsijäkisteillä. Laskennassa käytetyt trapetsijäkisteet olivat jokaisessa lohossa samanlaiset ja niiden koko on U850x250x368x12. Lommahdus tarkasteltiin kaikissa profiilityypeissä ja kohdassa, johon tuli pahimmat kuormitukset. Elementti 53 oli kaikista herkin lommahdukselle (Liite V). Elementti on keskellä toista pääkannatinta, johon tapauksissa I ja II tulee kovimmat kuormitukset vaunujen ollessa keskellä pääkannatinta. Kuvissa 14 sekä 15 on esitetty KC Bucklesta saadut tulokset kyseiselle elementille.



Kuva 14. Elementin 53 lommahdus tarkastelu Case I mukaan.



Kuva 15. Elementin 53 lommahdus tarkastelu Case II mukaan.

Kaikki elementtityypit tarkasteltiin samalla tavalla ja sitä kautta saatiin oikeanlaiset jäykisteet jokaiselle lohkon uumalle. Jännitykset elementtien lommahduksen tarkasteluun saatiin Finsapilla tehdystä palkkimallista.

5 VIRTAUSANALYYSI

Konecranes, silloisen KONE Oy:n satamanosturipuoli, on tehnyt telakkapukkinosturin pääkannattimesta tuulitunnelikokeet Helsingin teknillisessä korkeakoulussa vuonna 1974. Tuulitunnelikokeessa käytetty pääkannattien pienoismalli oli tehty huomattavasti pienemmästä telakkapukkinosturista. Tämän nosturin nostokyky on 600 t. Näistä tuulitunnelikokeista saatiin tulokseksi paljon pienempiä tuulenvastuskertoimia pääkannattimelle kuin mitä FEM-normi antaa tämän tyyppiselle suorakulmaiselle palkille. FEM-normi antaa muotokertoimeksi 1,7 kun taas tuulitunnelikoe antoi muotokertoimeksi 1,3. (Fagerström, 1975, s. 13.)

Tuulitunneli kokeessa profiilia puhallettiin kolmella eri virtausnopeudella vastaten Reynoldsin lukuja $2,5 * 10^5$, $2,8 * 10^5$ sekä $3,3 * 10^5$ palkin korkeuteen referoituna. Tuulitunneli testissä huomattiin, että palkin muoto ei ole herkkä tuulennopeuden muutoksella ja jokaisella tuulen nopeudella saatiin suurin piirtein samat vastuskertoimet. (Fagerström, 1975, s. 5.)

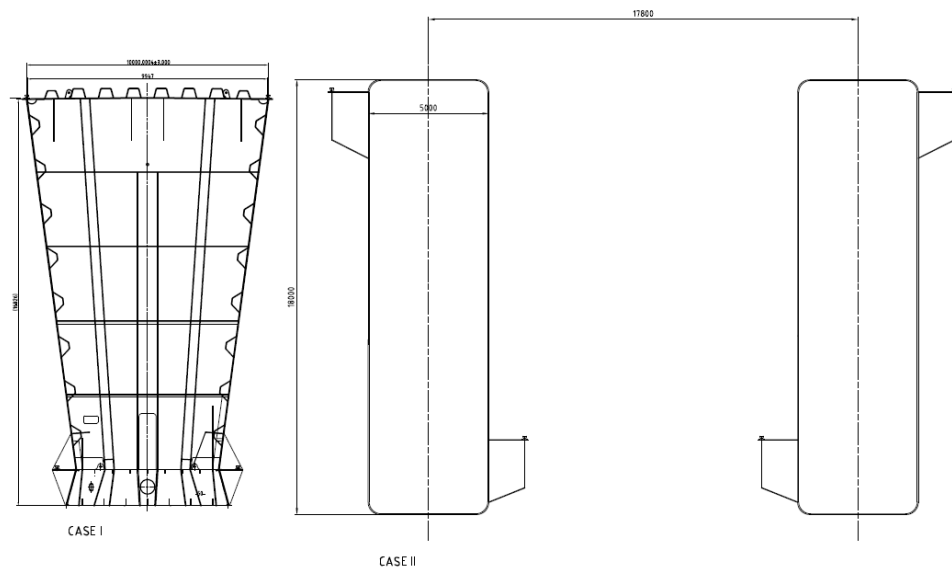
Näitä tuloksia hyväksi käyttäen on rakennelaskelmissa käytetty normista poikkeavia muotokertomia. Nosturi, jonka pienoismallia käytettiin tuulitunnelikokeessa 1974, oli kooltaan aivan eri luokkaa kuin, mitä asiakkaat ovat 2000-luvulla halunneet. Tuulitunnelin tulokset eivät tämän takia ole enää vertailukelpoisia nykyisille suurille telakkapukkinostureille. Rakennelaskelmissa käytetään nosturinormin vaatimia suurempia muotokertomia isoimmissa telakkapukkinostureissa. (Tuomainen, 2015.)

5.1 Pääkannattimen virtauslaskenta

Kuvan 16 profiileille tehtiin virtausanalyysit Lappeenrannan Teknillisessä Yliopistossa. Näin haluttiin selvittää nykyisen profiilin sekä uuden innovatiivisen pääkannattinratkaisun todelliset muotokertoimet. Varsinkin se, kuinka paljon pyöritykset auttavat tuulessa ja kuinka paljon kahden pääkannattimen mallissa taaempi pääkannattin tuo lisää tuulipinta-alaa laskentaan. Tutkimus teetettiin Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa tilaustyönä ja virtausanalyysissa käytettiin ANSYS CFX R17 ohjelmaa. Analyysi tehtiin 2D malleille ja analyysissä käytettiin kolmea eri tuulen nopeudetta 13.9 m/s, 20 m/s ja 42 m/s. Kaikki tuulen

nopeudet ovat kohtalaisen suuria vastaten navakkaa tuulta, myrskyä ja hirmumyrskyä. (Backman, Turunen-Saaresti & Ameli, 2016, s. 1.)

Analyysi tehtiin kahdella eri turbulenssimallilla $k - \varepsilon$ kaksiyhtälömallia sekä $k - \omega$ SST mallia, jotta nähdään turbulenssimallin vaikutus virtaukseen. Laskenta on tehty käyttämällä yhtä laskentahilan tarkkuutta. Näin hilasta johtuvia numeerisia virheitä ei ole arvioitu, johtuen työn nopeasta aikataulusta ja resursseista. Turbulenssimalleilla on suuri vaikutus virtaukseen tämän kaltaisissa tapauksissa. (Backman et al., 2016, s. 1.)



Kuva 16. Virtausanalyysissä käytetyt profiilit ja niiden päämitat

5.1.1 Standardi $k - \varepsilon$ -turbulenssimalli

$k - \varepsilon$ -turbulenssimalli on käytetyin teollisissa virtauslaskennoissa. Turbulenssimalli on kahden yhtälön RANS-mallin. Yleisen käytön takia tähän malliin löytyy hyvät käytännön mallinnusohjeet eri tilanteisiin. Heinon (2014, s. 12) mukaan ”Yleiseen käyttöön malli on hyvä kompromissi haluttaessa vakautta ja tarkkuutta. Erityisen hyvin malli suoriutuu vapaista virtauksista, mutta sillä on heikkoutensa virtauksissa, joissa rajakerros irtoaa, joissa on suuret pääjännitysvaihtelut, virtaus pyörii tai on kaarevia pintoja.” Mallin oletus perustuu turbulentin viskositeettin kytkeytymiseen turbulenssin kineettiseen energiaan ja dissipatioon seuraavasti:

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (18)$$

Missä ε kuvaa turbulenssin kineettisen energian dissipoitumisnopeutta, eli nopeutta, jolla liike-energia muuttuu lämmöksi. (Heino, 2014, s. 12.)

5.1.2 $k - \omega$ SST-turbulenssimalli

$k - \omega$ SST turbulenssimalli on myös paljon käytetty kahden yhtälön RANS-malli. RANS-malli on Spalding ja Launderin kehittämä turbulenssimalli, jossa on käytetty kahden yhtälön turbulenssimallia ensimmäisen kerran. Sillä voidaan laskea paljon erilaisia tilanteita ja ohjeita on helposti saatavilla. Jos halutaan vakautta ja tarkkuutta RANS-malli on hyvä yleiseen käyttöön. Mallilla voidaan ennustaa hyvin irtoamiskohta epäsuotuisilla painegradienteilla. Tätä turbulenssimallia käytetään paljon lentokoneiden analysoinnissa, koska lentokoneissa irtoamiskohdat ovat tärkeitä sakkauksen havaitsemiseen. $k - \omega$ -mallissa kytkeytyy pyörreviskositeetti turbulenssin ominaisdissipatioon $\omega = \varepsilon/k$ ja sen kineettiseen energiaan

$$v_t = \frac{k}{\omega}. \quad (19)$$

$k - \omega$ SST -turbulenssimalli eli leikkausjännityskuljetus (Shear Stress Transport) on käytetyin turbulenssimalli tällä hetkellä. Se yhdistää $k - \varepsilon$ - ja $k - \omega$ -mallin parhaat puolet ja parantaa niitä. (Heino, 2014, s. 13.)

5.2 Virtauslaskennan tulokset

Numeerisesta ratkaisusta virtauskentässä on laskettu pääkannattimien vastusvoikertoimet. Vastusvoima C_D kerroin on laskettu yhtälöllä

$$C_D = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho U^2 A_{ref}}, \quad (20)$$

missä F_x on pääkannattimeen vaikuttava x-akselin suuntaisen voima, ρ on ilman tiheys, U on tuulen nopeus ja A_{ref} on pääkannattimen otsapinta-ala. Otsapinta-ala on laskettu pääkannattimen analyysissa geometriasta tuulensuuntaa vastaan ja syvyydestä, joksi on määritelty yksi metri. (Backman et al., 2016, s. 2.)

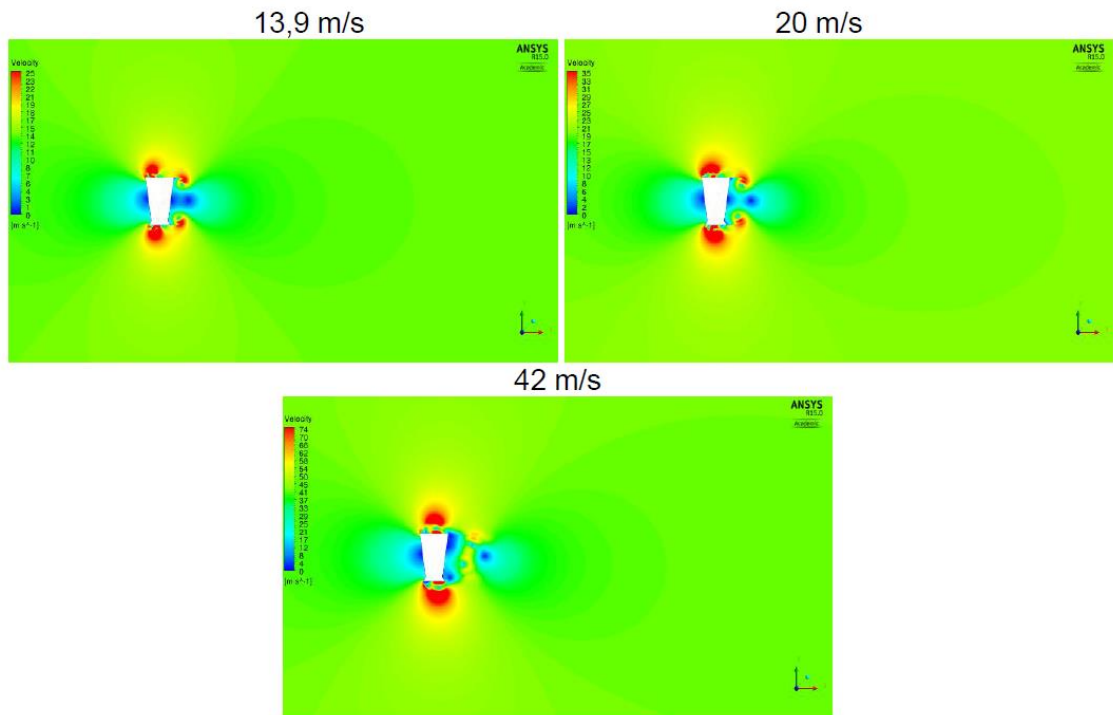
Virtausanalyysistä saadut vastusvoimakertoimet on esitetty taulukossa 10. Vastusvoimakertoimet on laskettu eri turbulenssimalleilla ja poikkeavat selvästi toisistaan ja tuloksista on vaikea päätellä kummalla geometrialla on pienempi vastusvoimakerroin, koska erot vastusvoimakertoimessa ovat eri turbulenssimalleilla suuret. Tuloksista voidaan havaita case II eli patentin mukaisella innovatiivisella pääkannattimen muodolla on stabiilimpi kerroin riippumatta turbulenssimallista tai tuulen nopeudesta virtausanalyysin mukaan. Pienemmällä nopeudella vastusvoimakerroin laskee kuitenkin merkittävästi. Tämä johtuu osittain nopeuskentän erilaisuudesta; suuremmilla nopeuksilla on nähtävissä pyörteilyä, mitä pienimmällä nopeudella ei havaita. (Backman et al., 2016, s. 2.)

Taulukko 10. Vastusvoimakertoime (Backman et al., 2016, s. 3).

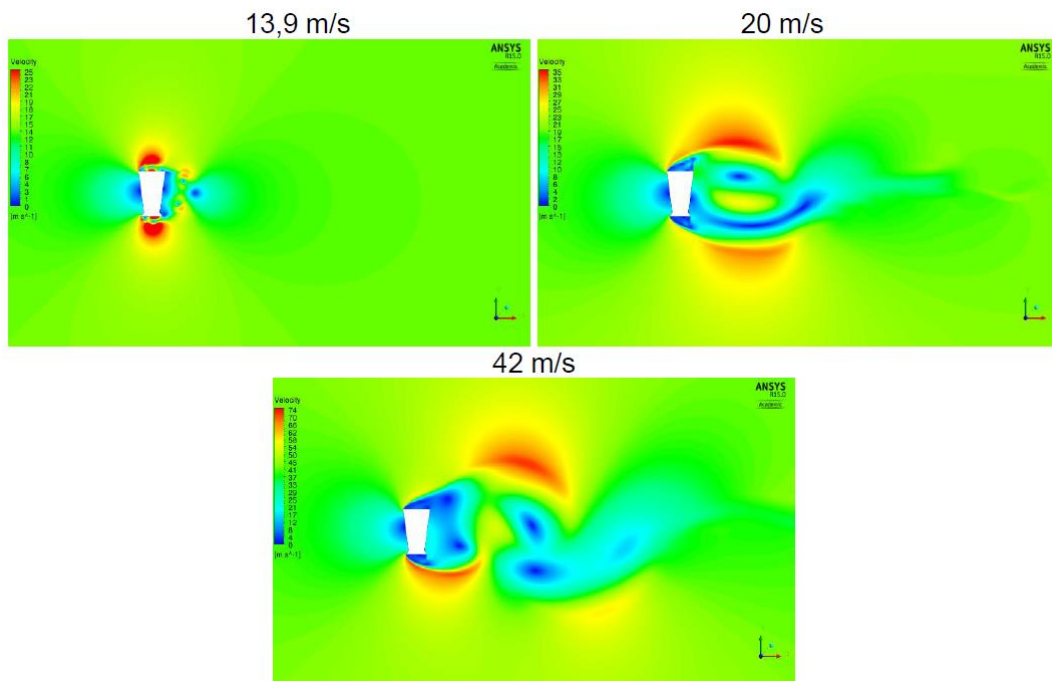
Tuulen nopeus (m/s)	$C_d(k-\varepsilon)$		$C_d(k-\omega SST)$	
	Case 1	Case2	Case 1	Case 2
13,9	1,78	2,04	1,27	1,03
20	1,41	2,02	1,70	1,61
42	3,07	2,12	2,36	1,70

Lasketut nopeuskentät Konecranesin nykyiselle pääkannattimen poikkileikkaukselle eri tuulenopeuksilla on esitetty kuvassa 17 $k - \varepsilon$ -turbulenssimalli sekä kuvassa 18 $k - \omega SST$ -turbulenssimalli. $k - \varepsilon$ -turbulenssimalli ennustaa virtauskentän hyvin samankaltaiseksi kaikilla tuulen nopeuksilla. Vanavesi suurenee tuulen nopeuden kasvaessa. $k - \omega SST$ -turbulenssimallilla voidaan todeta varsinkin virtausnopeudella 42 m/s ns. Kármán pyörteilyä pääkannattimen vanaveteen. Kármán pyörteily on epästationääriä virtauksen irtoamista kappaleesta. Pienemmällä virtausnopeuksilla niin selvää pyörteilyä ei ole havaittavissa. (Backman et al., 2016, s. 4.)

Tuloksissa on kummallakin turbulenssimallilla suuria eroja verrattuna vanhaan 1970- luvulla tehtyyn tuulitunnelikokeeseen. Ainoastaan sama vastuskerroin on saatu $k - \omega SST$ -turbulenssimallilla 13,9 m/s tuulen nopeuteen, kun taas tuulitunneli kokeissa vastuskerroin ei muuttunut tuulenopeuden funktiossa.

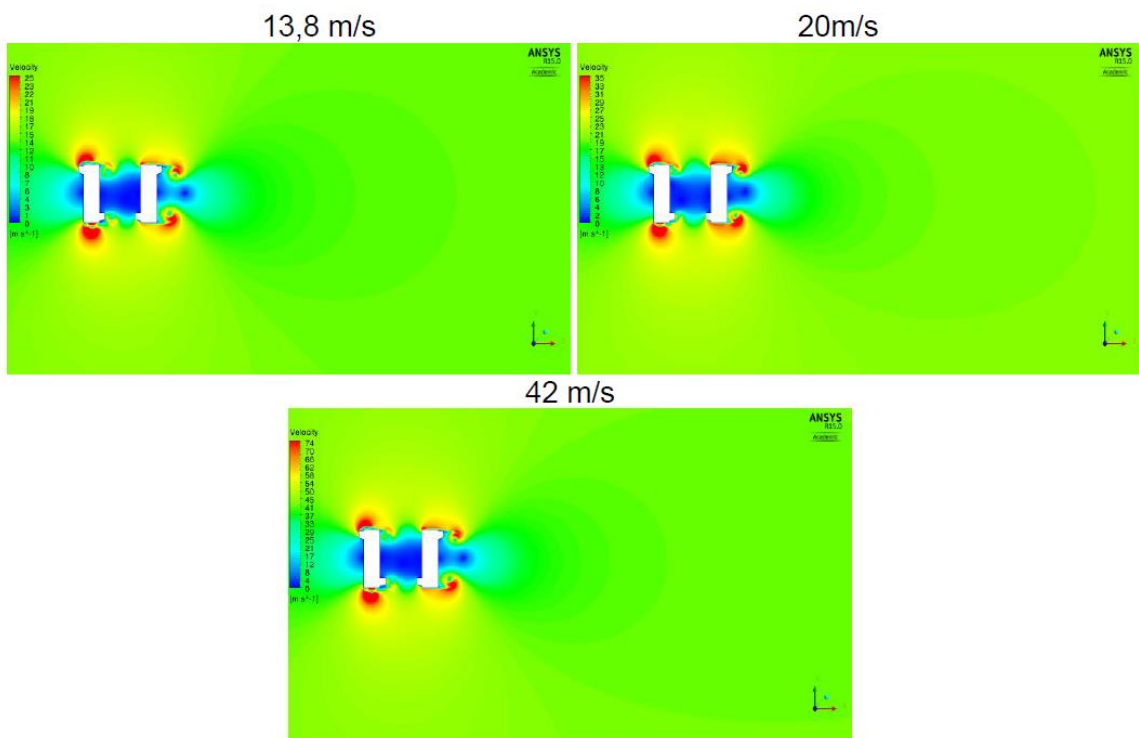


Kuva 17. Nopeuskentät Case 1 pääkannasimen ympärillä. $k - \varepsilon$ -turbulenssimalli (Backman et al., 2016, s. 4).

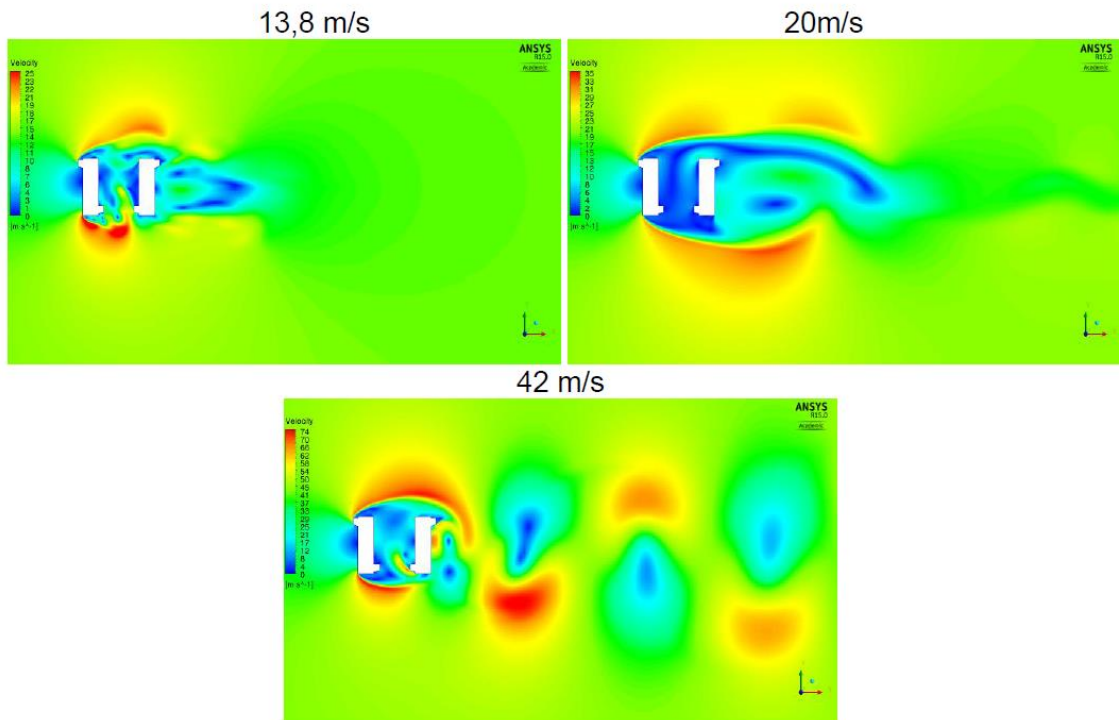


Kuva 18. Nopeuskentät Case 1 pääkannasimen ympärillä. $k - \omega$ SST -turbulenssimalli (Backman et al., 2016, s. 4).

Uuden innovatiivisen pääkannattimen virtausanalyysin nopeuskentät on esitetty kuvassa 19 $k - \varepsilon$ -turbulenssimalli sekä kuvassa 20 $k - \omega SST$ -turbulenssimalli. Tuloksista voidaan todeta, että $k - \omega SST$ -turbulenssimalli ennustaa pyörteilyä vanaveteen, jota $k - \varepsilon$ -turbulenssimallilla tehdyissä simuloinneissa ei nähdä. Tuulen nopeuden kasvaessa pyörteilyn intensiteetti kasvaa ja muuttuu suurimmalla nopeudella Kármán pyörteilyksi. Kahden pääkannattimen malliin muodostuu selvemmin pyörteilyä kuin nykyiseen Konecranesin suosimaan pääkannattimen profiiliin. (Backman et al., 2016, s. 5.)



Kuva 19. Nopeuskentät Case 2 pääkannattimen ympärillä. $k - \varepsilon$ -turbulenssimalli (Backman et al., 2016, s. 5).



Kuva 20. Nopeuskentät Case 1 pääkannasimen ympärillä. $k - \omega$ SST -turbulenssimalli (Backman et al., 2016, s. 4).

5.3 Yhteenveto virtauslaskennasta

Tuloksista voidaan havaita, että vastusvoimakertoimessa on suuria eroja turbulenssimallien ja tuulennopeuksien välillä. Tuloksista havaittiin, että vastusvoimakertoimien arvoissa on suuria eroja eri turbulenssimalleilla. Lisäksi havaittiin, että Case 2:lla virtaus on epästationääriä ja pääkannattimen taakse muodostuu von Kármán pyörteilyä etenkin suurilla tuulen nopeuksilla. Virtauslaskenta on kuitenkin tehty käyttäen stationääristä laskentaa ja se ei ota huomioon epästationäärisiä ilmiöitä. Todellisuudessa Kármán pyörteet aiheuttavat epästationäärisiä voimia rakenteeseen. Stationääristä laskennasta ei saa laskettua voimien muutoksia, joten voimien suuruutta ja merkitystä ei ole voitu arvioida. Tämä vaikuttaa myös vastusvoimakertoimen laskentaan ja luotettavuuteen.

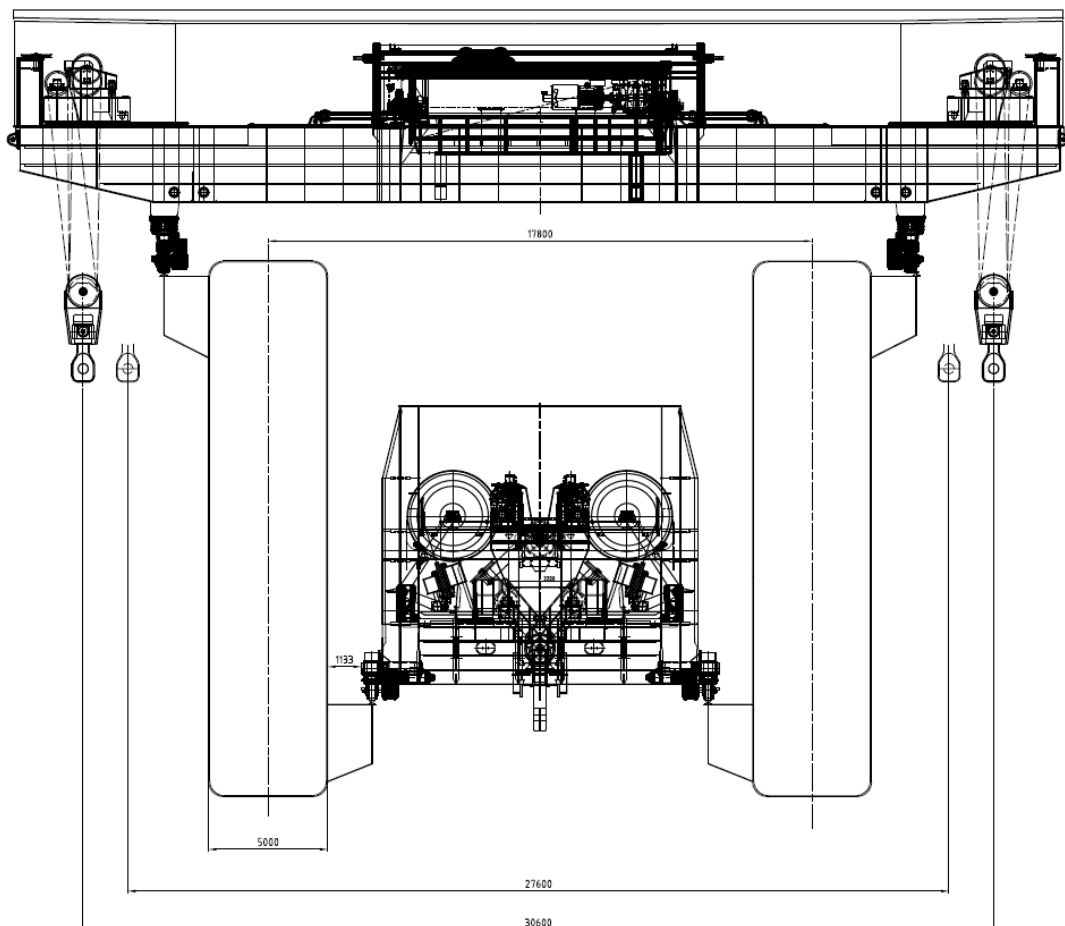
Kahdella pääkannattimella ja innovatiivisella muotoilulla vastuskertoimet eivät muutu niin paljon laskelmien mukaan kuin perinteisessä yhdenpääkannattimen profiilissa. Tuulitunnelikokeen tulokset, joita voidaan pitää vertailukelpoisina, koska tuulitunnelikoe on kuitenkin tehty pienoismallille ja pääkannattimen profiilin suhteet ovat pysyneet kutakuinkin samoina näihin päiviin asti. Virtausanalyysin mukaan nykyinen profiili olisi

herkkä tuulennopeuden muutokselle ja näin ollen vastusvoimakertoimen kasvaksi, kun taas tuulitunnelikokeet osoittivat juuri päinvastaisen tuloksen herkkyyden suhteen. Tämä voidaan selittää kuitenkin virtausanalyysin epätarkkuutena. Myöskään tuulitunnelikokeessa ei havaittu von Kármán pyörteilyä.

Virtaus analyysin mukaan innovatiivisen muotoilu yhdessä kahden pääkannattimen kanssa pitää tuulen vastuskertoimen stabiilina, mutta ei kuitenkaan selvästi pienennä vastuskerrointa verrattuna nykyiseen pääkannatin ratkaisuun. Jotta saataisiin tarkempia tuloksia, tulisi profiileille suorittaa vielä tuulitunneli kokeet. EN13001-2 normissa on annettu tuulen vastuskerroin pyöristetyle neliö profiilille.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Lopulliseksi vertailuprofiiliksi muotoutui kuvan 20 mukainen pääkannatin ratkaisu, jossa alavaunu on tuotu pääkannattajien väliin. Kiskojen hyllyt, joilla vaunu liikkuu, on tuotu pääkannattajien uuman alalaitaan. Ylävaunu kulkee ylähyllyillä, jotka on sijoitettu pääkannattimien ulkopuolisten uumien ylälaittaan. Alkuperäinen patentin idea oli sijoittaa kumpikin hylly profiilin neutraali akselilla, mutta se olisi johtanut paljon painavampaan ratkaisuun. Nyt hyllyt on sijoitettu kauemmaksi neutraaliakselista ja profiilin taivutusvastus paljon on suurempi ja näin on saatu kevyempi rakenne.



Kuva 21. Poikkileikkaus tarkastellusta pääkannattimesta.

Kuten kuvassa 20 on näytetty, tutkittavassa mallissa nosturin alavaunu tulee pääkannattimien väliin, jotta se ei aiheuttaisi lisä tuulipinta-alaa nosturiin. Tämä hyöty jää suuressa kokonaisuudessa varsin pieneksi, sillä alavaunulle ja ylävaunulle F.E.M-normi sallii käyttämään 1,1 muotokerrointa laskennassa ja muutenkin alavaunu pinta-ala koko nosturissa on varsin vähäinen. Alavaunun sijoittaminen pääkannattimien väliin seuraa myös se, että pääkannattimen ovat suhteellisen kaukana toisistaan. Mikä lisää ylävaunun painoa verrattuna Konecranesin nykyiseen ratkaisuun. Lujuuslaskelmissa ylävaununpainon kasvu otettiin huomioon.

Pääkannattimen korkeus ei muuttunut tutkittavassa mallissa verrattuna esimerkkitapaukselle tehdylle esisuunnitellulle pääkannattielle. Kummassakin tapauksessa pääkannattimen korkeus on noin 18 metriä. Näin ollen kahdella pääkannattimella tehty nosturi ei näytä tuottavan pinta-ala hyötyä lujuuslaskennassa. Varsinkin tällaisessa tapauksessa, jossa nosturin jänneväli on niin suuri, että nosturin pääkannattimen oma massa aiheuttaa suurempia jännityksiä kuin nostettava kuorma.

Virtausanalyysin mukaan uuden innovatiivisen telakkapukkinosturin pyöritykset eivät tuoneet selvää hyötyä tuulikuormituksessa. Uudella pääkannatin mallilla tuulenvastuskerroin ei muuttunut tuulen muuttuessa. Näin ollen voidaan olettaa, että profiili ei ole herkkä tuulen vaihtelulle. Kun taas Konecranesin nykyinen pääkannatin profiili olisi virtausanalyysin mukaan herkkä tuulen vaihtelulle ja näin vastuskerroin nousee tuulen nopeuden funktiossa. Tosin Konecranesin teettämät tuulitunneli kokeet 1970-luvulta saman tyyppiselle profiilille osoittivat, että profiili ei ole herkkä tuulen nopeuden suhteen vaan muotokerroin pysyy samana tuulesta riippumatta.

Virtausanalyysistä saatujen muotokertoimien suuri vaihtelu johtuu suurimmalla nopeudelle vanavedestä, joka on suurella todennäköisyydellä epästationäärinen. Näin ollen muotokerroin vaihtelisi ajan suhteen. Virtausanalyysi ei ota tätä huomioon ja tulokset ovat todennäköisesti konvertoituneet tilanteessa, jossa tuuli on suuri ja ajansuhteen keskiarvoitettu arvo olisikin pienempi. Virtausanalyysi laskenta on stationäärinen ja tätä tulosta sieltä ei saada.

Kun tarkastellaan tunnettuja nosturi normeja kuten British Standard, DIN, F.E.M-normia tai uutta EN-15011 nosturinormia, jossa on annettu nosturin suunnitteluun ja laskentaan vaatimuksia. Missään normissa tai standardissa tuulen vastuskerroin, jota käytetään nosturin rakenteiden lujuuslaskennassa, ei muutu tuulen nopeuden mukaan, vaan pysyy vakiona määräytyen toki profiilin muodosta.

Jos tarkastellaan kuinka paljon pyöritykset auttavat pienentämään pääkannattimen profiilin muotokerrointa, voidaan tarkastella EN-13001-2, jossa neliöprofiililla on vastaavanlaiset pyöritykset, normissa suositellaan käyttämään muotokertoimena 1,5. Tietenkin normien ja standardien suosituksissa on varmuutta mukana, mutta nämä EN-13001-2 neliö profiili jo osoittaa, että pyöritykset eivät tuota suurta hyötyä ja lisäksi täytyy ottaa huomioon myös varjostus kerroin, jos profiileja on kaksi peräkkäin. Näin ollen muotokerroin menisi saman lähelle muotokerrointa kuin nykyisellä pääkannattimen profiililla, varsinkin silloin, kun profiilien korkeus pysyy samassa luokassa.

Painotarkastelussa huomattiin jo, että kahden pääkannattimen telakkapukkinosturissa tulee noin 12,3 % painavampi kuin yhdellä pääkannattimella tehty nosturi. Tämä on hyvin linjassa Konecranesin satamanosturipuolen lujuuslaskijoiden näkemyksiin, jotta kahden pääkannattimen nosturista tulee noin 10–20 % painavampi kuin yhden pääkannattimen nosturista. Tämä lisää nosturivalmistajan kustannuksia sekä aiheuttaa kovemmat vaatimukset nosturiradan suunnitteluun, kun nosturin pyöräkuormat kasvavat. Tämä lisää myös kustannuksia asiakkaan puolella, kun nosturin radasta on tehtävä vahvempi.

Pääkannattimen painon nousulla on myös selvä vaikutus nosturin muiden osien suunnitteluun. Pääkannatin on suurin yksittäinen rakenne telakkapukkinosturissa, jos sen paino nousee nosturin jalkoja joudutaan mitä todennäköisemmin vahvistamaan. Myös voimat hätäjarrutuksessa sekä puskureille ajossa todennäköisesti kasvavat, kun liikkuva massa on suurempi.

Pääkannattimen painonnousu aiheuttaa lisävaatimuksia myös nosturin telien suunnitteluun. Pyöräkuormat nousevat, josta seuraa joko pyörien lisääminen tai pyörä koon kasvattaminen. Myös vetävien pyörien lukumäärää voi joutua lisäämään. Tämä tarkoittaa lisää nostokoneistoja tai suurempia vaihteita, moottoreita, kytkimiä sekä jarruja.

Asiakkaiden näkökulmasta patentin ideassa on yksi erittäin paha epäkohta. Ylävaunun koukkuväli on minimissäänkin erittäin suuri noin 28 metriä. Konecranesin asiakkailta saamasta palautteesta monet ovat vaatineet paljon pienempää koukkuväliä. Tämä on ollut yleinen trendi asiakkaiden keskuudessa. Tyypillinen haluttu koukkuväli on 15 m ja yleensä Konecranesin nostureissa koukkuväliä voi säätää 15 ja 18 metrin välissä.

Konecranesille nostureiden laatu ja varsinkin valmistuksen laatu on erittäin tärkeää. Tällä voidaan erottautua kilpailijoista. Hyvin tehty ja toteutettu suunnittelu auttaa välttämään valmistuksessa tulevia ongelmia ja virheitä. Sen takia monesti tutut ratkaisut ovat suosittuja suurissa nostureissa ja projekteissa. Jos pääkannatin tehtäisiin pyöristyksiä ne todennäköisesti lisäävät kustannuksia valmistuksessa verrattuna nykyiseen ratkaisuun. Suurien ja paksujen ylä- ja alapaarteiden pyöristys on yksi hankala lisä valmistuksessa ja aiheuttaa todennäköisesti aikataulu ja valmistus ongelmia. Lisäksi kahden pääkannattimen valmistuksessa on enemmän työtä kuin yhden pääkannattimen valmistuksessa, enemmän hitsausta ja osien yhteensovittamista. Tämä lisää aina valmistusvirheiden mahdollisuutta. Varsinkin sellaisessa tapauksessa, jossa joudutaan turvautumaan alihankkijaan, jolla ei ole suurta kokemusta suurien telakkapukkinostureiden valmistuksesta ja niiden vaatimuksista.

Valmistuksen näkökulmasta uusi innovatiivinen telakkapukkinosturin pääkannattimen muotoilu tuo selvästi lisä haastetta. Innovatiivinen nosturin pääkannatin tulisi jo painonsa puolestakin kalliimmaksi rakentaa kuin Konecranesin nykyinen ratkaisu. Paino on suoraan verrannollinen pääkannattimen lopulliseen hintaan. Varsinkin silloin, kun nostureita valmistetaan halvan työn maissa kuten Kiinassa.

Lisäksi on otettava huomioon, että patentin mukainen pääkannattimen profiili on paljon herkempi väännön aiheuttamalla rasitukselle kuin Konecranesin nykyisin käyttämä profiili. Nykyiseen profiiliin tulee oikeataan vain taivutusta, kun taas tutkittavaan profiiliin tulee lisäksi vääntöä. Tämä aiheuttaa kiertymää pääkannattimeen varsinkin silloin, kun vaunut ovat eri paikoissa. Lisäksi kummatkin pääkannattimen liikkuvat erillisillä hyllyillä eikä voimia voida ohjata suoraan pääkannattimen uumille ja pyöräkuormat aiheuttavat lisä taivutusjännitystä pääkannattajalle.

Patentin mukainen profiili on myös herkkä vinoutumiselle. Patentin mukaisessa sekä tavallisessa kahdenpääkannattimen mallissa vinoutuminen on jatkuvasti läsnä. Erityisesti tutkittavan profiilin pyöritykset takia, joilla pyritään pienentämään vastustuskerrointa pääkannattimessa, on profiileihin suunniteltu erilliset hyllyt sekä ylä- että alavaunulle. Näin pyörä kuormita tulee suurempi vääntö palkkiin kuin profiilissa, jossa kiskolinjat olisivat uumien kohdilla.

Korroosiota vastaan saadaan hyötyjä pyörityksillä. Nykyisessä Konecranesin telakkapukkinostureissa vesi jää helposti seisomaan pääkannattajien yläpaarten päälle. Jotta vesi saataisiin pois, on sille rakennettu erilliset veden poisto putket. Innovatiivisessa telakkapukkinosturissa tätä ongelmaa ei olisi. Sileäpinta ja pyöritykset estäisivät veden seisomisen pääkannattajien päällä. Myöskään lumi ei pääsisi niin helposti kertymään pääkannattajan päälle.

7 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli verrata telakkapukkinostureiden kahden merkittävän pääkannatin ratkaisun eroja keskenään sekä tutkia, mitä hyötyjä uusi innovatiivinen pääkannatin ratkaisu toisi telakkapukkinosturiin. Erityisesti työssä keskityttiin innovatiivisen telakkapukkinosturin pääkannatin ratkaisuun sekä erityisesti kuinka muotokerrointa, kun lasketaan tuulesta aiheutuvia voimia, voisi pienentää.

Innovatiivisen telakkapukkinosturin patentissa muotokerrointa pyrittiin pienentämään lähinnä pyörityksillä sekä alavaunun sijoittamisella pääkannattimien väliin. Tämä tarkoitti sitä, että innovatiivinen telakkapukkinosturi tulisi tehdä kahdella pääkannattimella. Konecranesilla pääsääntöisesti suuret telakkapukkinosturit toteutetaan yhdellä pääkannattimella. Patentissa ei esitetty suoraan, mihin muotokerroin muuttuisi, jos käytettäisiin pyörityksiä. Ainoastaan esitettiin oletamus, että se tulee pienenevän. Virtasanalyysia ja käytettävissä olevien nosturi normien avulla ei havaittu selvää hyötyä uudesta innovatiivisesta telakkapukkinosturin pääkannatinratkaisusta.

Virtausanalyysin luotettavuuden takia ja lopullisen muotokertoimen varmistamiseksi ainoa oikea ratkaisu olisi tehdä kummallekin profiilille virtauskokeet tuulitunnelissa. Näin saataisiin luotettavia tuloksia muotokertoimista. Tämän hetkinen tarkastelu kuitenkin osoittaa, että innovatiivinen telakkapukkinosturin pääkannatin ei ole kilpailukykyinen ominaisuuksiltaan Konecranesin nykyiseen ratkaisuun verrattuna eikä edes kustannustehokas. Pääkannattimen painon tarkastelussa on kuitenkin otettava huomioon, että Konecranesilla on pitkä historia nykyisen pääkannattimen kehityksessä ja laskennassa. Näin ollen pääkannatin on loppuun asti optimoitu. Sen takia painon vertaus ei ole tasapuolinen tässä työssä.

Tarkemmassa vertailussa rakenteiden mekaaninen toimivuus tuli ottaa tarkasteluun. Rasiuksissa erityisesti vinoutuminen on kotelorakenteissa tärkeää ja se voisi tuoda tuulivaikutusta merkittävämmän eron näiden vaihtoehtojen välille, yksi-koteloisen vaihtoehdon hyväksi.

LÄHTEET

Ahlfors, M. 2014. Kotelopuomin pään muotoilu vinoutumista ja vääntöä vastaan. Lappeenranta: University of Technology; LUT Mechanical. 20 s.

Backman, J. Turunen-Saaresti, T, & Ameli, A. 2016. Satamanosturin pääkannattinpalkin virtauslaskenta. Lappeenranta: University of Technology; School of Energy System. 5 s.

F.E.M. 1.001 3nd. 1998a. Rules for the design of the hoisting appliances – Booklet 2: Classification and loading on structures and mechanisms. Pariisi: European Handling Federation. 62 s.

F.E.M. 1.001 3nd. 1998b. Rules for the design of the hoisting appliances – Booklet 3: Calculating the stresses in structures. Pariisi: European Handling Federation. 76 s.

F.E.M. 1.001 3nd. 1998c. Rules for the design of the hoisting appliances – Booklet 8: Test loads and tolerances. Pariisi: European Handling Federation. 16 s.

Fagerström, B. 1974. Pukkinosturin Palkin Tuulitunnelikoe. Helsinki: Helsingin teknillinen korkeakoulu; Aerodynaaminen laboratorio. 20s.

Heino, A. 2014. Monijaksopumpun Transientti Laskenta. Tampere: Tampereen Teknillinen Yliopisto; Konetekniikan koulutusohjelma. 56 s.

Konecranes. 2012. Smarter Where it Matters: Offering for the shipbuilding industry [verkkodokumentti]. Julkaisu 2012, päivitetty 23.8.2012. [Viitattu 18.6.2015]. Saatavissa: <http://konecranes.smartpage.fi/en/2012/shipyardbook/>

Krupp. 1980. Giant Gantry Cranes. Essen: Krupp Industrie – und Stahlbau. 15 s.

Nevsimal-Weidenhoffer, V. 2009. Goliath Cranes: Major tool the shipbuilding & offshore industries (Trends for 2nd Generation). Singapore: Intercrane Pte. Ltd. 10 s.

Pat. WO 2009125127. 2009. Giant Gantry. Taiyuan Heavy Industry Co. Ltd, Taiyuan: Kiina. (Nevsimal-Weidenhoffer, V.) Julk. 15.10.2009. 32s.

Pennala, E. 2000. Lujuusopin perusteet. 11. Painos. Helsinki: Hakapaino Oy. 400 s.

Stenholm, K. 2015. Diplomi-insinööri; Chief Design Engineer, Port Cranes Tech MC&Structures, Konecranes Finland Co. Haastattelu työpaikalla 15.07.2015. Haastattelijana Henri Rautajärvi. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

Tuomainen, J 2015. Diplomi-insinööri; Structural Engineer, Port Cranes Tech MC&Structures, Konecranes Finland Co. Haastattelu työpaikalla 08.09.2015. Haastattelijana Henri Rautajärvi. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

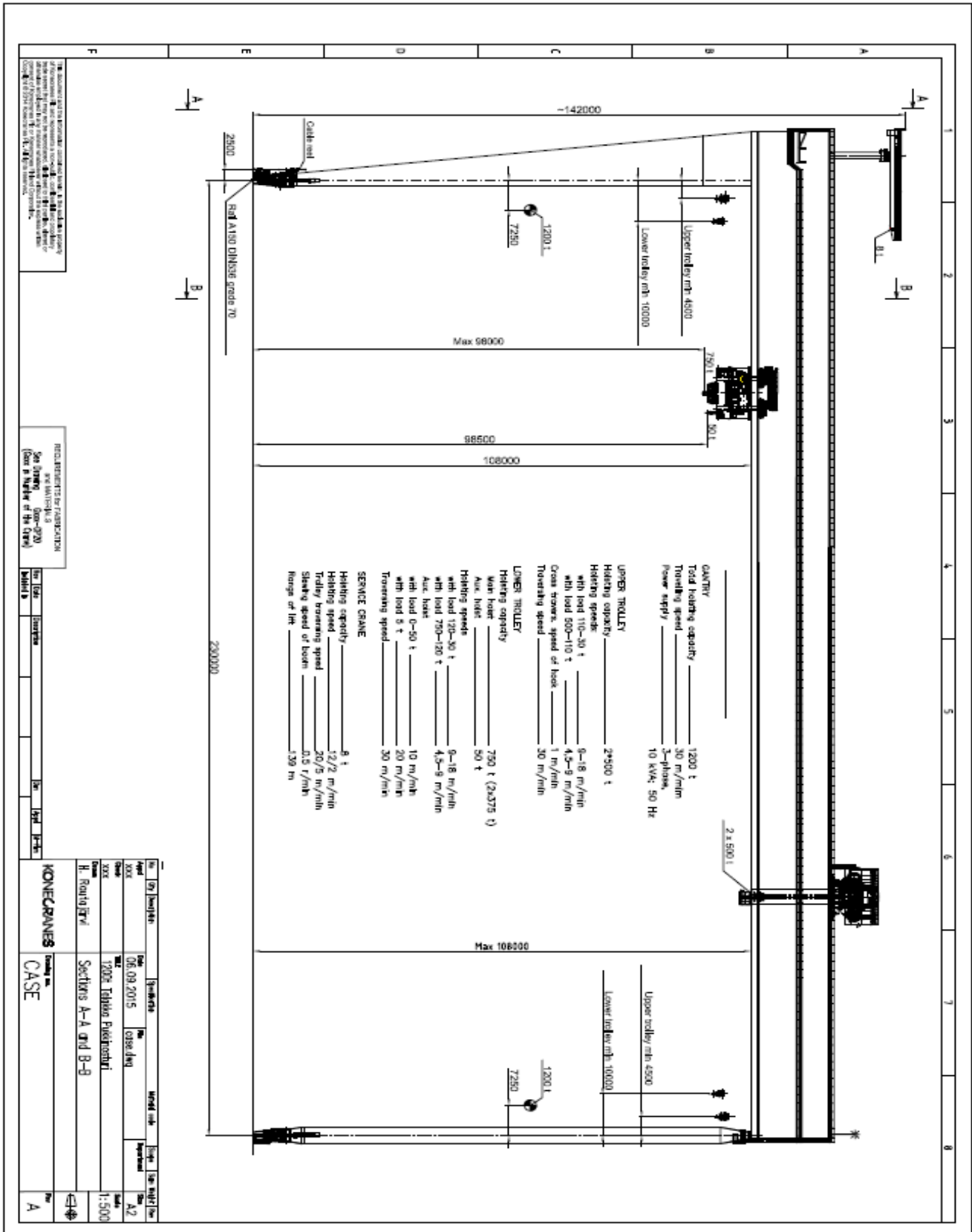
Vainio, A. 2015. Diplomi-insinööri; Chief Mechanical Engineer, Shipyard Cranes, Konecranes Finland Co. Haastattelu työpaikalla 02.09.2015. Haastattelijana Henri Rautajärvi. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

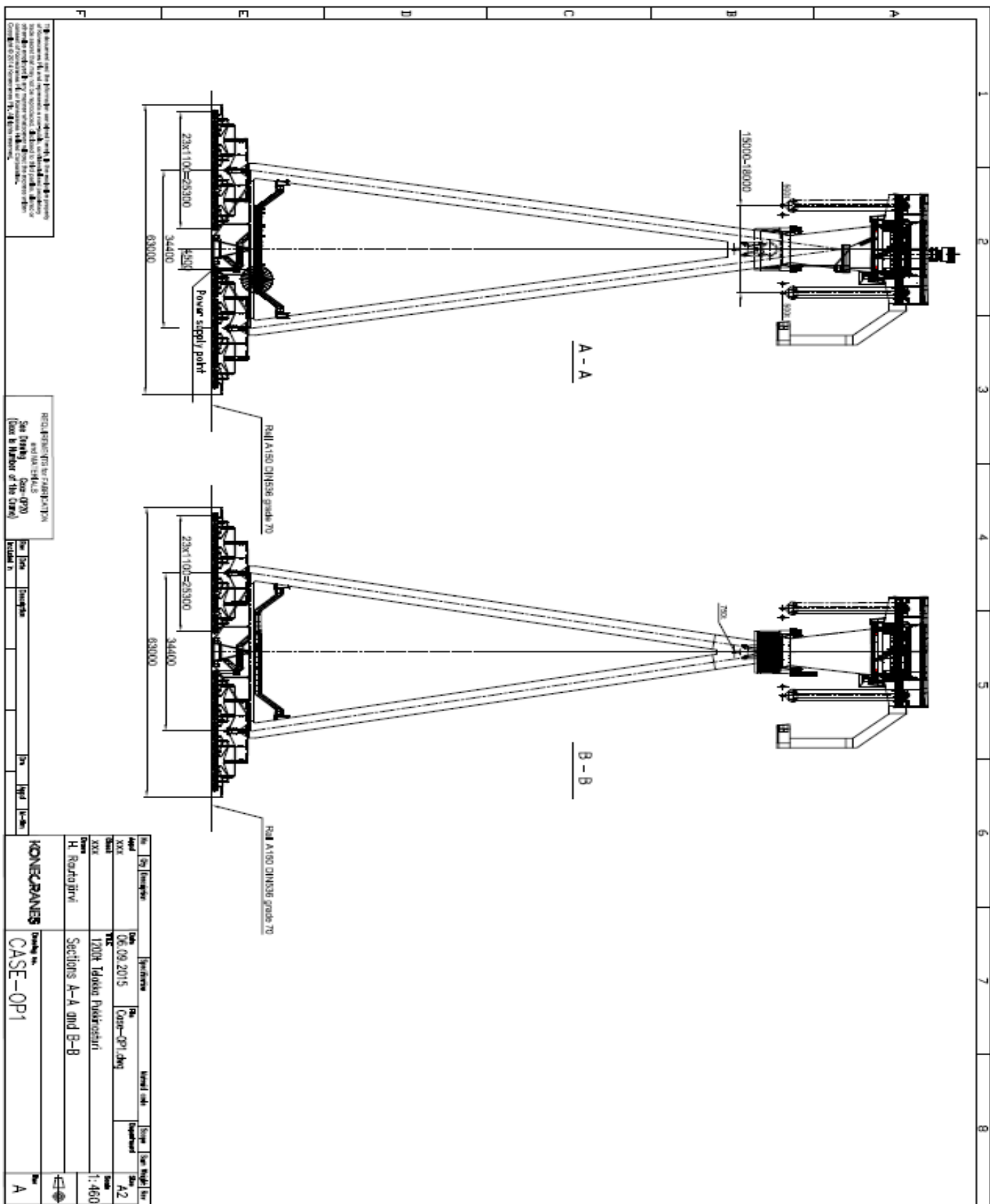
Valtanen, E. 2007. Tekniikan taulukkokirja. 15. Painos. Jyväskylä: Gummerus kirjapaino Oy. 1037 s.

Verschoof, J. 1999. Cranes: Design, Practice, and Maintenance. 1. Painos. Lontoo: Professional Engineering Publishing. 302 s.

Ylinen, A. 1970. Kimmo- ja lujuusoppi II. Porvoo: Werner Söderström osakeyhtiö. 1010 s.

Case nosturin pääkuvat.





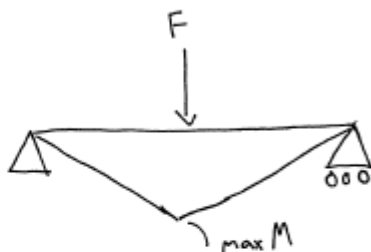
• The dimensions of the structure and the weight, B, are subject to the provisions of the technical specifications. The dimensions of the structure and the weight, B, are subject to the provisions of the technical specifications. The dimensions of the structure and the weight, B, are subject to the provisions of the technical specifications.

REQ. COMMENTS FOR CONSTRUCTION
See Part 1, Item 0710
(see the number of the crane)

Item	Qty	Weight	Item	Qty	Weight
1	1		1	1	

KONECRANES		Drawing No.		Case-0p1		Rev. A	
Rev.	Qty	Weight	Date	Rev.	Date	Weight	Rev. Qty
XXX			08.09.2015	Case-0p1	08/09		42
XXX							
Drawn	H. Rautio/THV		Sections A-A and B-B		Scale		1:400

Karkea käsin laskenta.



$$L = 230 \text{ m}$$

$$F = 2300 \text{ t (kuorma + vaunut)}$$

$$\max M = \frac{FL}{4} = \frac{23\,000\,000 \text{ N} \cdot 230 \text{ m}}{4} = 1\,322\,500\,000 \text{ Nm}$$

$\sigma_{\text{sall}} = 120 \text{ MPa} \rightarrow$ Pienennetty FEM:n sallitusta, jotta saadaan oma paino mukaan.

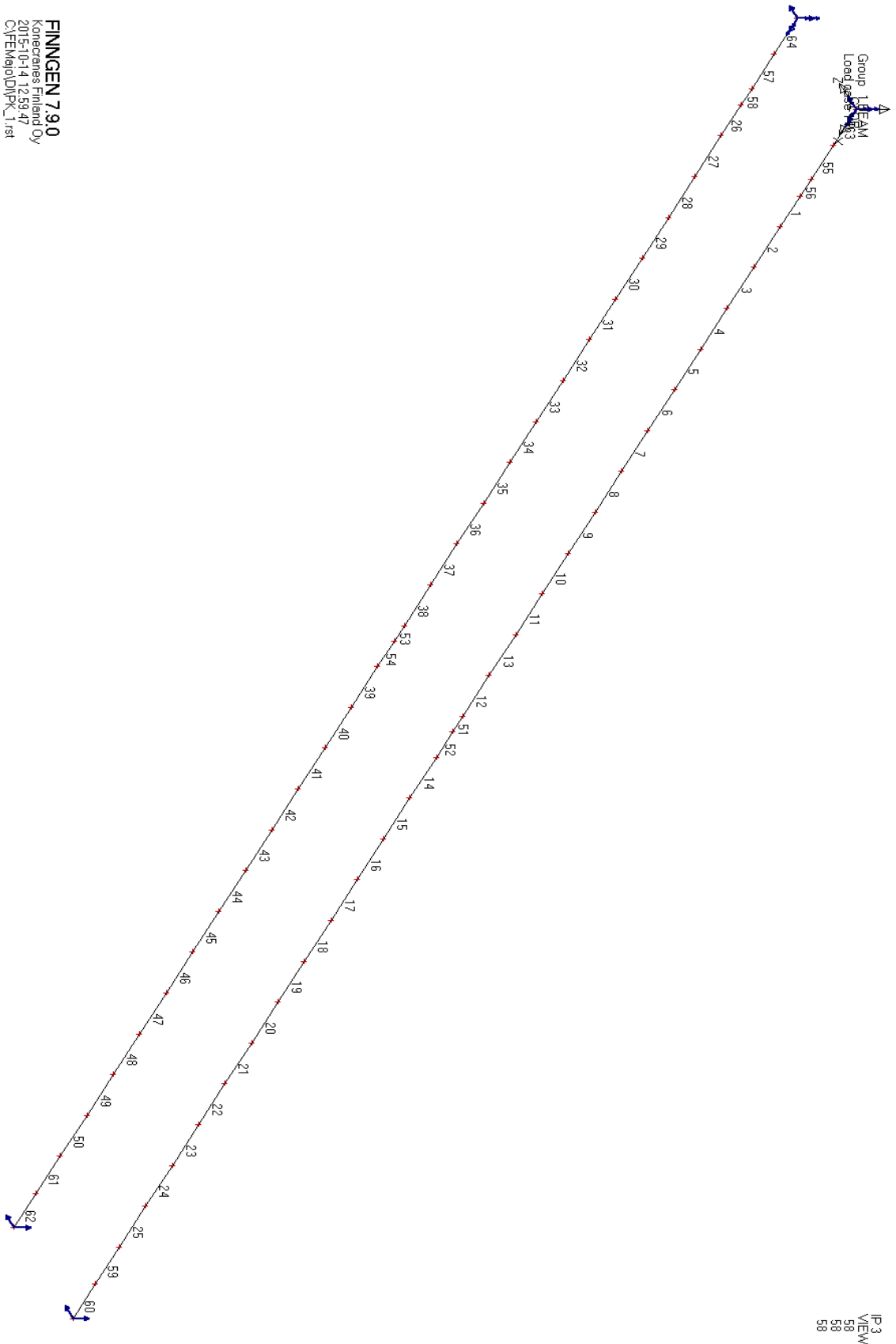
$$\sigma_t = \frac{M}{W}$$

$$\rightarrow W_{\text{tot}} = \frac{M}{\sigma_{\text{sall}}} = \frac{1\,322\,500\,000 \text{ Nm}}{120 \text{ N/mm}^2} \rightarrow 11\,020\,833\,333 \text{ mm}^3$$

Pääkattajimia on 2 kpl

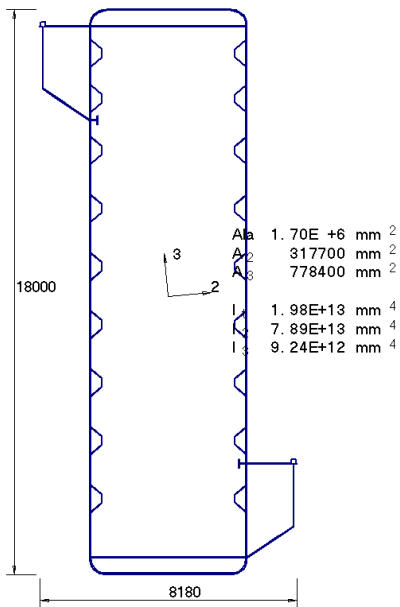
$$\rightarrow \frac{W_{\text{tot}}}{2} = \underline{\underline{5\,510\,416\,666 \text{ mm}^3}}$$

Pääkannattimen lohkot.

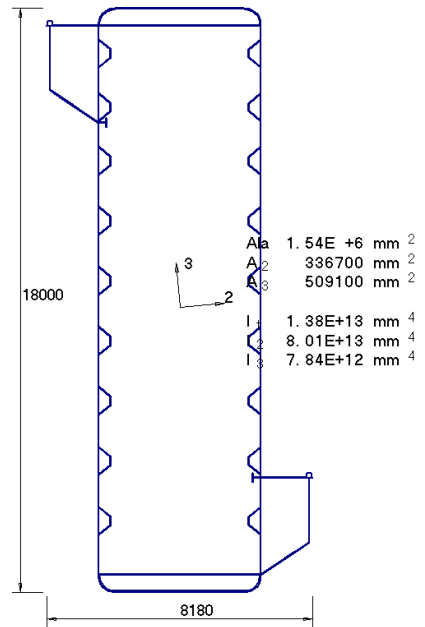


Pääkannattimen profiilit laskennassa.

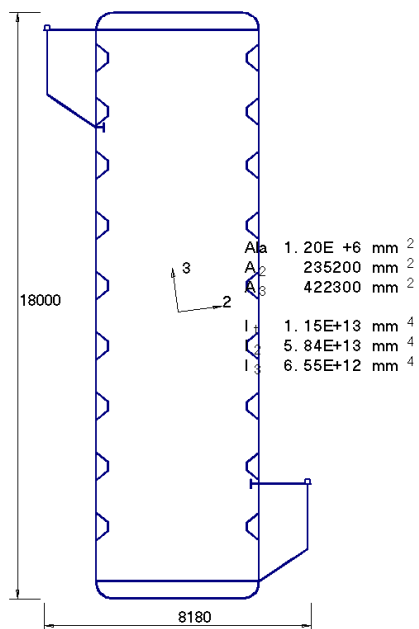
1. Field_19



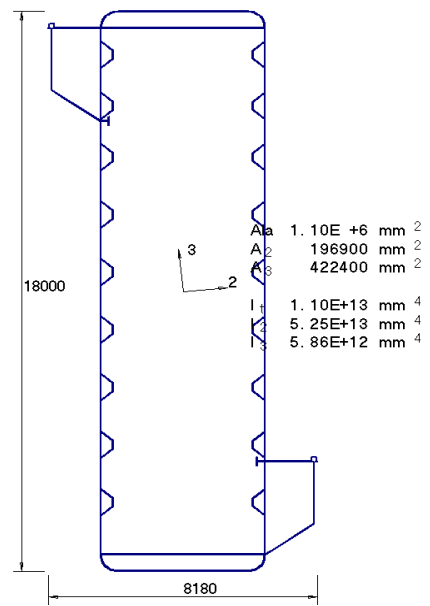
2. Field_20



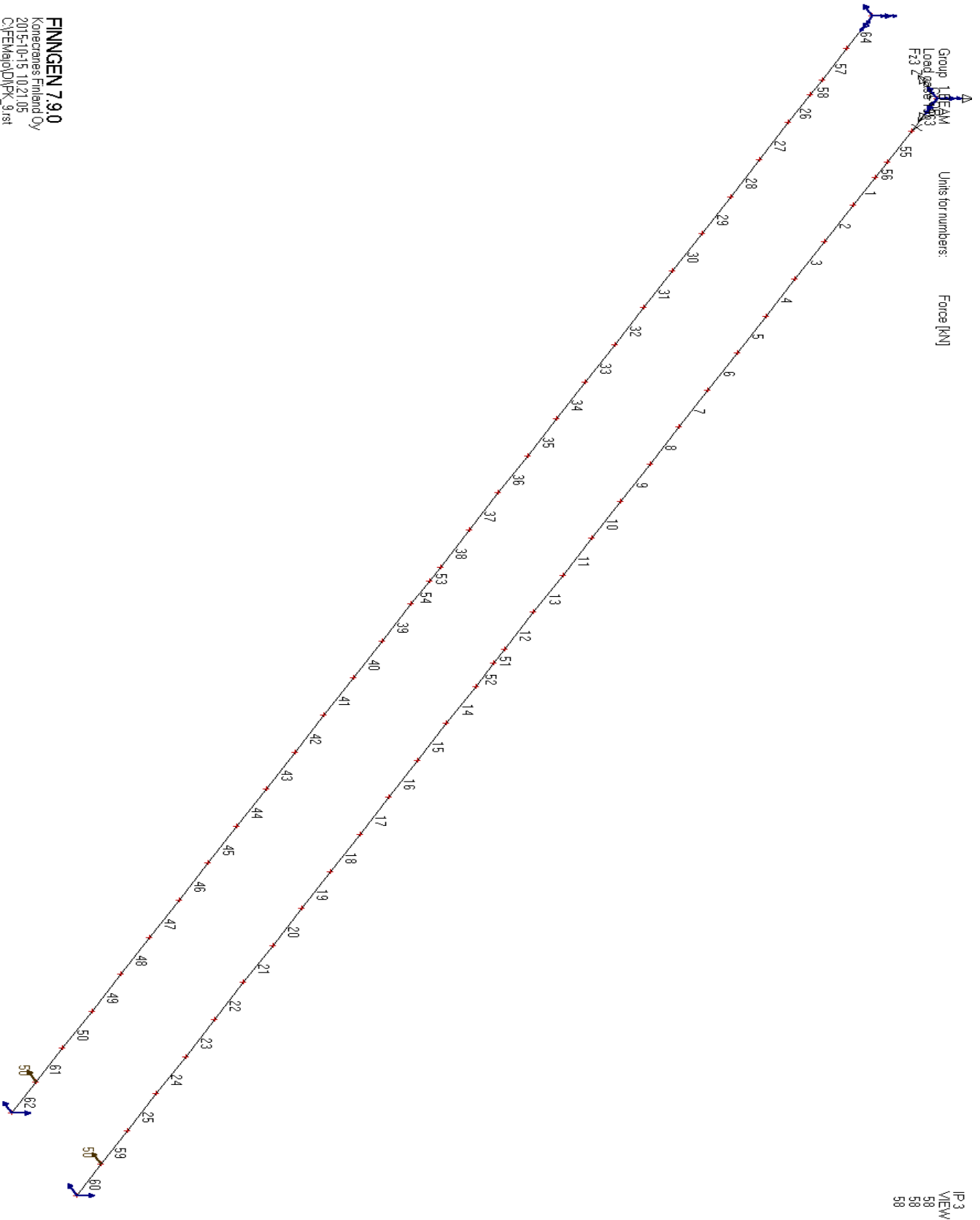
3. Field_21



4. Field_22

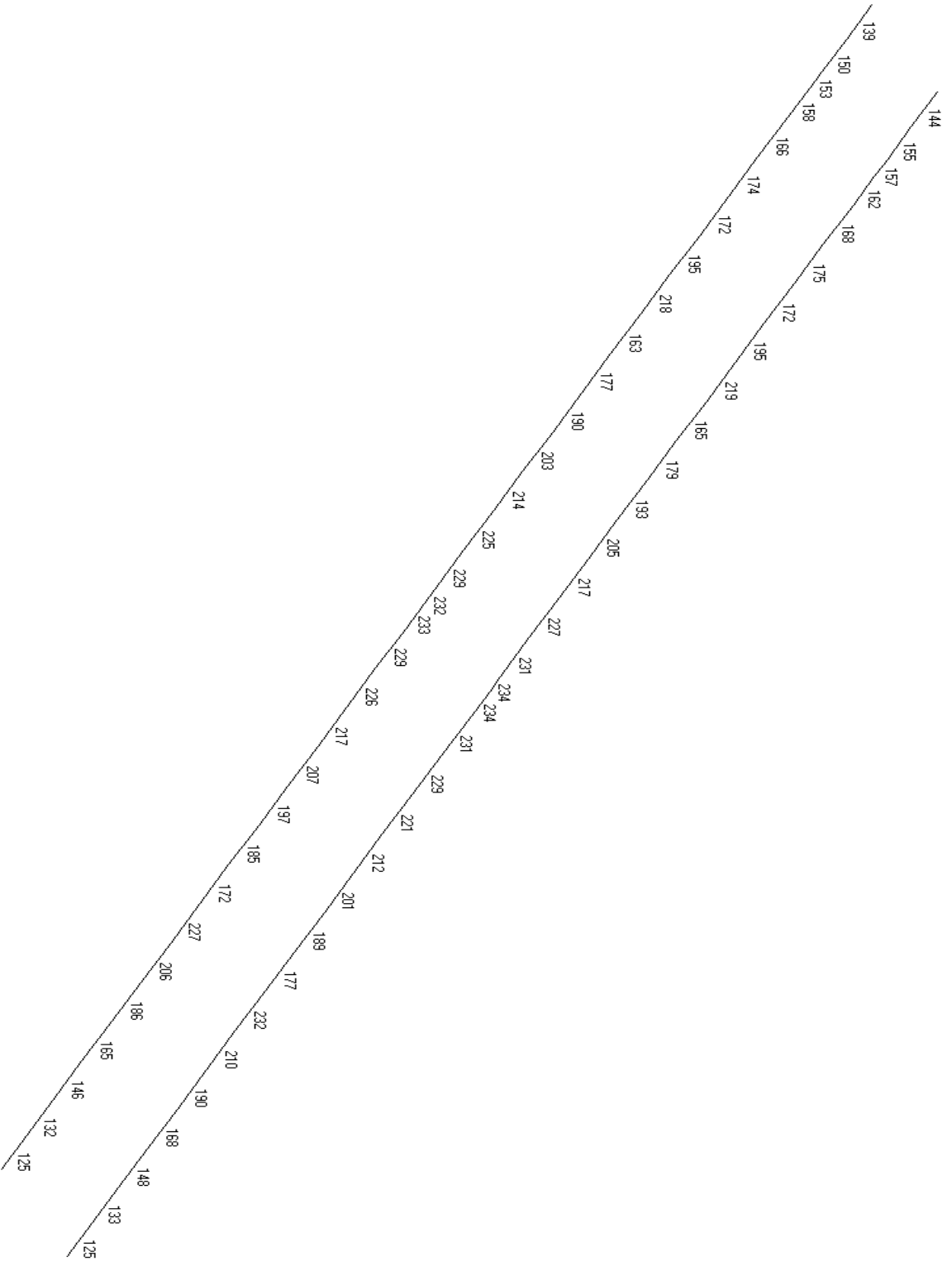


Pääkannattimen jännitykset eri tapauksissa.



FINNGEN 7.9.0
Koneraamas Finland Oy
2015-10-15 10:21:05
C:\FEM\ajop\DPK_9.rst

Liite V, 2

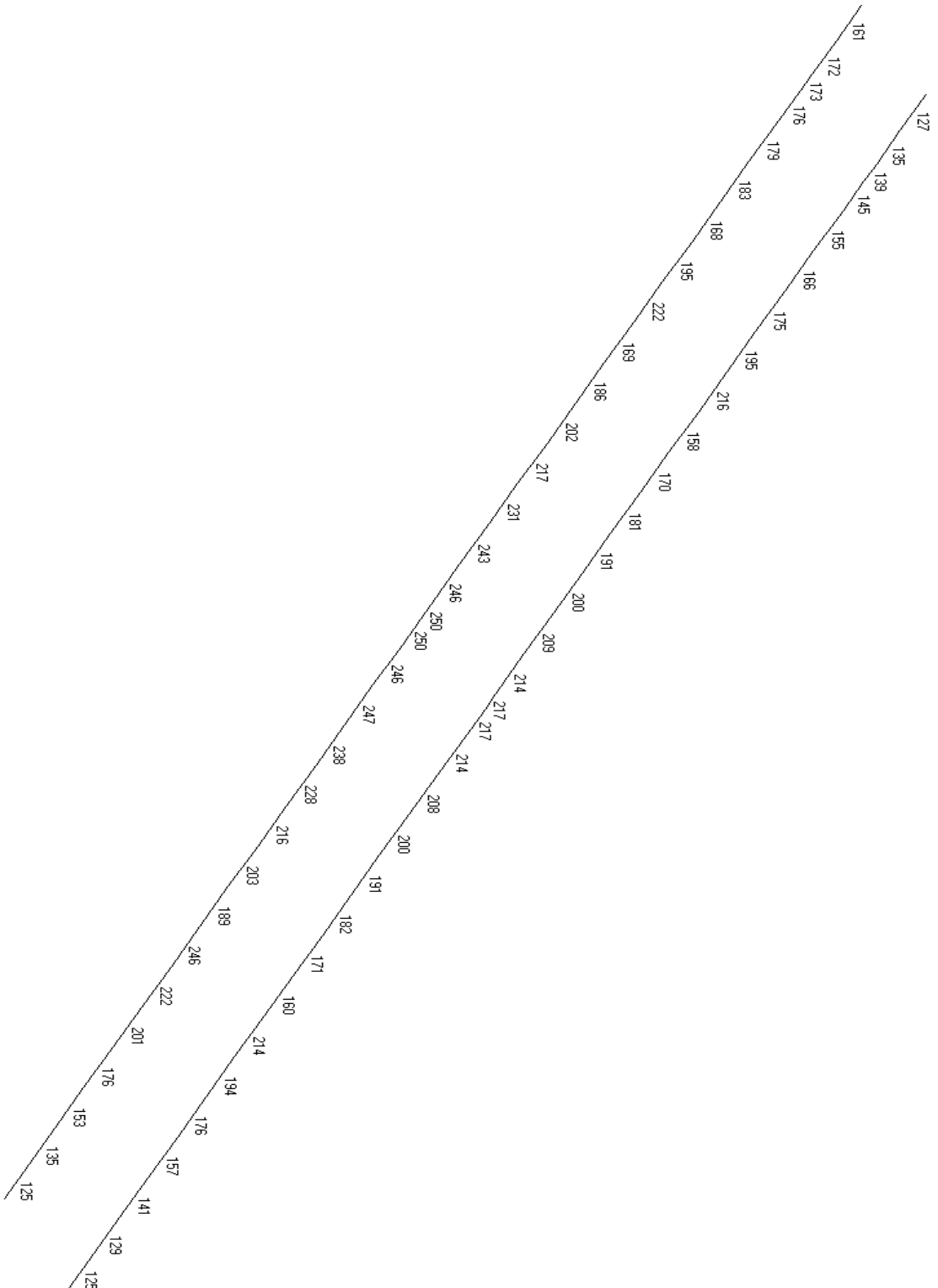


IP 3
 VIEW
 577
 577
 577
 0

FINNSAP
 Konecranes Finland Oy
 2015-08-28 23:28
 PK_9

LOAD CASE 15 Case1 (DL+TL2+Az+Fx+Fz)
 ELEMENT PLOT: COMBINED STRESS N/mm2
 RANGE 124.7 ... 234.4

IP 3
 VIEW
 577
 577
 577
 0

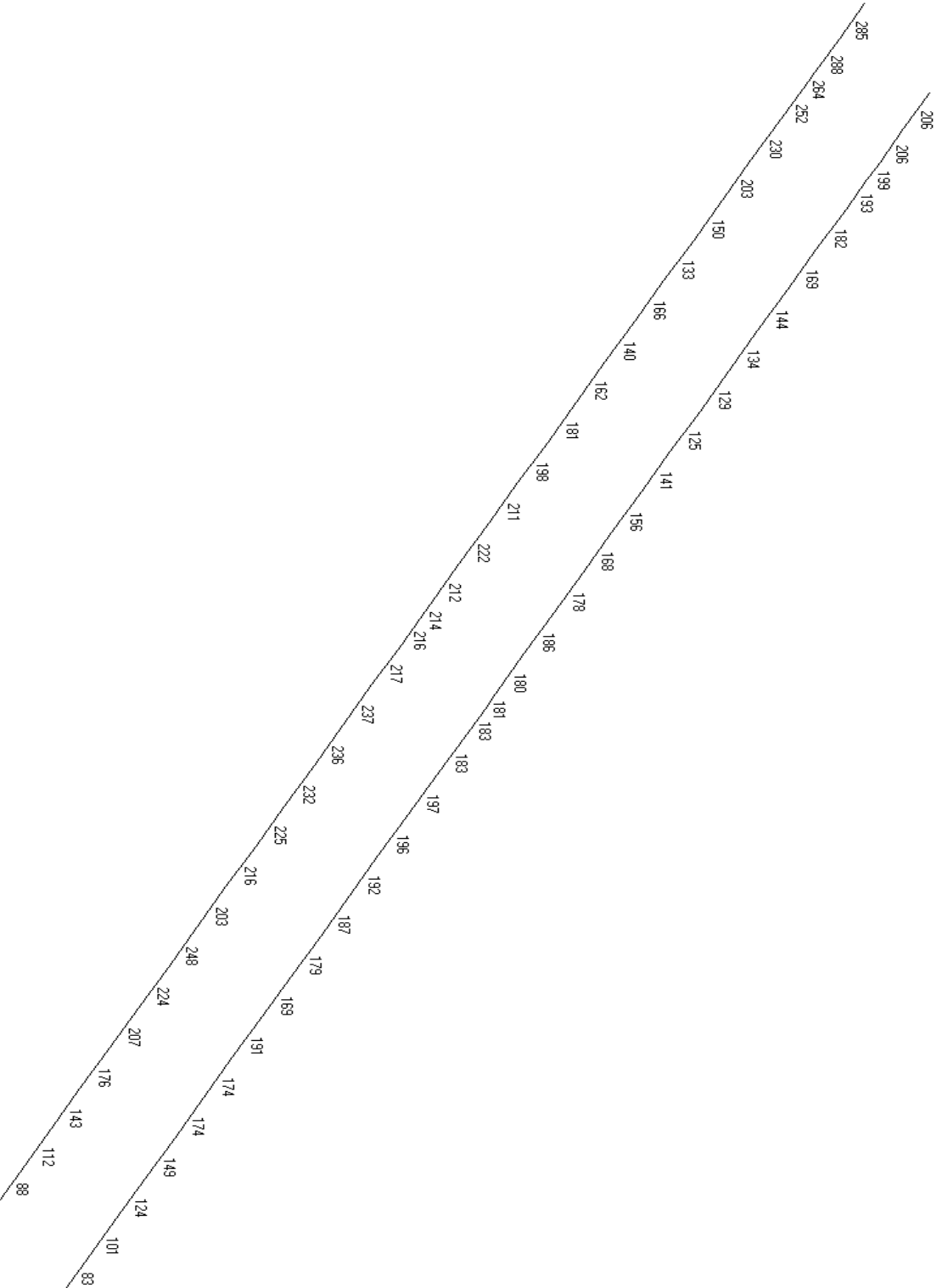


FINNSAP
 Korkeajous Finland Oy
 2015-06-28 23:28
 PK_9

LOAD CASE 18 Case II (DL+TL2+Az+WLOs+Fy+Fz)
 ELEMENT PLOT : COMBINED STRESS N/mm2
 RANGE 1247 ... 2500

Liire V, 4

IP 3
VIEW
577
577
577
0



FINNSAP
Konecranes Finland Oy
2015-08-28 23:28
PK_9

LOAD CASE 21 Case III (DL+TL1+WLOs+Fz1)
ELEMENT PLOT: COMBINED STRESS N/mm2
RANGE 83.0 ... 287.5

Painolaskenta.

KONECRANES®

VLE/Jtu

20.1.2016

VLS37013, 1200t/230m GGC

WEIGHT AND CENTER OF GRAVITY CALCULATION

Component	Drawing	Total weight [tons]	Comp. weight [kg]	Distance from fixed leg rail [m]	Height from rail level [m]
MAIN GIRDER	-B	4531		109.50	116.85
Section	-B1		319000	-3.00	116.70
Section	-B2		144000	9.50	116.70
Section	-B3		145000	19.50	116.70
Section	-B4		147000	29.50	116.70
Section	-B5		151000	39.50	116.70
Section	-B6		158000	49.50	116.70
Section	-B7		168000	59.50	116.70
Section	-B8		177000	69.50	116.70
Section	-B9		220000	80.50	116.70
Section	-B10		237000	92.75	116.70
Section	-B11		304000	107.00	116.70
Section	-B12		304000	123.00	116.70
Section	-B13		237000	137.25	116.70
Section	-B14		220000	149.50	116.70
Section	-B15		177000	160.50	116.70
Section	-B16		168000	170.50	116.70
Section	-B17		158000	180.50	116.70
Section	-B18		151000	190.50	116.70
Section	-B19		147000	200.50	116.70
Section	-B20		145000	210.50	116.70
Section	-B21		144000	220.50	116.70
Section	-B22		148000	228.20	116.70
Fixing of counter beam	-B-OP5		0	115.00	116.70
Rails +fixing	(A150)		139000	115.00	116.70
Square bar			5800	115.00	116.70
Walkways ins ide of main girder	-BF1		8200	115.00	113.50
Outs ide walkways	-BFF		38000	115.00	124.50
Walkways outside of main girder	-BF0		14800	115.00	119.50
Ventilation system	-BV		1252	30.00	124.50
Electric room	-BE		30000	21.00	116.50
Erection s upports	-BL		70000	115.00	116.70
Cableways outside of main girder	-BX0		4000	95.00	124.50
Cableways inside of main girder	-BX1		10200	95.00	116.70
Power supply for trolleys	-X1		40500	95.00	124.50

KONECRANES®

VLE/Hra

21.6.2016

CASE Crane 1200t/230m GGC

WEIGHT AND CENTER OF GRAVITY CALCULATION

Component	Drawing	Total weight	Comp. weight
		[tons]	[kg]
MAIN GIRDER		5088	
Field_19			605672
Field_20			2172316
Field_21			926950
Field_22			987067
Rails+fixing	(A150)		143000
Square bar			11560
Walkways inside of main girder			10000
Outside walkways			50000
Walkways outside of main girder			10000
Ventilation system			4000
Electric room			30000
Erection supports			80000
Cableways outside of main girder			5000
Cableways inside of main girder			12000
Power supply for trolleys			40500