



Jarkko Finnilä

**PIENTUULIVOIMALAITOKSEN MASTON SUUNNITTELU,
LUJUUSTEKNINEN TARKASTELU JA KUSTANNUSTEN
OPTIMOINTI**

**PIENTUULIVOIMALAITOKSEN MASTON SUUNNITTELU,
LUJUUSTEKNINEN TARKASTELU JA KUSTANNUSTEN
OPTIMOINTI**

Jarkko Finnilä
Opinnäytetyö
Kevät 2013
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma, koneautomaatio

Tekijä: Jarkko Finnilä

Opinnäytetyön nimi: Pientuulivoimalaitoksen maston suunnittelu, lujustechninen tarkastelu ja kustannusten optimointi

Työn ohjaaja: Esa Kontio

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2013 Sivumäärä: 99 + 3 liitettä

Energian kulutus maailmalla ja Suomessa kasvaa nykyisestä. Suomessa energian hinta on elintasoon nähden länsimaiden edullisimpia. Tämä aiheuttaa paineita energian hinnan nostolle. Lisäksi Suomessa käytetään lähes kolminkertainen määrä energiaa esimerkiksi Saksaan verrattuna kylmien pohjoisen olosuhteiden vuoksi. Toisaalta huoli ympäristöstä on kasvava paremman ympäristötietoisuuden vuoksi. Globaali ilmaston lämpeneminen on herättänyt ihmiskunnan laajasti pohtimaan energian tuotannon vaikutuksia. Tuulivoima on yksi varteentotettava vihreän energian tuotantomuodoista.

Opinnäytetyön teettäjä Vesa Pehkonen on suomalainen pientuulivoimaharrastaja. Pehkonen näkee pientuulivoimatuottajille suunnatun asiakkaan kokoonpantavan maston mahdollisena yritystoiminnan tuotteena. Työn tavoitteena oli suunnitella vapaasti seisova ristikkomastosarja, jonka kohderyhmänä ovat pientuulivoimatuottajat, eli alle 50 kW tuulivoimalaitokset. Masto oli suunniteltava niin, että se on kokoonpantavissa täysin pystytyspaikalla ilman hitsausta. Työssä tarkastellaan mastoja lujustechnisen tarkastelun kautta ja pyritään suunnittelussa pitämään materiaali- ja valmistuskustannukset mahdollisimman alhaisena.

Aluksi työssä määriteltiin mastoon kohdistuvat kuormat, joita olivat turbiinin ja maston tuulikuorma sekä turbiinin ja rakenteen oma paino. Tämän jälkeen suunniteltiin alustava ristikkomalli 3D-mallinnusohjelmalla. Malli siirrettiin erilliseen FEM-ohjelmistoon, jossa tarkasteltiin maston käyttäytyminen. Tämä toistettiin niin useasti, ettei optimointia voinut enää tehdä pidemmälle määriteltyjen lähtöarvojen puitteissa. FEM-ohjelmistosta saatiin mastoon vaikuttavat voimat liitososien mitoitus varten. Liitososien mitoituksen jälkeen ne tarkasteltiin 3D-mallinnusohjelmiston FEM-analyysityökalulla.

Työssä suunniteltiin kaksi mastoa, 21 ja 30 m korkeat vapaasti seisovat ristikkomastot periaatteellisten liitososien kanssa. Mastot poikkeavat umpinaisten profiilinsa sekä asiakkaan itse kokoonpantavan rakenteen osalta markkinoilla olevista mastoista. Mastot on mitoitettu kestämään 10 kW tuuliturbiinin aiheuttamat kuormat.

Asiasanat: masto, ristikkomasto, tuulivoima, tuulienergia, nurjahdus, FEM

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree programme in Mechanical Engineering and Production Technology,
Mechanical Automation

Author: Jarkko Finnilä

Title of thesis: Designing and optimization of lattice tower for small consumer directed windmills

Supervisor: Esa Kontio

Term and year when the thesis was submitted: spring 2013 Pages: 99 + 3

In the future, the usage of electricity will continue to rise all over the world. In Finland, the price of energy is low compared to the prices in other Western countries. In addition, power consumption in Finland has nearly tripled compared for example to Germany. Our northern climate will increase residences' heating expenses compared to Central Europe. All this will put pressure on raising the prices. At the same time, the common concern about global warming and greenhouse effect is recognized among people all over the planet. Wind power is one of the most significant ways to produce green energy.

The objective of this thesis is to design a freestanding lattice mast for consumers who are planning to invest in wind power. The basic point is that consumer could assemble the mast by himself and therefore save on expenses. It must be possible to do the assembly without welding on the using point of the wind turbine. That is why the assembly will be designed by using bolts and nuts. At the same time, expenses of materials and subcontracting must be kept low. Therefore using the raw materials effectively is important considering the final product and its demand.

The first step was to clarify the loads that are straining the mast. The following task was to design an over dense nodal point net for the mast by using 3D-software. By entering the nodal points into the FEM-software and analysing the mast, it was possible to see, if masts' lattice could be rarefied. This was repeated until rarefying was not able to go further. The loads for designing the coupling parts were received from the FEM-software. The coupling parts were designed by using new Eurocode standards and then modeled by 3D-software. Finally, FEM-analyses were made by same 3D-software which was used to model the parts and the mast.

The results of this thesis are two freestanding lattice masts which are 21 and 30 meters of height and the basic models and analyses of the coupling parts. The masts are designed to endure forces from the biggest 10kW wind turbines in the market.

Keywords: mast, tower, lattice, wind power, windmill, buckling, FEM

ALKULAUSE

Opinnäytetyön tekemisen tie oli pitkä. Matkalla on ollut ylä- ja alamäkiä, kiviä ja kuoppia. Työtä tehdessä vaikeimmat asiat eivät aina ole olleet itse työhön liittyvät seikat, vaan työn tekemisen sovittaminen perheen tiiviiseen arkeen. Moni ilta vaihtui aamuksi työn ääressä istuessa.

Haluan kiittää työn tilaajaa. Vesa Pehkonen antoi vaativan ja mielenkiintoisen aiheen sekä hyvän tuen työn tekemiseen. Rautaisen ammattisuunnittelijan opastuksella työ oli vietävissä läpi pahimmat kuopat jo ennakkoon väistäen. Reipasta myötätuulta Pyhäjoen tuulipuistoon!

Kiitos kuuluu myös työn valvojalle, lehtori Esa Kontiolle. Olen opiskellut nyt elämässäni toista insinöörikoulutusta. Kouluvuotia minulla on takana 17, enkä yhtä loistavaa ja työlleen omistautunutta opettajaa ole aikaisemmin kohdannut. Kiitos kaikesta. Kireitä siimoja ja kiireetöntä kesää!

Opinnäytetyö on melkein päivälleen saman ikäinen kuin esikoiseni, yksi vuotta täyttävä Aino. Olenkin ollut nyt tavallaan kahden lapsen isä. Huomattavan helpottunut ja onnellinen olen siitä, että toinen lapsi lentää jo pesästään pois antaen tilaa tärkeimmälle. Ehdottomasti suurin kiitos ymmärryksestä ja tuesta kuuluu rakkaalle perheelleni, avovaimolleni Hannalle ja esikoiselleni Ainolle. Kiitos.

Oulussa 10.5.2013

Jarkko Finnilä

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
SISÄLLYS	6
1 JOHDANTO	9
2 YLEISTÄ TUULIENERGIASTA	10
2.1 Energian tuotanto ja kulutus maailmalla	10
2.2 Energian tuotanto ja kulutus Suomessa	11
2.3 Energian tuotanto ja kulutus tulevaisuudessa	13
2.4 Tuulienergia	14
2.4.1 Tuulienergia maailmalla	14
2.4.2 Tuulienergia Suomessa	15
2.4.3 Tuulivoimalaitoksen periaate ja rakenne	15
2.5 Pientuulivoimalaitos	17
3 MASTORAKENTEIDEN SUUNNITTELUN LÄHTÖKOHTIA	19
3.1 Mastojen tyypit	19
3.2 Ristikko	20
3.3 Suunnitteluperusteet	21
3.4 Roottoriin ja mastoon vaikuttavat voimat	23
3.5 Materiaalit	24
3.5.1 Teräs	25
3.5.2 Alumiini	25
3.5.3 Rakennetuotteet	26
3.6 Rakenteiden pintakäsittely	27
3.7 Liitostavat	28
3.7.1 Hitsausliitokset	29
3.7.2 Ruuvi- ja niittiliitokset	30
3.8 Lainsäädäntö ja standardit	30
4 MASTOON KOHDISTUVAT KUORMAT	31
4.1 Roottoriin kohdistuva tuulikuorma	32
4.2 Roottorin painon aiheuttama kuorma	34

4.3 Mastoon tuulikuorma	34
4.4 Maston omasta painosta aiheutuva kuorma	35
5 MASTON SUUNNITTELU	36
5.1 Suunnittelun määräävät muuttujat ja lähtökohdat	36
5.1.1 Osavarmuusluvut	37
5.1.2 Nurjahdus	38
5.1.3 Hoikkuus	41
5.2 Maston mitoitus	42
5.2.1 Maston mallintaminen 3D-CAD-ohjelmistolla	43
5.2.2 Maston laskenta-asiakirja	44
5.2.3 Maston analyysi FEM-ohjelmistolla	45
5.2.4 FEM-tulosten analysointi	46
5.3 21 m maston suunnittelu 10 kW:n turbiinille	48
5.4 30 m maston suunnittelu 10 kW:n turbiinille	49
5.5 Maston pystytys	50
6 LIITOSOSIEN SUUNNITTELU	56
6.1 Liitososiin kohdistuvat voimat	56
6.2 Ruuvien lujuus	57
6.2.1 Leikkauslujuus	57
6.2.2 Vetolujuus	59
6.3 Paarre	59
6.3.1 Paarteen pään reunapuristuskestävyys	61
6.3.2 Paarteen pään palamurtuminen	64
6.3.3 Paarteen pään perusaineen kestävyys	66
6.3.4 Paarteen pään pintapaineen tarkastelu	67
6.3.5 Paarteen pään FEM-tarkastelu	68
6.4 Diagonaalien mitoitus	69
6.4.1 Diagonaalien nurjahdustarkastelu	70
6.4.2 Diagonaalien pään mitoitus reunapuristuskestävyyden avulla	71
6.4.3 Diagonaalien pään perusaineen kestävyys	72
6.4.4 Diagonaalien pään FEM-tarkastelu	72
6.5 Diagonaalien sidonta paarteeseen	73
6.5.1 Diagonaaliholkin kiinnitysruuvien leikkaantuminen	75
6.5.2 Diagonaaliholkin reunapuristuskestävyys	75

6.5.3 Diagonaaliholkin evän peruskestävyys	76
6.6 Kiinteät ylä- ja alajalat	76
6.6.1 Kiinteiden ylä- ja alajalkojen levyn taivutusjännitys	77
6.6.2 Kiinteän ylä- ja alajalan FEM-tarkastelu	78
6.7 Nivelletty jalka	79
6.7.1 Perustuksen puolen nivelkappaleen mitoitus	80
6.7.2 Perustuksen puolen nivelkappaleen reunapuristus maston pystytysvaiheessa	83
6.7.3 Perustuksen puolen nivelkappaleen FEM-tarkastelu	84
6.7.4 Paarteen puolen nivelkappaleen mitoitus	84
6.7.5 Paarteen puolen nivelkappaleen FEM-tarkastelu	85
6.8 Maston nostokorvakko	86
6.8.1 Maston nostokorvakon mitoitus	87
6.8.2 Maston nostokorvakon FEM-tarkastelu	88
7 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET	90
7.1 Työn tulokset	91
7.2 Vertailu markkinoilla oleviin mastoihin	91
8 POHDINTA	93
8.1 Opinnäytetyön laajuus	93
8.2 Lisäselvitystä vaativat ehdotukset	94
LÄHTEET	96
LIITTEET	100
Liite1 20 kpl kaupallisia 10 kW tuuliturbiineja	
Liite2 21 m maston spesifikaatio	
Liite1 31 m maston spesifikaatio	

1 JOHDANTO

Tulevaisuudessa energian hinta näyttää jatkavan nousemista. Fossiiliset energialähteet muodostavat valtaosan, noin 75 %, energian tuotannosta maailmassa. Fossiilisten energialähteiden muodostama hiilidioksidi aiheuttaa maapallolla kasvihuoneilmiötä ja ilmaston lämpenemistä. EU:n tavoitteena on leikata 20 % kasvihuonekaasupäästöjä vuoteen 2020 mennessä. Tästä eteenpäin kasvihuonekaasupäästöjen leikkaaminen jatkuu. Maapallolla on siis alkanut vihreän ja uusiutuvan energian aikakausi. (1, s. 9, 180.)

Sähköyhtiöt ovat suopeita ostamaan pientuottajilta energiaa syötettäväksi verkkoon. Tämä mahdollistaa kotitalouksille ja pienille yhteisöille tarkoitettujen tuulivoimaloiden investoinnin, millä on mahdollisuus maksaa investoinnin kustannukset pitkällä aikavälillä takaisin. Tämä opinnäytetyö tehdään yksityishenkilölle, Vesa Pehkoselle, joka on aiemmin teettänyt Oulun seudun ammattikorkeakoulussa automaatiotekniikan koulutusohjelmassa opinnäytetyön nimeltä Tuuligeneraattorimastojen käynnön ohjaus (2).

Työssä tarkastellaan yleistä ongelmaa pientuulivoimalaitoksen rakentajien keskuudessa: kuinka valmistaa edullinen, helposti kuljetettava ja turvallinen sekä riittävän luja masto. Edullisen ja asiakkaan itse kokoonpantavan maston suunnittelu ja valmistus antaa mahdollisuuden liiketoimintaan, koska masto on kallis osa pientuulivoimalaitosta. Tuulivoiman osuus tulevaisuuden energian tuotantotavoista on nopeasti kasvava, joten markkinoita työssä suunniteltavalle edulliselle mastolle tulevaisuudessa voisi löytyä.

2 YLEISTÄ TUULIENERGIASTA

2.1 Energian tuotanto ja kulutus maailmalla

Vuonna 2009 maailmassa fossiilisten polttoaineiden osuus oli noin 78 %. Tästä öljyn osuus on suurin, noin 31 % maailman energiantuotannosta. Toiseksi eniten maailman energiantuotannosta tuottaa kivihiili, 25 %. Maakaasulla tuotetaan 21 % osuus maailman energiantuotannosta. Fossiilisilla polttoaineilla tuotettu energia tuottaa hiilidioksidia ilmakehään. Hiilidioksidi edesauttaa kasvihuoneilmiön ja ilmaston lämpenemistä maapallolla. (1, s. 3 - 9.)

Ei-fossiilisilla polttoaineilla tuotettu energia ei tuota lisää ilmaston lämpenemistä edesauttavaa hiilidioksidia ilmakehään. Ei-fossiilisilla polttoaineilla tuotetun energian osuus maailmassa käytetystä energiasta on noin 22 %. Tästä suurin osa on bioenergiaa, jonka osuus on maailman energiantuotannosta on 11 %. Ydin- ja vesivoiman osuudet ovat yhtä suuret, 6 %. Tuulivoiman osuus on hyvin pieni, ainoastaan 0,4 %. Taulukossa 1 on esitetty energialähteet maailmassa vuodesta 1990 alkaen vuoteen 2007 saakka. (1, s. 8 - 9.)

TAULUKKO 1. Maailman energialähteet (1, s. 9)

Vuosi	1990	1995	2000	2005	2007	Osuus
	PWh	PWh	PWh	PWh	PWh	%
Fossiiliset energialähteet						
Öljy	36,6	37,8	41,1	44,6	46,0	31%
Kivihiili	26,0	26,5	27,5	34,1	37,0	25%
Maakaasu	20,9	22,5	25,5	28,8	30,7	21%
Yhteensä	83,4	86,9	94,1	107,5	113,6	78%
Osuus	79%	77%	77%	78%	78%	
Ei-fossiiliset energialähteet						
Vesivoima	5,8	6,6	7,1	7,8	8,2	6%
Ydinvoima	6,1	7,0	7,8	8,4	8,3	6%
Tuulivoima			0,1	0,3	0,6	0,4%
Bioenergia	10,8	11,9	13,0	14,0	15,5	11%
Yhteensä	22,6	25,6	28,0	30,5	32,6	22%
Osuus	21%	23%	23%	22%	22%	
Yhteensä	106,0	112,5	122,1	137,9	146,2	100%
Indeksi	100%	106%	115%	130%	138%	

Maailmassa kokonaisenergiankulutus vuodesta 1990 vuoteen 2009 on kasvanut 40 %, eli noin 2,1 % vuodessa. Tulevaisuudessakaan kasvulle ei näy loppua yhä uusien sähköä kuluttavien laitteiden tullessa markkinoille, vaikkakin asumisessa ja kulutuselektroniikkaa valmistavissa yrityksissä panostetaan vähemmän energiaa kuluttaviin ratkaisuihin. (1, s. 9; 3, s. 40 - 41.)

2.2 Energian tuotanto ja kulutus Suomessa

Suomessa vuonna 2009 energian kulutus energialähteittäin poikkeaa aiemmin esitetystä, koko maailman energialähteiden tilastosta. Taulukossa 2 on esitetty Suomen energiankulutus energialähteittäin. Suomessa fossiiliset energianlähteet ovat 55 % kaikesta tuotetusta energiasta. Fossiiliset energianlähteet osuuksineen ovat öljy 25 %, kivihiili, 13 %, maakaasu 10 % ja turve 7 %. Toisin kuin koko maailmassa, Suomessa fossiilisten osuus on laskeva. Vuonna 2009 ei-fossiilisia energianlähteitä Suomessa oli 45 %. Suomessa oli muuta maailmaa enemmän bioenergiaa, osuudella 20 % ja ydinvoimaa, osuudella 17 %. Vesivoimaa Suomessa oli vähemmän, noin 3 % energian kulutuksesta. (1, s. 7.)

TAULUKKO 2. Suomen energiankulutus energialähteittäin (1, s. 7)

Vuosi	1990	1995	2000	2005	2007	Osuus
	TWh	TWh	TWh	TWh	TWh	%
Fossiiliset energialähteet						
Öljy	105	96	98	101	100	25%
Kivihiili	46	46	41	36	53	13%
Turve	15	22	17	19	28	7%
Maakaasu	25	33	39	41	41	10%
Yhteensä	191	198	196	197	223	55%
Osuus	60%	59%	53%	52%	55%	
Ei-fossiiliset energialähteet						
Vesivoima	11	13	15	14	14	3%
Ydinvoima	55	55	65	68	68	17%
Tuulivoima	0	0	0	0	0,2	0,05%
Bioenergia	46	58	74	77	82	20%
Sähk. tuonti	11	8	12	17	13	3%
Muut	3	3	5	8	9	2%
Yhteensä	126	137	171	183	186	45%
Osuus	40%	41%	47%	48%	45%	
Yhteensä	317	334	367	380	408	100%
Indeksi	100%	105%	116%	120%	129%	

Sähkönkulutus Suomessa asukasta kohden on EU:n korkein, 16 297 kWh/asukas. Luku on noin kolminkertainen verrattuna EU:n keskiarvoon. Lisäksi sähkönkulutus Suomessa on kasvanut muuta maailmaa nopeammin vuodesta 1990, noin 2,8 % vuodessa. (1, s. 9 - 10, 202.)

Sähkönkulutus Suomessa jakautuu taulukon 3 esittämällä tavalla. Suurin sähkönkäyttäjä Suomessa on teollisuus, joka käyttää noin 55 % sähköstä. Palvelut käyttävät 17 % sähköstä. Kotitaloudet käyttävät Suomessa sähköstä 24 %, mukaan luettuna vapaa-ajan asuminen ja sähkölämmitys. (1, s. 10.)

TAULUKKO 3. Sähkön käyttö Suomessa (1, s. 10)

Vuosi	1990	1995	2000	2005	2007	Osuus
	TWh	TWh	TWh	TWh	TWh	%
Teollisuus	32,6	36,8	43,5	43,7	47,7	55%
Palvelut	9,8	10,7	12,5	14,7	15,2	17%
Liikenne	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	1%
Kiinteistöt	1,5	1,6	1,8	1,9	1,9	2%
Kotitaloudet	7,1	8,1	9,2	10,3	11,1	13%
Sähkölämmitys	6,3	6,9	7,4	8,7	8,9	10%
Loma-asunnot	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	1%
Maatalous	1,0	0,8	0,8	0,9	0,9	1%
Rakennustoimint:	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0%
Yhteensä	59,2	65,8	76,4	81,4	87,3	100%
Indeksi	100%	111%	129%	138%	148%	

Suomen erittäin pohjoisen ja kylmän sijainnin vuoksi sähkön ja lämmön tarve asukasta kohden on suurempaa kuin missään muussa maassa, yli 16 000 kWh asukasta kohti vuodessa. Taulukossa 4 on esitetty eri lämmitysmuotojen kehitys ajan funktiona. Huomattavaa on polttoaineiden määrän supistuminen ja toisaalta taas sähkölämmityksen ja lämpöpumppujen määrän kasvu. Lämmitystarve on kokonaisuudessaan kasvanut 18 % vuodesta 1990 - 2007. (1, s. 10 - 11.)

TAULUKKO 4. Lämmitysmuotojen kehitys Suomessa (1, s. 11)

	1990	1995	2000	2005	2007	Osuus
	TWh	TWh	TWh	TWh	TWh	%
Polttoaineet	20,5	20,5	16,9	15,7	15,9	28%
Kaukolämpö	20,2	22,6	23,7	27,8	27,5	49%
Sähkölämmitys	6,3	7,7	8,2	9,9	9,0	16%
Lämpöpumput	0,7	1,0	1,2	2,7	4,2	7%
Yhteensä	47,7	51,8	50,0	56,1	56,5	100%
Indeksi	100%	109%	105%	118%	118%	

On myös huomattavaa, että sähkön hinta Suomessa verrattuna esimerkiksi Keski-Eurooppaan on edullinen. Yksikköhinta Tanskaan ja Saksaan verrattuna on noin puolet. Suomi on sähköhinnalta EU:n toiseksi halvin maa, jos tarkastellaan asiaa kotitalouksien ostovoiman kannalta. (4, s. 116; 5; 6.)

2.3 Energian tuotanto ja kulutus tulevaisuudessa

Uusiutuvat energialähteet muodostavat 13 % maapallon energian tuotannosta. Uusiutuviin energialähteisiin kuuluvat biovoima, vesivoima, tuulivoima ja aurinkovoima. EU:n tavoite on vuoteen 2020 mennessä nostaa uusiutuvien energialähteiden osuus 20 %:iin. Samaa trendiä jatkamalla vuonna 2050 voisi uusiutuvien energialähteiden osuus olla jopa 50 %. (1, s. 180.)

Tuulienergiasta on tulossa sähköenergian tuotannossa merkittävä energian lähde. Vuoteen 2050 mennessä jopa 25% maailman energiasta voidaan tuottaa tuulienergian avulla, yhtä paljon kuin ydinvoiman. Esimerkiksi Tanskassa jo yli viidennes energiasta tuotetaan tuulienergian avulla. Tanskan tavoite on 50 %:n osuus vuoteen 2030 mennessä. (1, s. 180.)

Taulukossa 5 on esitetty ennuste vuosisadan loppuun saakka energian tuotannosta jakaen ne fossiilisiin ja ei-fossiilisiin energian lähteisiin. Taulukosta on luettavissa, että energian tarve tulee kasvamaan todella selvästi vuosisadan loppuun mennessä. Toisaalta etenkin fossiilisten polttoaineiden, kuten hiilen ja öljyn käyttö supistuu. Vastaavasti ei-fossiiliset tuotantotavat nousevat, varsinkin ydinvoima, tuulivoima ja aurinkovoima. (1, s. 182 - 185.)

TAULUKKO 5. Ennuste maailman energiantuotannon tulevaisuudesta (1, s. 183)

Vuosi	2005 PWh	2050 PWh	2100 PWh	2005 %	2050 %	2100 %
Fossiiliset						
- Hiili	33,6	24,5	14,7	24%	12%	6%
- Öljy	45,0	30,5	18,2	33%	15%	7%
- Kaasu	29,0	39,7	23,7	21%	20%	10%
- Yhteensä	107,6	94,6	56,7	78%	47%	23%
Ei-fossiiliset						
- Ydinvoima	7,3	28,0	61,0	5%	14%	25%
- Biomassa	13,9	29,3	29,3	10%	15%	12%
- Vesivoima	7,8	15,5	20,5	6%	8%	8%
- Tuulivoima	0,4	29,8	35,8	0%	15%	14%
- Aurinko ym.	0,7	4,1	44,1	0%	2%	18%
- Yhteensä	30,0	106,6	190,6	22%	53%	77%
Yhteensä	137,6	201,2	247,3	100%	100%	100%

2.4 Tuulienergia

Tuulienergia on ilman virtauksen muuntamista pyörimisliikkeeksi, josta energia muunnetaan esimerkiksi sähköksi. Tuulienergia on uusiutuvaa energiaa, joka on peräisin auringosta. Tuuli muodostuu, kun aurinko lämmittää maan ja meren päällä olevaa ilmaa. Maan päällä oleva ilmassa lämpenee nopeammin kuin meren päällä oleva. Maan päällä oleva lämmin ilmassa kohoaa ylös, missä se jäähtyy ja siirtyy meren päälle. Kylmennyt ilma vajoaa alaspäin ja pakottaa meren päällä olevan ilman virtaamaan maan päälle. Tämän virtauksen koetaan tuulena. (7.)

2.4.1 Tuulienergia maailmalla

Vuonna 2009 maailman energiasta tuotettiin hieman yli prosentti tuulienergian avulla. Maailmanlaajuisesti tuulienergian tuotantokapasiteetti oli 157,9 GW, josta suurimmat tuottajamaat Yhdysvallat, Saksa ja Kiina lohkaisivat puolet. Euroopassa tuulienergialla tuotettiin noin 3 % Euroopan sähköntuotannosta. Vuonna 2009 EU:n alueella rakennettiin tuulivoimakapasiteettia 10,2 GW. Investointien yhteenlaskettu hinta oli 13 mrd. €, joten tuulienergia on todella merkittävä teollisuuden ala Euroopassa ja koko maailmassa. (8, hakusana tuulivoima.)

Vuonna 2010 koko EU:n yhteenlaskettu tuulienergian tuotantokapasiteetti oli 80 GW. Vuonna 2008 eurooppalainen tuulienergian teollisuuden ala työllisti suoraan 108 600 työntekijää ja lisäksi epäsuorasti 43 000 työntekijää. Uuden energiakapasiteetin investoinneissa vain maakaasu ohitti tuulienergian EU:n alueella voimalaitosten tehossa mitattuna. (9, s. 18 - 20.)

2.4.2 Tuulienergia Suomessa

Suomi on tuulivoiman tuottajana kovin vaatimaton maa. Suomessa vuonna 2010 oli kapasiteettia vain noin 200 MW:n verran, eli noin 0,25 % EU:n tuulienergia kapasiteetista. Toisaalta valtiovallan tavoitteena on nostaa lukua merkittävästi. VTT:n mukaan tuulivoimalla voitaisiin tuottaa vuonna 2020 jopa 10 % Suomen energian tuotannosta. (1, s. 23 - 24; 8, hakusana tuulivoima.)

Tuulivoimalaitosten ja niiden komponenttien rakentajina ja myyjinä suomalaiset konepajayritykset ovat maailman huippua. Suomessa tuulienergia-ala työllistää 800 henkilöä, joista suurin osa, 700 henkilöä työskentelee WinWinD-yhtiössä. Opinnäytetyötä tehdessä on käynyt ilmi, että WinWinD on vakavissa talousvaikeuksissa. Se on hakeutunut velkasaneeraukseen. (9, s. 18 - 19; 10; 11.)

Tuuliolot Suomessa ovat varsin hyvät. Varsinkin länsirannikolla on hyvät tuuliolosuhteet. Tämän vuoksi suurin osa Suomeen sijoitettavasta tuulienergiasta tullaan sijoittamaan länsirannikolle. Lisäksi pohjoisella tunturialueilla ja osin myös sisämaassa on hyviä alueita tuulienergian hyödyntämiseksi. Lisätietoa Suomen tuuliolosuhteista saa kaikille ilmaisesta palvelusta, Tuuliatlaksen koostamasta työkalusta. Tuuliatlas on kerännyt tuulitietoa 50, 100 ja 200 metrin korkeudelta. Vaikka 50 m on pientuulivoimalaitoksen rakentajan ulottumattomissa, on sivuston tarjoama tieto silti hyvin käyttökelpoista. On vain tiedostettava, että tuulennopeudet jäävät alhaisemmaksi. (1, s. 20 - 21; 4, s. 122 - 125.)

2.4.3 Tuulivoimalaitoksen periaate ja rakenne

Tuulivoima on ilman virtauksien välittämän liike-energian muuntamista sähköksi tuuliturbiinien avulla. Ilmavirtaus osuu voimalaitoksen lapoihin ja saattaa lavat ja

navan pyörimisliikkeeseen. Napa on kiinnitetty pääakseliin, johon pyörimisliike välittyy. Näin tuulen liike-energia muutetaan ensin mekaaniseksi pyörimisenergiaksi. (7.)

Pääakselin mekaaninen energia välitetään joko suoraan generaattoriin tai generaattoriin vaihdelaatikon kautta. Vaihdelaatikko nostaa akselin pyörimisnopeuden generaattorille sopivammaksi pyörimisnopeudeksi. Generaattorin avulla pääakselin tai vaihdelaatikon toisioakselin pyörimisenergia muutetaan tasasähkövirraksi. Lisäksi tuulivoimala sisältää suuntauslaakerit, joiden varassa turbiini käännetään tuulen suuntaa vastaan. Tuulen suuntaa tarkkailee tuuliviiri, tuulimittari tarkkailee tuulennopeutta. Komponentit sijaitsevat tuulivoimalan maston yläpäähän sijoittuvaan turbiiniin kiinnitettyinä (7; 8, hakusana tuulivoima.)

Tuulivoimalassa on säätöjärjestelmä, jonkinlainen myrskysuojaus ja mahdollisesti tasavirran vaihtovirraksi muuttava taajuusmuuttaja. Taajuusmuuttajan avulla roottorin ja generaattorin pyörimisnopeuden ei tarvitse olla vakioita, vaan ne voivat vaihdella. Tämä on avuksi lähinnä silloin, kun voimala liitetään sähköverkkoon. (7.)

Tuulen nopeus on sitä suurempi, mitä korkeammalle maaston pinnasta päästään. Voimalan tuottoon eniten vaikuttava seikka on tuulennopeus, koska energian määrä kasvaa teoriassa kolmanteen potenssiin tuulennopeuden kanssa. Esimerkiksi jos tuulennopeus kaksinkertaistuu, kasvaa voimalan tuotto kahdeksankertaiseksi. Lisäksi maaston muodot, kuten kasvillisuus ja rakennukset aiheuttavat energian tuotannon kannalta epäedullista pyörteilyä tuuleen. (4, s. 121 - 125.)

Maston tehtävänä on saada tuuliturbiini mahdollisimman korkealle. Näin tuulivoimalaitoksen tehokkuus ja taloudellisuus nousevat mahdollisimman korkeiksi. Poikkeuksellisen suotuisia maasto-olosuhteita lukuun ottamatta tulisi mikrotuotantoon rakennettavan voimalaitoksen sijoituskorkeus olla yli 15 metriä, mieluiten lähempänä 20 metriä tai sen yli. Maston on kestettävä turbiinin ja maston tuulikuormat sekä turbiinin ja maston massat. Masto on alapäästään kiinnitetty perustuksiin. Masto voi olla myös harustettu. (4, s. 121 - 125; 12.)

2.5 Pientuulivoimalaitos

Pientuulivoimalat eroavat teolliseen tuotantoon käytetyistä turbiineista ennen kaikkea tehoiltaan. Pientuulivoimaloista puuttuu myös kehittynyt ohjaustekniikka. Pientuulivoimalan käyttäjiä löytyy mm. maataloudesta, erilaisista laitoksista, kotitalouksista, vapaa-ajan asunnoista sekä purjeveneistä. Tyypillinen pientuulivoimalan sijoituspaikka on ollut sähköverkon kantamattomissa akkujen lataukseen käytettynä. Nykyisin sähköverkon piiriin rakentaminen on yleistynyt. Sähköverkon piirissä se lisää käyttäjän omavaraisuutta sekä pienentää sähkölaskua. Pientuulivoiman tyypillisiä käyttökohteita ovat (6)

- akkujen lataus ja niiden kautta sähköön käyttö 12 - 230 V:n järjestelmissä
- rakennuksen lämmitysjärjestelmän vesivaraajaan lämmitysenergian tuottaminen
- lämpimän käyttöveden lämmitysenergian tuottaminen
- omakotitalon sähköverkkoon suora sähköntuotanto, jolloin sähkö muunnetaan tavalliseksi verkkosähköksi ja voimala kytketään sulaketauluun ja yli- ja alijäämä otetaan tai annetaan valtakunnalliseen sähköverkkoon.

Määritelmän mukaan pientuulivoimala on voimala, jonka potkurin pinta-ala on alle 200 m². Tällöin lavan maksimipituudeksi tulee noin 8 m. Käytännössä pientuulivoimalan määritelmä tarkoittaa alle 50 kW:n voimaloita. Tyypilliset kesämökille asennettavat laitteet ovat muutaman sadan watin teholuokassa ja verkkoon kytkettävät tai lämmityskäytössä olevat voimalat yli 2 kW tehoisia. (4, s. 122; 7.)

Pientuulivoimalamääritelmän suurin kokoluokka sisältää varsin suuria laitteita ja on vaikea kuvitella, että varsinkaan yksityishenkilöllä olisi resursseja ja tarvetta moiselle voimalaitokselle. Tyypilliset mastonkorkeudet pientuulivoimaloille ovat noin 5 - 30 m. Pientuulivoimaloiden etu sijoituksessa teollisen mittakaavan voimalaitoksiin on erilaisten rakennusten korkeuden hyödyntäminen. Näin päästään helposti tehollisiin korkeuksiin. (4, s. 122; 7.)

Pientuulivoimalan luvan saaminen ei ole kovin yksiselitteistä, joten tyhjentävää vastausta ei voida antaa. Käytännön kokemukseen perustuen pelkkä toimenpidedelupa on riittävä valtaosassa Suomen kuntia. Luvan saa sitä helpommin, mitä

pienemmästä voimalasta on kyse. Mikäli kyse on taajamien kaava-alueesta, voi lupa olla hankalammin saatavissa. Lisäksi on tarkistettava tarkasti, onko suunnitellun sijoituspaikan alueella lentopaikkoja, varalaskupaikkoja yms. Tällöin Ilmailulaitos puuttuu luvan saantiin. Vähintäänkin tällaisella alueella masto tulee merkitä lentoestemerkinnein. (4, s. 120; 13, s. 8.)

3 MASTORAKENTEIDEN SUUNNITTELUN LÄHTÖKOHTIA

3.1 Mastojen tyypit

Mastot voidaan lukea kahteen eri päätyyppiin, vaijereilla tuettuihin, eli harustettuihin mastoihin ja vapaasti seisoviin mastoihin. Harustetut mastot ovat tyypillisesti poikkileikkaukseltaan kolmion muotoisia ristikkomastoja ja varsin siroja. Harustetun maston poikkileikkauspinta-ala ei yleensä muutu maston eri kohdissa. Toisin sanoen masto ei kapene alhaalta ylöspäin. Harustetut mastot ovat hyvä vaihtoehto paikkoihin, joissa on paljon tilaa ja harusvaijereista ei ole haittaa kulkemiselle tai muille rakennuksille. Lisäksi harustettu masto on tyypillisesti kaikkein edullisin. Kuvassa 1 on esitetty harustettu masto. (12; 13, s. 8.)



KUVA 1. Harustettu masto (13)

Vapaasti seisovat mastot voidaan jakaa ristikkomastoihin ja putkimastoihin. Vapaasti seisovien mastojen etuna voidaan katsoa olevan pienempi tilantarve, kuin harustetuilla mastoilla. Tästä syystä ne sopivat asutukseen paremmin kuin harustetut mastot. Vapaasti seisovat ristikkomastot ovat lähes poikkeuksetta alhaalta ylöspäin kapenevia. Yleisimmät poikkileikkaukset ovat joko kolmion tai neliön muotoiset. Putkimasto on kaikista mastoista huomaamattomimman näköinen, mutta toisaalta myös selvästi kallein. Kuvassa 2 on esitetty vasemmalla vapaasti seisova ristikkomasto sekä oikealla putkimasto. (12; 13, s. 8.)



KUVA 2. Vasemmalla vapaasti seisova ristikkomasto, oikealla putkimasto (12; 14)

3.2 Ristikko

Tyypillisesti ristikkoita käytetään eniten kattorakenteissa. Ristikot ovat sauvojen muodostamia kehärakenteita. Ristikon rakenneosia ovat nivelet, sauvat, palkit ja köydet. Ideaaliristikko, jossa sauvat rasittuvat vain vedettyinä tai puristettuina, on ristikon perusmuoto. Tämän perusmuodon käyttäytyminen voidaan analysoida ilman laskentaohjelmiäkin. Ideaaliristikko koostuu kolmion muotoon liitettyistä nivelnurkkaisista sauvoista muodostaen kantavan rakenteen. Sauvoissa vallit-

see puhdas aksiaalinen voimatila vetävänä tai puristavana. Sauvat liittyvät ideaalisessa ristikoissa vain päätepisteissä eli ristikon nurkissa. Ideaaliristikkoa voidaan kuormittaa vain nurkkapisteistä tai solmuista. Todellisen ristikon nurkat eivät käytännön syistä voi olla niveliä, joten niissä on aina kiertymäjäykkyyttä. Ristikoiden parresauvoissa voi myös esiintyä taivutusrasituksia, jos esimerkiksi jotakin parretta kuormitetaan. (15, s. 76 - 77; 16, s. 189.)

Ristikkorakenteet voidaan valmistaa siten, että ne toimivat lähes ideaaliristikon tapaan, ja sauvoihin kohdistuvat kuormitusvoimat voidaan ottaa huomioon erikseen. Tällöin kannattaa nurkkien paikat ja sauvojen suunnat suunnitella niin, että sauvojen akselit leikkaavat toisensa ideaaliristikon nurkkapisteessä tai mahdollisimman lähellä sitä. Paarteissa, jossa esiintyy taivuttavaa kuormitusta, valitaan nurkkapisteiden välit tarpeeksi lyhyiksi, jotta normaalivoimasta ja momentin vaikutuksesta aiheutuva yhdistetty rasitus ei kuormita sauvaa liiaksi. (15, s. 76 - 77.)

Ristikon kaikkien sauvojen ollessa samassa tasossa kutsutaan ristikkkoa tasoristikoksi. Koska mastot ovat kolme- tai neljäpaarteisia, tasoristikoilla ei pystytä kuvaamaan tilannetta, vaan tarvitaan avaruusristikkkoa, joka kykenee kolmiulotteiseen malliin. (15, s. 76 - 77.)

3.3 Suunnitteluperusteet

Yleisesti teräsrakenteita suunniteltaessa rakennesuunnittelun tärkeimmät osatehtävät ovat

- rungon valinta
- liikuntasauvojen paikkojen määrittäminen
- rakenneosien mitoitus
- liitosten suunnittelu
- rakenteiden jäykistämisen suunnittelu
- korroosion estäminen ja pintakäsittelyn suunnittelu (15, s. 27.)

Rungon valinta käsittää runkojärjestelmän, päämittojen, liitostapojen sekä käytettävien aineiden ja tarvikkeiden valinnan. Mainittujen asioiden onnistuneesta

valinnasta riippuu ratkaisevasti asetetut taloudelliset ja toiminnalliset tavoitteet. Runkojärjestelmää valittaessa on käytön asettamien vaatimusten lisäksi huomioitava perustamis- ja ympäristöolosuhteet, rakennusaika, laajennustarve, konepajavalmistus, kuljetus- ja asennustyöt sekä käyttötarkoituksen muutostarpeet. Suunniteltaessa rakenneosia ja niiden liitoselemiä tärkeimmät huomioon otettavat seikat ovat

- taloudellisuus
- kuormien aiheuttamat rasitukset
- muodonmuutokset
- palonkestävyys
- konepajavalmistus
- korroosion esto ja pintakäsittelyt
- kuljetus ja asennus. (15, s. 27.)

Suunniteltaessa teräsrakenteisiin liitoksia on hyvä tiedostaa, että niiden osuus suunnittelu- ja valmistustyöstä on huomattava. Liitostapa ja sen muotoilu vaikuttaa suuresti liitoksen jäykkyyteen. Tämä taas vaikuttaa voimasuureiden jakautumiseen ja rakenteen toimintatapaan sekä kustannuksiin. (15, s. 27.)

Suunniteltaessa yksityiskohtia tulee niihin kiinnittää huomiota riittävästi, koska teräsrakenteille luonteenomaiset hoikat ja keveät rakenteet lähes poikkeuksetta tarvitsevat erilaisia jäykisteitä toimiakseen halutulla tavalla. Jäykisteitä tarvitaan myös vaakavoimia vastaan, keskitettyjen kuormien aiheuttamien paikallisten rasitusten jakamiseen, lommahduksen, taivutettujen sauvojen kiepahduksen ja puristettujen sauvojen nurjahduksen estämiseen. Tyypillinen teräsrakenteiden suunnitteluprojektin kulku on seuraava:

- rungon valinta
- alustava mitoitus
- voimasuureiden tarkka laskenta
- rakenneosien mitoitus
- liitosten mitoitus
- palomitoitus
- jäykisteiden ja runkoa täydentävien rakenteiden mitoitus

- pintakäsittelyjen suunnittelu
- asennuksen rakennesuunnittelu
- yksityiskohtien suunnittelu
- konepajapiirustusten laadinta. (15, s. 27.)

Järjestyksen ja sisällöstä voidaan toki poiketa projektista toiseen. Järjestykseen vaikuttavat muun muassa valittu runkotyyppi sekä odotettavissa olevat rasitukset. Järjestys ei myöskään ole peräkkäinen, vaan eri osat limittyvät keskenään. (15, s. 27.)

Runkoa valittaessa on oltava selvillä ympäristö- ja perustamisolosuhteet sekä rakenteille odotettavat kuormitukset. Alustavan mitoituksen tarkoitus on määrittää rakenneosien mitoitus sekä liitostavat alustavasti myöhempää tarkempaa analyysiä varten. On suositeltavaa, että alustava mitoitus suoritetaan käsinlaskentana. Näin saadaan rakenteiden toimintavasta parempi käsitys sekä rasituksen suuruusluokka selville ennen tietokoneohjelmia. Näin toimien havaitaan myös helpommin ohjelmaan syötetyt virheet. Rakenneosien mitoitus sekä voimasuureiden tarkassa mitoituksessa käytetään yleensä tietokoneohjelmistoja. (15, s. 27.)

3.4 Roottoriin ja mastoon vaikuttavat voimat

Tuulivoimalan maston kuormituksen yksinkertainen tarkastelu on suoritettava, kun aletaan mitoittaa tuulivoimalaitosta ja sen mastoa. On huomioitava, että tämä tarkastelu on karkea, mutta siitä selviävät karkeasti tuulen aiheuttamat staattiset kuormitukset. Tarkemmassa tarkastelussa voitaisiin ottaa huomioon esimerkiksi värähtelyt sekä lumen ja jään kertyminen mastoon ja roottoriin. Lumi- ja jääkuorman merkitys kasvaa sitä suuremmaksi, mitä korkeammalla merenpinnasta masto on. Roottoriin kohdistuva tuulikuorma, F_{rvv} , lasketaan kaavalla 1. (17.)

$$F_{rvv} = \frac{1}{2} * C_t * \rho * A_r * V^2$$

KAAVA 1

F_{rvv} = roottoriin kohdistuva vaakavoima, (N)

C_t = työntökerroin, 8/9

ρ = ilman tiheys, $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$

A_r = roottorin lapojen pyörähdyspinta-ala, (m^2)

V = tuulen maksiminopeus, $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$

Roottoriin vaikuttavan vaakavoiman lisäksi mastoon kohdistuu sen omaan pinta-alaan tuulen aiheuttama tuulikuorma. Mastoon suoraan kohdistuva tuulivoima on yleensä paljon pienempi kuin roottoriin kohdistuva, mutta silti merkityksellinen mastoa mitoitettaessa. Mastoon kohdistuva tuulikuorma, F_{mtk} , lasketaan kaavalla 2. (17.)

$$F_{mtk} = \frac{1}{2} * C_d * A_m * V^2$$

KAAVA 2

F_{mtk} = mastoon kohdistuva tuulikuorma, (N)

V = tuulen maksiminopeus, $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$

C_d = ilmanvastuskerroin, 1,0 (liikiarvo)

ρ = ilman tiheys, $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$

A_m = mastoon kohdistuvan tuulensuunnan projektiopinta-ala, (m^2)

Ilmanvastuskertoimena käytetään yksinkertaista kerrointa 1,0, joka on liikiarvo. Maston tuulikuorman osuuden kasvaessa merkittäväksi selvitetään ilmanvastuskerroin tarkasti. Roottorin ja maston tuulikuormien lisäksi otetaan luonnollisesti huomioon myös maston oman massan painovoima sekä maston päähän sijoitettavan turbiinin massan painovoima. (17.)

3.5 Materiaalit

Materiaalin valinnalta on varsin olennainen osa rakenteen suunnittelua. Huolellisella materiaalin valinnalla varmistetaan, että rakenne säilyttää tarvittavan luotettavuustason suunnitellun käyttöikänsä, kestää kaikki todennäköiset kuormat ja vaikutukset sekä säilyttää käyttökelpoisuutensa tarkoituksessaan. Materiaalin valitsijan tulee olla riittävän osaava ja huolellinen ja valinnan tulee perustua alan tietouteen ja hyvään tapaan. (18.)

3.5.1 Teräs

Teräs on tärkein käyttömetalli. Moniin muihin rakennusmateriaaleihin verrattuna teräs on poikkeava suuren lujuutensa ansiosta. Lisäksi teräksen ominaisuudet ovat muokattavissa seostuksen ja valmistusprosessin avulla. Tästä syystä teräslajeja on olemassa tuhansia. Maston teräsmateriaaleista soveltuvimmat ovat rakenneteräkset sekä erikoisteräkset, joihin kuuluvat mm. ruostumattomat, ha-
ponkestävät ja säänkestävät teräkset. (19.)

Eri teräksillä on erilaisia lujuusominaisuuksia, joihin vaikutetaan koostumuksella sekä valmistusprosessin avulla. Näin eri teräksiä valitsemalla voidaan vaikuttaa rakenteen dimensioihin. Pelkästään lujuuden perusteella mitoitettaviin rakenteisiin on edullista valita teräs, jolla on korkea myötöraja. Tällöin päästään pienempiin materiaali- ja työkustannuksiin. Rakenteissa, joissa kuormitus on puristusta ja jotka ovat alttiita nurjahdukselle, ei lujuutta kasvattamalla voida pienentää mittoja merkittävästi. Tällöin lujuutta tärkeämpi ominaisuus on kimmokerroin. Teräksen kimmokerroin on kaikille teräslaaduille lähes sama, noin 210 GPa. Näin nurjahdukselle alttiiden rakenteiden vahvistaminen tarkoittaa suurempien halkaisijoiden ja materiaalipaksuuksien käyttöä (15 s. 28 - 29; 19.)

Teräksen yleisiä etuja ovat suuri lujuus, hyvä lujuus-painosuhte, pienen rakennemittojen mahdollistamat keveät rakenteet, helpot liitokset ja kiinnitykset, hyvä hitsattavuus, homogeeninen materiaali, hyvä valmistettavuus sekä hyvä kuluksen kestävyys. Teräksen yleisiä haittoja ovat lujuuden mahdollistamien hoikkien rakenteiden mahdollisesti aiheuttamat stabiiliusongelmat, pintojen korrosio-ongelmat ja työmaalla hankala työstäminen. (19.)

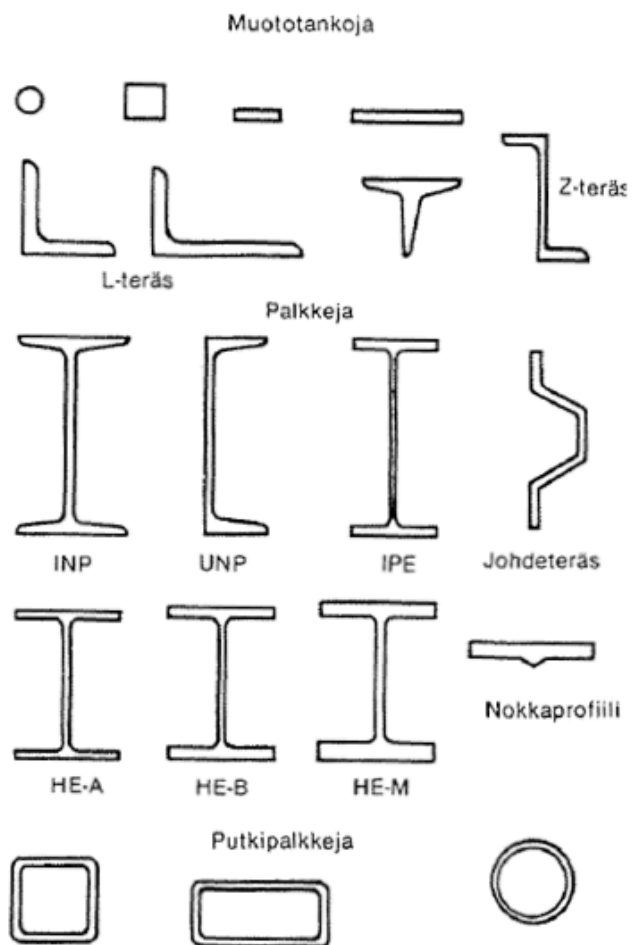
3.5.2 Alumiini

Lujuutensa nähden alumiini on suhteellisen kevyttä. Alumiinilla on myös pieni kimmokerroin, 70 GPa, kolmasosa teräksen kimmokertoimesta. Tästä johtuvat tietyt stabiiliteettiongelmat sekä kuormituksessa suuret taipumat. Kuten teräksen, myös alumiinin lujuus vaihtelee seostuksesta vuoksi. Yleisesti kuitenkin alumiinien lujuus on selvästi pienempi kuin teräksien. (19.)

Alumiinin yleisiä etuja teräkseen verrattuna ovat pienempi tiheys, joka on noin kolmasosa teräksen tiheydestä, parempi korroosion kesto, helppo työstettävyys niin konepajalla kuin työmaalla ja kylmäaurauden puuttuminen. Alumiinin heikkouksia teräkseen verrattuna ovat kalliimpi hinta, heikompi hitsattavuus ja alhaisempi lujuus. (19.)

3.5.3 Rakennetuotteet

Kuvassa 3 on esitetty standardoidut kuumavalssatut poikkileikkaukset. Nämä ovat levytuotteiden ohella yleisemmin tunnettuja ja käytettyjä terästuotteita, niin kantavissa rakenteissa kuin monissa muissakin teräksen käyttökohteissa. Standardoinnin vuoksi kyseisten profiilien saatavuus on laaja, mistä johtuen kyseiset profiilit ovat edullisia verrattuna erikoisempiin profiileihin. (15, s. 23.)



KUVA 3. Erilaisia kuumavalssattuja muototankoja ja profiileja (15, s. 23)

Erilaisissa mastoissa yleisimmin käytetyt profiilit ovat joko L-profiileja tai pyöreitä putkipalkkeja. Nykyisin teräsrakentamisessa rakenneputket ovat merkittävässä asemassa. Ristikkorakenteissa ja pilareissa niiden etu avoimiin muotoprofiileihin verrattuna on suuri taivutus- ja vääntöjäykkyys kaikissa suunnissa. Tästä aiheutuu tavanomaisissa ristikkorakenteiden suunnittelussa etua, koska usein nurjahdusvaara on mitoituksessa määräävä tekijä. Lisäksi suunnittelijan työtä helpottaa tieto siitä, että profiili käyttäytyy jokaiseen suuntaan samoin, toisin kuin avoimet profiilit. (15, s. 23.)

Taulukossa 6 on esitetty yksinkertainen vertailu L-profiilista sekä pyöreästä putkiprofiilista. Poikkileikkauksen pinta-alat ovat lähes samat. Nurjahduksen kannalta tärkeä suure, neliömomentti, on vahvempaan suuntaan noin puolet suurempi muotosulkeisessa, pyöreässä putkessa, kuin avoimessa L-profiilissa. L-profiilin heikompaan suuntaan putkipalkin neliömomentti on noin seitsemän kertaa suurempi. Näin nurjahdusta estäviä vaaka- ja diagonaalitukia tarvitaan huomattavasti vähemmän. Tämä seikka tekee muotosulkeisen putkiprofiilin käytöstä ristikkorakenteissa hyvin suositun. (15, s. 23.)

TAULUKKO 6. Vertailu L-profiilin ja putkiprofiilin välillä (20, s. 772, 792)

Profiili	Seinämän paksuus, t [mm]	Poikkileikkauksen pinta-ala, A [mm ²]	Neliömomentti, I maksimisuunta [mm ⁴]	Neliömomentti, I minimisuunta [mm ⁴]
L 40x40x5	5,0	379	84 400	22 200
D 60,3	2,0	366	156 000	156 000

3.6 Rakenteiden pintakäsittely

Pintakäsittelyä valittaessa otetaan huomioon ympäristön rasitukset, korroosio, kuluminen ja likaantuminen. Teräkselle pintakäsittelyvaihtoehtoja ovat lähinnä sinkitys eri muodoissaan ja maalaus. Sinkityksessä teräksen pintaan lisätään erilaisilla tekniikoilla, kuten kuuma- ja sähkösinkitys, puhdasta tai seostettua sinkkiä. Sinkkikerros suojaa terästä, vaikka sinkki on hyvin epäjalok. Sinkkiker-

rokseen muodostuu tiivis suojaava korroosiotuotekerros eli patina. Patina estää tai ainakin hidastaa korroosion jatkumisen. Toisaalta eteenkin kuumasinkityksessä muodostuva paksu sinkkikalvo suojaa mekaanisesti pintaa esimerkiksi iskuilta. (19.)

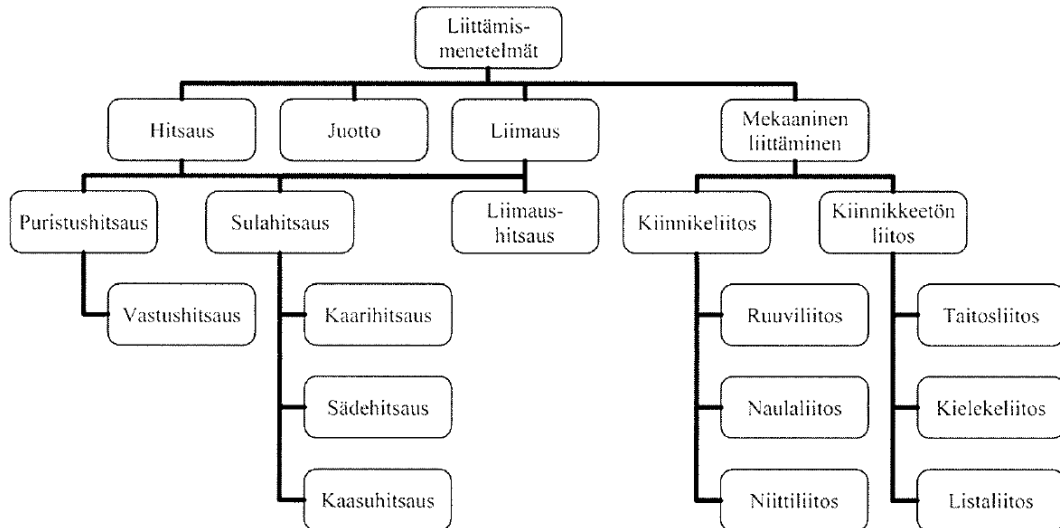
Maalauksen tehtävänä on pysäyttää tai hidastaa sähkökemiallista tai kemiallista korroosiota. Maalipinta estää hapen, veden ja elektronien kohtaamisen teräspinnalla. Myös sinkitty pinta voidaan maalata. Maalauksen etuna on myös valittavissa oleva väri. (19.)

Alumiinien yleisin pintakäsittely on anodisointi. Normaalisti alumiinin pintaan muodostuu hyvin passiivinen, mutta ohut oksidikalvo. Anodisoinnilla tarkoitetaan oksidikerroksen kasvattamista elektrolyyttisellä hapetusprosessilla noin 1 000-kertaiseksi. Anodisoinnilla saadaan aikaan hyvin kova, kulutuksen kestävä ja passiivinen pinta. Myös alumiini on maalattavissa, kuten teräkset. (19.)

3.7 Liitostavat

Isokokoiset tuotteet, joilla on suuri muotojen moninaisuus, tai tuotteet, joista on lukuisia erilaisia versioita, valmistetaan kahdesta tai useammasta osasta. Näitä kutsutaan kokoonpanoiksi. Useampien osien kokoonpanon hyödyt ovat pienemmät osat, joita on helpompi käsitellä, mahdollisuus edullisesti valmistettaviin yksinkertaisiin muotoihin ja mahdollisuus valmistaa osat eri materiaaleista. (21.)

Kokoonpano on tärkeä valmistusvaihe, minkä vuoksi on kehitetty laaja valikoima erilaisia liittämismenetelmiä. Liittämismenetelmät voidaan jakaa karkeasti neljään päätyyppiin, joita ovat hitsaus, juotto, liimaus ja mekaaninen liittäminen. Kuvassa 4 on jaoteltu liittämismenetelmät ja niiden alalajit. Nykyisin vain kaari- ja sädehitsaus ja ruuviliitokset sekä pienin varauksin niittiliitokset tulevat kysymykseen teräs- ja alumiinirakenteissa. Pääsääntöisesti liitoksien suunnittelussa on kyse kestävyiden tarkastamisesta. (19; 21.)



KUVA 4. Teräs- ja alumiinirakenteiden liittämismenetelmät (18, s. 84)

Suunniteltaessa liitoksen geometriaa on otettava huomioon elinkaaren aikaiset vaatimukset ja toisaalta eri toimintoja säätelevät reunaehdot. Huomioon täytyy ottaa ensisijaisesti saatavilla olevat liittämistekniikat erikseen konepajavalmistuksessa ja työmaalla. Teräs- ja alumiinirakenteiden pääsääntönä voidaan sanoa, että hitsausliitoksia käytetään konepajalla ja ruuviliitoksia työmaalla, tietyin poikkeuksin. (18, s. 83.)

3.7.1 Hitsausliitokset

Hitsaus on kappaleiden liittämistä toisiinsa joko sulattamalla liitospinnat tai lämmön ja paineen avulla syntyvällä diffuusioliitoksella. Hitsaus on liittämismenetelmistä yleisin. Hitsaamalla kootut kappaleet ovat yhtenäisiä, eivätkä pysty pysäyttämään murtuman etenemistä, toisin kuin ruuviliitos. Lisäksi värähtelevä kuormitus siirtyy hitsausliitoksen kautta osista toisiin. Ruuviliitos sitoo itseensä osan värähtelevästä energiasta.

Hitsatut liitokset ovat jäykempiä kuin ruuviliitoksilla kokoonpantu kokoonpano. Hitsaukseen keskeisesti liittyvä nopea lämmöntuonti ja jäähtyminen voivat merkittävästi muuttaa kappaleiden materiaalien rakennetta ja lisätä erilaisia jännityksiä kappaleeseen. Tämä tulee huomioida liitosmenetelmää valittaessa. (22.)

3.7.2 Ruuvi- ja niittiliitokset

Ruuviliitos on koneenrakennuksessa yleisin irrotettavissa oleva liitos. Syynä tähän on liitoksen helppo ja nopea avattavuus ja purettavuus. Ruuviliitos on oikeinkäytettynä luotettava ja sitä voidaan käyttää monenlaisissa eri olosuhteissa. Standardikiinnikkeet ovat lisäksi halpoja liitoselimiä. Niittiliitosten katsotaan toimivan samoin kuin ruuviliitokset. (21.)

Kuten kaikilla liitosmenetelmillä, myös ruuviliitoksilla on haittapuolensa. Näitä ovat liitoksen luotettavuus, joka riippuu suurilta osin vaikeasti hallittavasta kiristysmomentista. Ruuveille on ominaista väsyminen ja itseavautuminen, joka on seurausta usein väärästä esikiristysvoimasta. Ruuveissa on lisäksi epäjatkuvuuskohtia, joissa jännityshuiput ovat suuret. Tyypillisesti ruuviliitoksissa kuormittavat voimat ovat ruuvin akselin suuntainen voima sekä tätä vastaan kohtisuorassa oleva leikkausvoima. (21; 23.)

3.8 Lainsäädäntö ja standardit

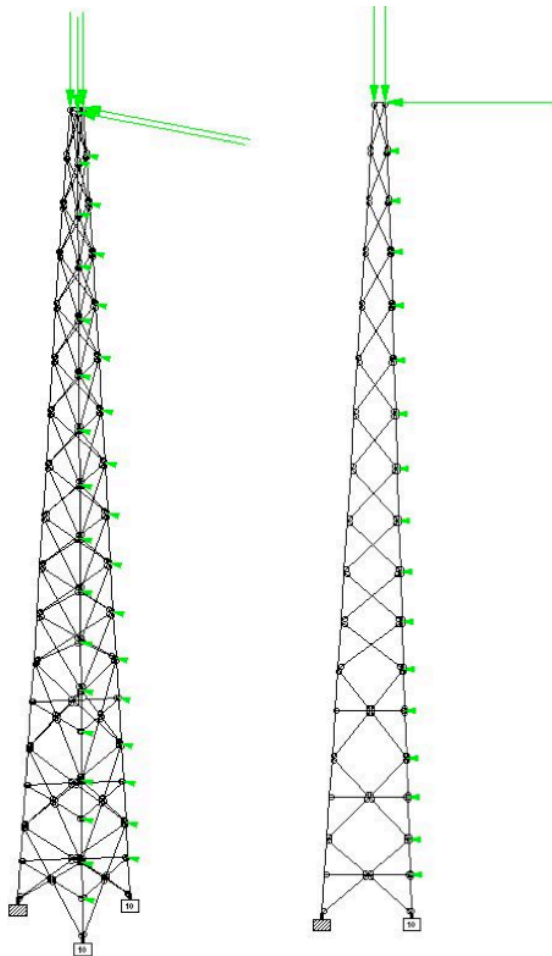
Tässä työssä käytetyt keskeisimmät standardit ovat teräsrakenteiden suunniteluun ja mitoitukseen liittyviä standardeja sekä niitä selventäviä oppi- ja käsikirjoja. Käytetyt ohjeet ovat seuraavat:

- opas Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus EUROCODE 3 -oppikirja. (15)
- standardi SFS-EN 1993-1-1. 2005. EUROCODE 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt (24)
- standardi SFS-EN 1993-1-8. 2005. EUROCODE 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten mitoitus. (25)
- standardi SFS-EN 1993-3-1. 2006. EUROCODE 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 3-1: Mastot ja savupiiput. Mastot. (26)
- Rautaruukin opas Rakenneputket. EN 1993 -Käsikirja. 2012. (27).

4 MASTOON KOHDISTUVAT KUORMAT

Mastoon kohdistuu kuormia, joiden perusteella maston mitoitus suoritetaan. Osa kuormista on tärkeämpiä kuin toiset johtuen niiden sijainnista mastossa, voiman suunnasta sekä niiden suuruudesta. Olisi hyvä, että kuormat tiedettäisiin mahdollisimman tarkasti, mutta työn luonteen kannalta se on hankalaa.

Mastoon sijoitettavan tuuliturbiinin pyyhkäisyypinta-ala ja työntövoimakerroin ovat aina tuuliturbiinikohtaisia. Järkevän, turvallisella puolella olevan työntövoimakertoimen hakeminen osoittautui erääksi työn hankalimmaksi osaksi. Kuvassa 5 on 30 m maston rakenne, kuormat ja niiden vaikutuspisteet. Kuormat on kuvattu vihreillä nuolilla ja niiden suuruus on suoraan verrannollinen nuolien pituuksiin. Rakenteen oman raskon vaikutusta ei ole kuvattu.



KUVA 5. 30 m korkean maston ristikkorakenne ja kuormitukset

4.1 Roottoriin kohdistuva tuulikuorma

Roottoriin tuulesta kohdistuva vaakasuuntainen kuorma on työssä mitoitettujen mastojen kannalta kaikkein tärkein kuorma. Tämä johtuu roottorin sijainnista aivan maston huipulla, jolloin voiman etäisyys maston alimpiin osiin on suuri. Lisäksi roottoriin kohdistuva tuulikuorma on suurin yksittäinen kuorma. Kaavassa 1 on esitetty voiman olevan riippuvainen tuulennopeudesta V , ilmantiheydestä ρ , pyyhkäisy-pinta-alasta A_r ja työntövoimakertoimesta C_t .

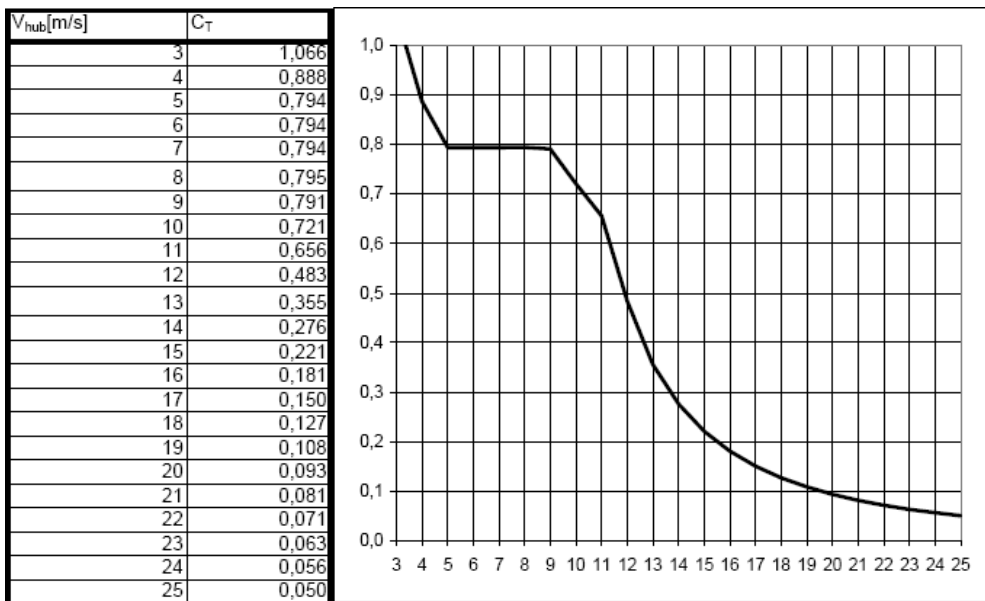
Mastoa ei suunniteltu vain yhdelle tietylle tuuliturbiinille, vaan tavoite on, että asiakas voisi kiinnittää tietyn tehoisen tuuliturbiinin mastoon. Siksi pyyhkäisy-pinta-ala ja työntövoimakerroin eivät ole vakioita, vaan turbiinikohtaisia. Lisäksi työntövoimakerroin on tuulennopeuden funktiona muuttuva luku. Työntövoimakerroin pienenee tuulennopeuden kasvaessa, mikä on maston suunnittelun kannalta edullista. Näin roottorin tuulikuorma ei kasva suoraan verrannollisesti tuulennopeuteen, vaan tuulikuorma pysyy kohtuullisena.

Laskussa käytetty pinta-ala selvitettiin internetistä etsimällä kahdenkymmenen eri valmistajan 10 kW tuuliturbiineita ja taulukoimalla niistä valmistaja, malli, nimellisteho [kW], roottorin pyyhkäisy-pinta-ala [m^2], laskettu teho-pinta-alasuhde ja nimellistehoon tarvittava tuulennopeus. Pyyhkäisy-pinta-aloista laskettiin keskiarvo ja siihen lisättiin vielä varmuudeksi keskihajonta. Näin ollaan varmalla puolella. Liitteessä 1 on esitetty etsityt tuuliturbiinit ja lasketut arvot. Näin saatu pyyhkäisy-pinta-ala on $61,7 m^2$.

Työntövoimakerroin on vaikein selvitettävä turbiinin tuulikuorman muuttujista. Kaikista pientuulivoimaturbiineista ei ole saatavilla työntövoimakerointa, ainakaan taulukkona. Internetistä kuvahauulla löytyy aiheesta paljon kuvaajia. Työntövoimakertoimessa päädyttiin varmanpuolella olevaan lukuun, 0,5. Tämä perustellaan seuraavasti: Mastot mitoitettiin standardin mukaan tuulennopeudelle 21 m/s. Yhdessäkään löydetyssä työntövoimakeroinkuvaajassa ei ole työntövoimakeroin lähelläkään 0,5:tä 21 m/s tuulennopeuksilla. Täten voidaan todeta työntövoimakertoimena käytetyn arvon 0,5 olevan varmalla puolella ja siten turvallinen.

Taulukossa 7 on esitetty Indigon valmistaman 1 200 kW tehoisen Vensys 64 -tuuliturbiinin työntövoimakerron. Esitetty turbiini on tehoiltaan eri kokoluokassa kuin työssä suunniteltaviin mastoihin sijoitettavat turbiinit. Taulukosta voidaan kuitenkin arvioida käytetyn työntövoimakertoimen arvoa ja etenkin sen ylimitoitusta. (28.)

TAULUKKO 7. Vensys 64 työntövoimakerron C_t suhteessa tuulennopeuteen (28)



Työntövoimakertoimen käytön olisi voinut kumota sijoittamalla roottorin pyyhkäisy-pinta-alan kokoinen levy kuvaamaan turbiiniin aiheutuvaa tuulikuormaa, mutta se ei tunnu lainkaan todellista tilannetta kuvaavalta. Myös teoriaosassa esitetty 8/9 on maston mitoituksen kannalta liian suuri, koska se on teoreettinen maksimi, joka saattaa esiintyä vain aivan pienimmällä tuulen nopeuksilla, esimerkiksi alle 5 m/s. Näin päädyttiin työntövoimakertoimeen 0,5.

Ilman tiheys valittiin 0 °C normaalissa ilmanpaineessa 101,325 kPa. Näin ilman-tiheydeksi tulee 1,293 kg/m³ (20, s. 315). Roottorin vaakavoima lasketaan kaavan 1 avulla.

$$F_{rvv} = \frac{1}{2} * C_t * \rho * A_r * V^2 = \frac{1}{2} * 0,5 * 1,293 \frac{kg}{m^3} * 61,7m^2 * \left(21 \frac{m}{s}\right)^2 = 8\,795,5\,N$$

4.2 Roottorin painon aiheuttama kuorma

Myös roottorin paino on luonnollisesti roottorikohtainen muuttuja. Roottorin valmistajat ja myyjät eivät ole kokeneet sitä tärkeäksi ilmoittaa. Tämä selittyy osin sillä, että sen merkitys maston kannalta on paljon vähäisempi kuin roottorin tuulikuorman. Roottorin painosta aiheutuva kuorma on maston kuvitteellisen akselin suuntainen. Suurin internetistä etsimällä löydetty 10 kW tuuliturbiinin paino oli 650 kg. Sen painon aiheuttama voima on laskettu kaavalla 3 (20, s. 193).

$$F_{rpv} = m_r * g$$

KAAVA 3

m_r = on roottorin massa, (kg)

g = maan putoamiskiihtyvyyden, ($\frac{kg}{m^2}$)

Roottorin painon aiheuttamaksi voimaksi saadaan $F_{rpv} = 650 \text{ kg} * 9,81 \frac{m}{s^2} = 6376,5 \text{ N}$. Koska masto haluttiin mitoittaa mahdollisimman monelle eri tuuliturbiinille, käytettiin mitoituksessa edellä laskettua hiukan suurempaa arvoa, 7 500 N. Näin päästään varmalle puolelle roottorin painon aiheuttaman kuorman arvioimisessa.

4.3 Mastoon tuulikuorma

Mastoon tuulesta aiheutuva kuorma laskettiin kaavalla 2. Tuulikuorman vaikuttaa ilmanvastuskerroin C_d , pinta-ala A_m ja tuulennopeus V . Pinta-ala on maston mitoista ja käytetyistä profiileista muodostuva, joten sille ei voitu antaa alkuarvoissa tarkkaa arvoa, vaan esitettiin arvaus. Todellisempi tuulikuorma muodostui vasta suunnitteleamalla ja iteroimalla mastoa valmiiksi saakka. Tällöin pinta-ala muodostui paarteiden pituudesta ja leveydestä sekä diagonaalien pituuksista ja leveyksistä. Lisäksi on otettava huomioon, että tuulen suunnan projektiopinta-ala on pienempi kuin bruttopinta-ala. Kahden eri maston tuulikuormat on esitetty taulukossa 8.

TAULUKKO 8. 21 m ja 30 m mastojen tuulikuormat

Suure	21 m masto	30 m masto
Paarteiden pinta-ala A_m , [m ²]	4,79	6,85
Paarteen Ilmanvastuskerroin C_d , []	1	1
Diagonaalejen pinta-ala A_m , [m ²]	8,56	16,31
Diagonaalin Ilmanvastuskerroin C_d , []	0,8	0,8
Tuulenoisuus V , [m/s]	21	21
Ilman tiheys ρ , [kg/m ³]	1,293	1,293
Projektiopinta-alasta johtuva pinta-alan piennyskerroin, []	0,83	0,83
Maston tuulikuorma F_{mtk} , [N]	2765,1	4456,3

4.4 Maston omasta painosta aiheutuva kuorma

Maston oman painon aiheuttama kuormaa ei lasketa käsin, vaan se otetaan huomioon elementtimenetelmällä tarkasteltaessa mastoa. Maston painon laskenta on itsessään helppo, mutta käytetyn ohjelmiston hallitessa rakenteen oman painon huomioimisen ei sitä ole syytä käsin tarkastella. Toisaalta maston dimensioiden muuttuessa jouduttaisiin paino laskemaan aina uusiksi, joten siitäkin syystä on huomattavan paljon helpompi antaa se ohjelmiston laskettavaksi.

5 MASTON SUUNNITTELU

Työn lähtötiedoissa sovittiin tarkasteltavaksi harustettu masto ja vapaasti seisova masto. Lisäksi tavoitteisiin kirjoitettiin mastosarja. Mastojen suunnittelun edetessä kävi nopeasti ilmi, että alkuperäiset tavoitteet olivat opinnäytetyön kannalta liian laajat. Varsinaisen suunnittelutyön alettua pudotettiin harustettu malli pois melko nopeasti. Työn edetessä päätettiin myös luopua mastosarjasta ja suunnitella vain kaksi eripituista mastoa 10 kW tuuliturbiineille.

5.1 Suunnittelun määräävät muuttujat ja lähtökohdat

Työn alussa työn tilaaja kertoi, että hän oli valmistanut neljäpaarteisia mastoja. Hän kuitenkin ajatteli, että kolmipaarteinen on yleisempi ja edullisempi tapa valmistaa masto, muun muassa pienemmän materiaalimenekin vuoksi. Lisäksi liitososia kolmepaarteiseen menee vähemmän kuin neljäpaarteiseen. Neljäpaarteisella mastolla ei voida katsoa olevan mitään suurta hyötyä verrattuna kolmepaarteiseen mastoon. Toisaalta poikkileikkaukseltaan kolmion mallinen masto ei voi toimia mekanismina, kuten neljällä paarteella oleva masto voi toimia ilman ristikkäistä tukemista.

Mastojen pituudet 21 m ja 30 m valittiin seuraavin perustein. Paarteiden raaka-aineina toimivat hyvin saatavilla olevat standardiprofiilit toimitetaan 6 m salkoina. 30 m korkean maston mitta on jaollinen kuudella, joten hukkapaloja ei synny. 21 m korkean maston raaka-aineista syntyy yksi 3 m hukkapala.

Maston suunnittelun kannalta tärkeä seikka on niin sanottujen tasojen määrä. Kahden tason välinen diagonaalien lukumäärä kolmipaarteisella mastolla on kuusi, joten uusi taso tarkoittaa koko maston diagonaalimäärän lisääntymistä kuudella. Mitä useampia tasoja mastossa on, sitä tiheämmäksi ristikko muodostuu. Tiheä ristikko lyhyellä tasojen etäisyydellä tulee painamaan paljon. Toisaalta alhainen tasojen määrä saattaa johtaa paarteiden nurjahduspituuden ylittymiseen. Tasojen määrä on siis syytä optimoida hyvin.

Maston valmistuskustannuksien kannalta edulliseksi havaittiin myös maston jalkovälin kasvattaminen tiettyihin mittoihin saakka. Koska mastoa taivuttaa sen yläpäähän kohdistuva roottorin vaakasuuntainen tuulikuorma, on edullista kasvattaa maston alaosassa jalkoväliä tiettyyn rajaan saakka. Näin päästään pienempään ja edullisempaan paarreprofiiliin. Toisaalta jalkovälin kasvattaminen kasvattaa diagonaalien pituuksia ja aiheuttaa siten materiaalikustannusten kasvamista. Suunnittelussa oli kyse sopivan kompromissin hakemisesta, kuten hyvin usein suunnittelulle tyypillistä on.

5.1.1 Osavarmuusluvut

Mastojen mitoituksen perustana on käytetty standardia mastojen suunnittelusta. Standardin mukaan mastojen luotettavuusluokitteluja on kolme. Taulukossa 9 on esitetty luotettavuusluokat. (26.)

TAULUKKO 9. Mastojen luotettavuusluokat (26, s. 25)

Luotettavuusluokka	
3	Mastot, jotka rakennetaan asutusalueille tai paikoille, jossa niiden vaurioituminen aiheuttaa todennäköisesti loukkaantumisia tai hengen menetyksiä; mastot, joita käytetään erittäin tärkeään teletoimintaan; muut merkittävät rakenteet, joiden vaurioitumisen seuraukset olisivat todennäköisesti erittäin suuret.
2	Kaikki mastot, jotka eivät kuulu luokkiin 1 tai 3.
1	Mastot, jotka rakennetaan miehittämättömille asemille maaseudulla; mastot, joiden vaurioituessa ihmisten loukkaantuminen ei ole todennäköistä.

Mahdollista yritystoimintaa ajatellen emme halunneet rajata mahdollisia asiakkaita asutusalueilta pois, vaan työssä suunnitellut mastot on suunniteltu korkeimman luotettavuusluokan 3 mukaan. Taulukossa 10 on esitetty eri luotettavuusluokkien vaatimat osavarmuusluvut.

TAULUKKO 10. Pysyvien ja muuttuvien kuormien osavarmuusluvut (26, s. 25)

Kuorman vaikutus	Luotettavuusluokka, ks. HUOM. 2.1.2	Pysyvät kuormat	Muuttuvat kuormat (Qs)
Epäedullinen	3	1,2	1,6
	2	1,1	1,4
	1	1,0	1,2
Edullinen	Kaikki luokat	1,0	0,0
Satunnaiset tilanteet		1,0	1,0

Mitoituksen kannalta taulukosta 10 voidaan lukea, että pysyvät kuormat mitoite-
taan osavarmuusluvulla 1,2 ja muuttuvat kuormat osavarmuusluvulla 1,6. Pysy-
viksi kuormiksi katsotaan roottorin paino sekä maston oma massa. Muuttuviksi
kuormiksi katsotaan roottoriin tuulesta kohdistuva vaakavoima sekä maston
tuulikuorma.

5.1.2 Nurjahdus

Maston päämittojen kannalta tärkein lujuustekninen rajoitus on nurjahdus. Mas-
ton ristikkorakenteessa esiintyy pääasiassa vain puristusta ja vetoa. Katsotaan,
että momentteja syntyy ainoastaan profiilien omasta painosta, joten niitä ei nur-
jahduksen yhteydessä oteta huomioon niiden pienuuden vuoksi. Seuraavaksi
on esimerkki paarteen nurjahdusmitoituksesta Rautaruukin oppaan Rakenne-
putket. EN 1993 -Käsikirjan mukaan. Teos pohjautuu yleiseurooppalaiseen te-
räsrakenteiden suunnitteluohjeeseen Eurocode 3:een. Seuraavassa on esitet-
ty tarvittavat kaavat. Puristetun sauvan mitoitusehto nurjahduksessa on esitetty
kaavassa 4. (24; 27, s. 69.)

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

KAAVA 4

N_{Ed} = aksiaalisesti puristetun sauvan puristusvoiman mitoitusarvo, (N)

$N_{b,Rd}$ = aksiaalisesti puristetun sauvan nurjahduskestävyyden mitoitusarvo, (N)

Kaavassa 5 on esitetty putken nurjahduskestävyyden mitoitusarvo $N_{b,Rd}$ (27, s
69).

$$N_{b.Rd} = \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{M1}}$$

KAAVA 5

χ = kyseeseen tulevan nurjahduskestävyyden pienennystekijä

A = bruttopoikkileikkauksen pinta-ala, (m^2)

f_y = materiaalin nimellinen myötölujuus, ($\frac{N}{mm^2}$), taulukko 17

γ_{M1} = kestävyuden osavarmuusluku, taulukko 14

Kaavassa 5 oleva pienennystekijä lasketaan seuraavasti kaavojen 6 - 8 mukaan (27, s. 70).

$$\chi = 1,0 \text{ kun } \lambda \leq 0,2$$

KAAVA 6

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} \leq 1,0 \text{ kun } \lambda > 0,2$$

KAAVA 7

λ = sauvan muunnettu hoikkuus

$$\Phi = 0,5 * [1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \lambda^2]$$

KAAVA 8

α = sovellettavan nurjahduskäyrän mukainen epätarkkuustekijä
(kylmämuovatut rakenneputket: $\alpha = 0,49$)

Kaavan 9 avulla lasketaan putkille muunnettu hoikkuus (27, s. 70).

$$\lambda = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{Cr}}}$$

KAAVA 9

A = bruttopoikkileikkauksen pinta-ala, (m^2)

f_y = materiaalin nimellinen myötölujuus, ($\frac{N}{mm^2}$), taulukko 17

N_{Cr} = kimmoteorian mukainen kriittinen nurjahduskuorma, (N)

Kaavalla 10 lasketaan kimmoteorian mukainen kriittinen nurjahduskuorma (27, s. 70).

$$N_{Cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{L_{Cr}^2}$$

KAAVA 10

E = kimmokerroin, ($\frac{N}{mm^2}$)

I = bruttopoikkileikkauksen neliömometti, (mm^4)

L_{Cr} = sauvan nurjahduspituus, (mm)

A = bruttopoikkileikkauksen pinta-ala, (mm^2)

Seuraavaksi on laskettu esimerkki työssä 21 m maston nurjahdustapauksesta. Lähtöarvot on annettu taulukossa 11.

TAULUKKO 11. Nurjahdustarkastelun lähtöarvot

Suure	Arvo
Profiilin mitat, [mm]	76,1x3,0
Materiaalin myötölujuus, f_y [N/mm^2]	355
Poikkileikkauksen pinta-ala, A [mm^2]	689,0
Taivutusneliömometti, I [mm^4]	460 960,9
Sauvan nurjahduspituus, L_{cr} [mm]	1854,0
Kimmokerroin, E [N/mm^2]	210 000
Kestävyyden osavarmuusluku, γ_{M1} []	1,0
Puristusvoiman mitoitusarvo, N_{ed} [N]	145 000

Lasketaan kimmoteorian mukainen kriittinen nurjahduskuoma kaavalla 10.

$$N_{Cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{L_{Cr}^2} = \frac{\pi^2 * 210\,000 \frac{N}{mm^2} * 460\,960,9 \, mm^4}{(1750 \, mm)^2} = 311\,966 \, N$$

Seuraavaksi lasketaan muunnettu hoikkuus kaavalla 9.

$$\lambda = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{Cr}}} = \sqrt{\frac{689,0 \, mm^2 * 355 \frac{N}{mm^2}}{311\,966 \, N}} = 0,885\,462 \approx 0,885$$

Tämän jälkeen lasketaan nurjahduksen pienennystekijä χ kaavoilla 6 - 8.

$$\Phi = 0,5 * [1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \lambda^2] = 0,5 * [1 + 0,49(0,885 - 0,2) + 0,885^2]$$

$$\Phi = 1,05944 \approx 1,059$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} \leq 1,0 = \frac{1}{1,059 + \sqrt{1,059^2 - 0,885^2}} = 0,609534 \approx 0,610 \leq 1,0$$

Seuraavaksi lasketaan nurjahduskestävyyden mitoitusarvo kaavalla 5.

$$N_{b.Rd} = \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,610 * 689 \text{ mm}^2 * 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1,0} = 149203 \text{ N} \approx 149 \text{ kN}$$

Lopuksi tarkastetaan puristetun sauvan mitoitusehto nurjahduksessa kaavalla 4.

$$N_{Ed} \leq N_{b.Rd} = 145000 \text{ N} \leq 149000 \text{ N}$$

Kaavan 4 ehto täyttyy, joten todetaan, että valittu parreprofiili kestää mitoituskuorman. Opinnäytetyössä kaikki nurjahdukset on käsitelty edellä kuvatuin tavoin.

5.1.3 Hoikkuus

Hoikkuus rajoittaa sekä parre- ja diagonaalisauvojen maksimipituutta. Mastostandardin suositukset mukaan hoikkuusluku pitäisi yleensä olla paarteilla pienempi kuin 120 ja vinositeillä pienempi kuin 180. Hoikkuus lasketaan profiilille kaavan 11 mukaan. (20, s. 472; 26, s. 65 - 66).

$$\lambda = \frac{l_n}{i} \quad \text{KAAVA 11}$$

l_n = nurjahduspituus, (mm)

i = hitaussäde, (mm)

Hitaussäde lasketaan kaavan 12 mukaan (20, s. 473).

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad \text{KAAVA 12}$$

I = neliömomentti, (mm^4)

A = poikkileikkauksen pinta-ala, (mm^2)

Taulukossa 12 on esitetty kyseisten profiilien hoikkuudet työssä esiintyvien maksimipituuksien mukaan laskettuna. Taulukosta nähdään, että diagonaaleilla käytetyt litteänsioikeiden ohutseinäputkien hoikkuudet ylittävät suositusarvot. Ylitys on kuitenkin varsin vähäinen ja valtaosa litteänsioikeista ohutseinäputkista kuitenkin alittaa suosituksen. Lisäksi ilmoitetut suurimmat mitat mastossa ovat solmupisteiden välisiä etäisyyksiä, joten profiilin todellinen mitta on noin 5 - 10 % pienempi. Näillä perusteluilla voidaan pienet ylitykset suositusarvosta hyväksyä.

TAULUKKO 12. Mastoissa esiintyvien hoikkuuslukujen maksimiarvot

Suure	Rakenne-putki	Litteänsioikeat ohutseinäputket	
Profiilin mitat	76,1x3,0	50x30x1,25	78x38x1,25
Poikkileikkauksen pinta-ala, A [mm^2]	689,0	112,9	144,3
Taivutusneliömomentti, I [mm^4]	460 960,9	11 687,0	24 391,8
Profiilin suurin mitta mastossa, L_{pro} [mm]	2 004	1 908	2 377
Hitaussäde, i [mm]	25,9	10,2	13,0
Hoikkuus, λ []	77,5	187,5	182,8
Hoikkuussuositus, λ []	120	180	180

5.2 Maston mitoitus

Maston mitoituksen perusta, vaikuttavien kuormien mitoitus, on esitetty edellä luvussa 4. Kun nämä lähtötiedot olivat suurilta osin tiedossa riittävän tarkkaan, siirryttiin suunnittelussa maston mittojen ja profiilien suuruusluokan hakemiseen. Mitoista ja profiilien ulkomitoista johtuen kuitenkin maston tuulikuorma muuttui, ja se piti ottaa huomioon maston mallintamisen jälkeen.

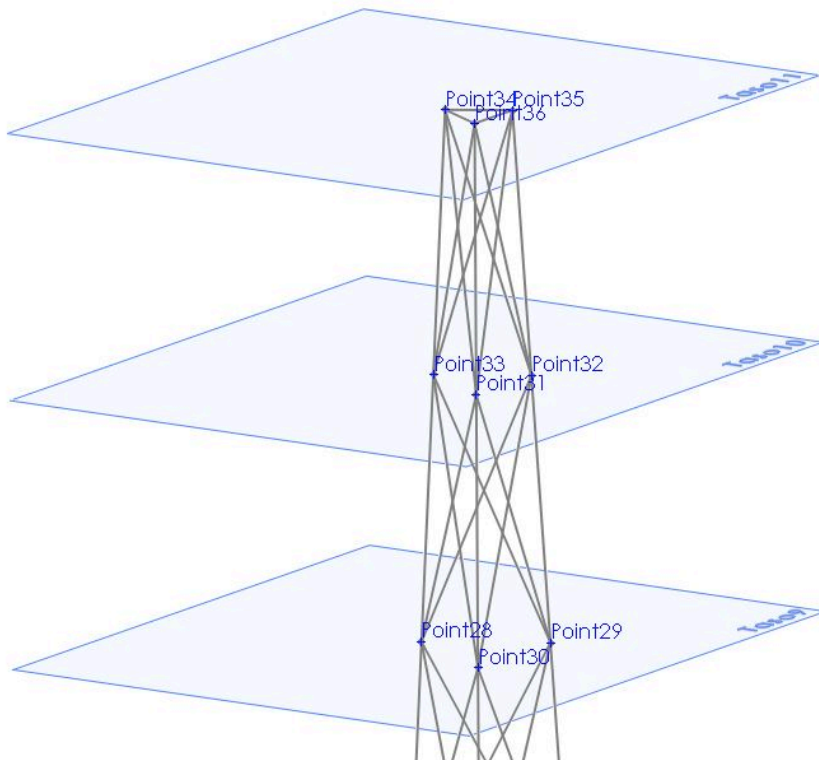
Ensimmäisellä kerralla sopivahkot mitat arvattiin ja syötettiin FEM-ohjelmistoon. Mitat myös arvattiin tahallisesti alakanttiin, jotta tilannetta päästiin tarkastelemaan halutusta suunnasta. Työssä FEM-ohjelmistona käytettiin QSE Space-ohjelmistoa. Maston analyysin jälkeen muutettiin maston mittoja analyysitulosten mukaan. Näin toimittiin niin kauan, kunnes jo analyysien edetessä sopiviksi valitut profiilit eivät enää riittäneet. Tällöin palattiin maston malliin ja mittoihin, jotka vielä kestivät kuormien vaikutukset ja suoritettiin viimeiset pienet muutokset. Maston mitoitus on kuvattu seuraavassa.

5.2.1 Maston mallintaminen 3D-CAD-ohjelmistolla

FEM-ohjelmistona käytetty QSE Space ei tarjoa edistyksellistä mahdollisuutta rakentaa solmupisteverkkoa, vaan solmupisteverkko syötettiin käsin QSE:hen. Sopiva solmupisteverkko mallinnettiin 3D-CAD-ohjelmistolla, Dassault Systemesin SolidWorksilla. SolidWorksilla mallinnus tapahtui siten, että piirrettiin kahdelle eri samansuuntaiselle tasolle maston poikkileikkauksen muotoiset kolmiot. Tasojen väli oli mastojen korkeusmitta. Alakolmion kärkien pisteistä piirrettiin suorat viivat yläkolmion vastaaviin pisteisiin. Nämä viivat kuvasivat maston paarteita. Mallin origo sijoitettiin yhden paarteen alapäähän.

Maston malliin tehtiin tasoja mastoon lisäämällä SolidWorksissa samansuuntaisia tasoja tietyille etäisyyksille toisistaan kahden jo tehdyn tason väliin. Näiden tasojen ja paarteita kuvaavien viivojen leikkauspisteisiin sijoitettiin pisteet. Nämä pisteet kuvaavat maston solmupisteverkkoa. Pisteet yhdistettiin viivoilla, jotka kuvaavat maston diagonaaleja.

SolidWorksissa mittatyökalulla valitsemalla piste saadaan sen koordinaatit mallin origon suhteen x-, y- ja z-suunnassa. Maston kaikki solmupisteiden koordinaatit kirjattiin käsin ylös. Näin saatiin SolidWorksilla rakennettua maston solmupisteverkko. Myös samalla paarre- ja diagonaalisauvojen pituudet otettiin ylös Excelillä tehtyyn asiakirjaan maston tuulikuormien ja painon laskemiseksi. Kuvassa 6 on esitetty 30 m korkean maston kolme ylintä tasoa, solmupisteet, paarteet ja diagonaalit.



KUVA 6. Maston kolme ylintä tasoa ja niiden solmupisteet, paarteet ja diagonaalit

5.2.2 Maston laskenta-asiakirja

Maston suunnittelu eteni siten, että ensin luotiin Exceliin asiakirja, johon syötettiin lähtöarvoja. Syötettyjä lähtöarvoja oli kymmeniä, jotka koskivat muun muassa voimien laskentaa, maston pinta-alan laskentaa, nurjahdusta sekä käytettyjen profiilien tietoja. Asiakirjaan rakennettiin laskentaa, joka laskee automaattisesti syöttöarvoista mitoituksen kannalta tärkeimpiä tietoja.

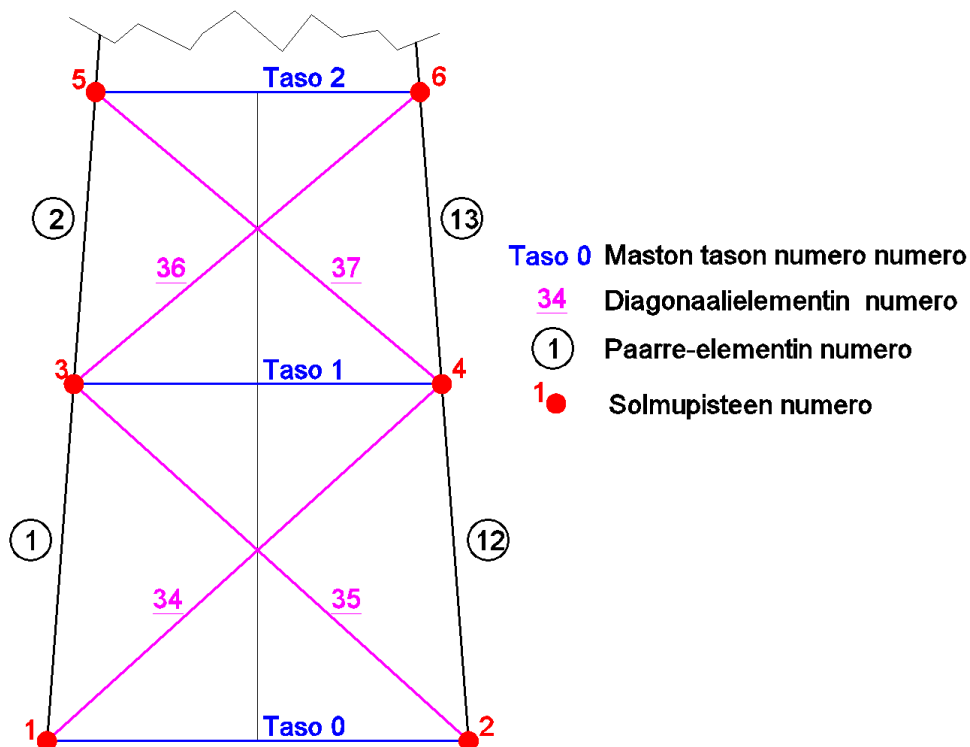
Esimerkiksi nurjahdusta käsittävän luvun 5.1 kaikki laskut on sisäänkirjoitettu asiakirjaan. Syöttämällä pyöreän profiilin pituus, halkaisija ja seinämän paksuus, materiaalin kimmokerroin ja myötölujuus sekä sauvan Eulerin tapaus saadaan nopeasti profiilin sallittu kuormitus nurjahduksen suhteen. Voidaan todeta, että työtapaa säästi aikaa huomattavan paljon. Toisaalta kerran oikein syötetyt kaavat laskevat aina oikein minimoiden virheet. Kaavat tarkistettiin vertaamalla saatuja tuloksia Rautaruukin Rakenneputket -käsikirjan taulukoituihin

arvoihin (27). Asiakirja myös laskee syöttämällä paarteiden ja diagonaalien profiilien mitat ja profiilien pituudet mastoon kohdistuvan tuulikuorman.

5.2.3 Maston analyysi FEM-ohjelmistolla

Kun maston solmupisteverkko on saatu selville, syötetään solmupisteverkko QSE Space -ohjelmistoon. Solmupisteverkko syötettiin QSE Spacen rajoittuneesta mallinnusominaisuuksista vuoksi suoraan koordinaattimuodossa, mikä oli varsin hidasta. Solmupisteverkon syötön jälkeen yhdistettiin paarteet ja sauvat mastoa kuvaavaksi elementtiverkoksi.

Elementeille annettiin oikea profiili kirjastosta tai mallintamalla se itse QSE:n profiilityökalulla. Näin jouduttiin tekemään litteänsoikeilla putkiprofiileilla, koska sellaisia ei kirjastosta valmiiksi löytynyt. Kuvassa 7 on esitetty maston solmupisteverkon ja elementtiverkon nimeämisperusteet. Kuva ei ole QSE Space -ohjelmistosta, vaan on nimeämiskäytäntöä selventävä piirros. Kuvaa on yksinkertaistettu luettavuuden vuoksi esittämällä vain maston yksi sivu.



KUVA 7. Maston rakentaminen QSE Space -ohjelmistolla

Seuraavaksi asetettiin maston tuenta. Masto tuettiin siten, että yksi jaloista on täysin kiinnitetty jalka. Kaksi muuta jalkaa vapautettiin sallimaan kiertymän yhden samansuuntaisen akselin ympäri. Näin pyritään kuvaamaan tilannetta, että masto voidaan nostaa pystyyn kahden jalan samansuuntaisen nivelen varassa, esimerkiksi taljaamalla masto pystyyn.

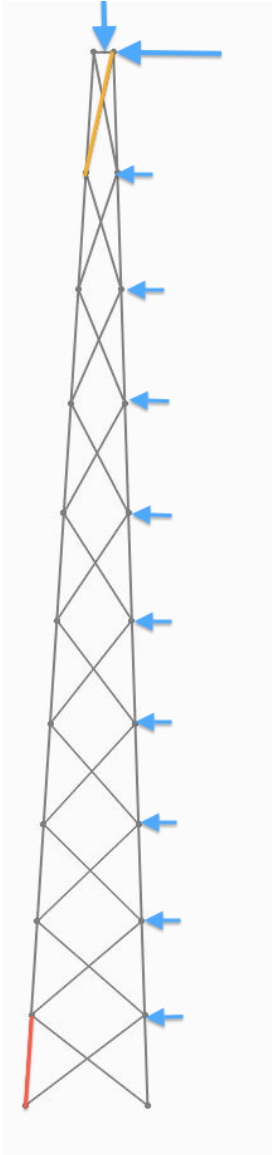
Jotta QSE-malli vastaisi ristikkoja, vapautettiin diagonaalien pyörähtäminen muihin suuntiin, paitsi profiilin oman pituusakselin ympäri. Näin diagonaalit eivät välitä momenttia, ainoastaan puristus- ja vetovoimia.

Seuraavaksi sijoitettiin mastoon kuormitus, kuten kuvassa 5 on esitetty. Roottorin tuulikuorma on pisin vaakasuora voima kohdistettuna tuulenpuoleisiin kahden ylimpään solmupisteeseen. Samalla periaatteella on jaettu tuulikuorma kahdelle tuulenpuoleiselle solmupisteelle, mutta tasaisesti koko maston mitalle. Roottorin paino on jaettu tasan kolmelle ylimmälle solmupisteelle. Lisäksi huomioon on otettu maston oman rakenteen paino.

Viimeinen syötettävä asia QSE:hen on kuormien yhdistelmä. Tässä voidaan kuormille antaa erilaiset kertoimet. Käytetyt kertoimet on esitetty edellä taulukossa 10. Tämän jälkeen annettiin QSE:n analysoida syötetyt tiedot, minkä jälkeen päästiin tarkastelemaan tuloksia.

5.2.4 FEM-tulosten analysointi

Kuvassa 8 on esitetty suurimmat puristuskuormitukset paarteelle sekä diagonaalille. Paarre on merkitty kuvaan punaisella ja diagonaali oranssilla, vaikuttavat voimat on merkitty sinisellä. Kuvan mastosta on luettavuuden vuoksi esitetty vain yksi sivu.



KUVA 8. 21 m maston suurimmat puristuskuormituksen alaiset sauvat

Tulosten tarkastelussa tulee huomioida, että voimat ovat ilmoitettu taulukossa 10 esitettyjen osavarmuuslukujen kanssa, joten ne ovat todellisuutta suurempia. Paarteen suurin puristus 145 kN on aivan alimmassa paarteen elementissä. Suurin diagonaalin puristus 11,5 kN on aivan maston yläosassa.

Maston ristikkomuodosta johtuen parre-elementtien kuormitus laskee, mitä ylemmäksi mastossa nouseaan. Vastaavasti diagonaalien kuormitus laskee, mitä alemmaksi mastossa laskeudutaan. Edellä saadut arvot ovat aksiaalisesti puristetun sauvan puristusvoiman mitoitusarvoja, N_{Ed} . Näitä verrattiin nurjah-

dustarkasteluissa aksiaalisesti puristetun sauvan nurjahduskestävyyden mitoitustarvoon $N_{b,Rd}$. Sama tarkastelu tehtiin luonnollisesti jokaiselle parrelementille, koska niiden pituus kasvaa tiettyyn kohtaan saakka, jolloin sallittu kuorma myös pienenee.

5.3 21 m maston suunnittelu 10 kW:n turbiinille

21 m masto oli ensimmäinen kahdesta lopullisesta mastomitasta, jota alettiin suunnittelemaan. Ensimmäisen mallin alapään jalkoväliksi valittiin 2 m ja tasojen määräksi 20. Huomattiin, että mastosta syntyi ylijäreä. Koska jalkovälin kasvattaminen pienentää puristuksen alla olevan paarteen kuormitusta, tuntui jalkovälin kasvattaminen järkevältä. Lopulliseksi jalkoväliksi valittiin 2,8 m. Se näytti tuottavan FEM-analyysin mukaan hyvän tuloksen diagonaalien pituuksien vielä pysyessä siedettävänä.

Jalkovälin selvittyä mitoitettiin sopivaa parreprofiilia mastoon. Nurjahduksen kannalta edullinen profiili sijoittaa poikkileikkauspinnan mahdollisimman etäälle keskipisteestä. Näin melko ohutseinäinen putki suurella halkaisijalla on hyvä vaihtoehto. Toisaalta myös liian ohutseinäisellä putkella on omat lujuustekniset heikkoudet. Näin päädyttiin vaihtoehtoon 76,1x3,0.

Kun jalkoväli ja parreprofiili oli selvitetty, alkoi mastosta tasojen karsiminen, koska masto näytti ylijäreältä. Alkuperäisessä mastossa oli 20 tasoa, mikä tarkoittaa 19:ää kuuden diagonaalien kerrosta mastossa. Tasojen määrän vähentäminen johti lopulta siihen, että tasojen välinen etäisyys onkin suurimmallaan maston keskivaiheilla, mikä oli etukäteen ajatellen yllättävää. Tämä selittyy sillä, että paarteiden kuormat pienenevät mastossa noustessa ja toisaalta diagonaalien kuormat pienenevät laskevan mastossa alaspäin mentäessä. Maston lujuustekniset rajoitukset olivat ylimpien diagonaalien hoikkuus ja alimpien paarteiden nurjahduskestävyys.

Lopulliseen mastoon valittiin yksitoista tasoa, mikä tarkoittaa kymmentä kuuden diagonaalien kerrosta, eli kuuttakymmentä diagonaalia. Diagonaalejen profiiliksi valittiin 50x30x1,25 litteänsoikea ohutseinäputki. Maston paino muodostuu pää-

osin paarteiden ja diagonaalien massasta. Suunnitellun 21 m maston diagonaalien ja paarteiden painoksi tuli 600 kg.

Ensimmäisen maston suunnittelussa mallinnettiin kaikkiaan yhteensä 11 erilais- ta mastoa. Aikaa maston mallintamiseen kului noin yksi kalenterikuukausi. Tu- loksiin voidaan olla hyvin tyytyväisiä, koska masto on hyvin optimoitu käyttämäl- lä paarteen sallitut kuormat hyvin hyödyksi melkein koko maston alueella. Tämä saavutettiin pidentämällä tasojen väliä maston keskellä. Ainoastaan maston huipulla valittu profiili on selvästi liian järeä kuormituksiin nähden.

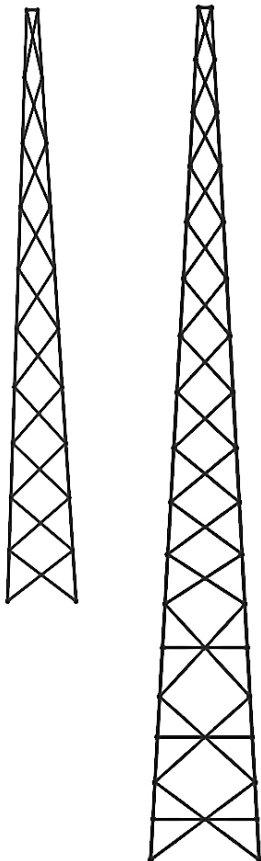
5.4 30 m maston suunnittelu 10 kW:n turbiinille

Toisen maston suunnittelu poikkesi joiltain osin ensimmäisen maston suunnitte- lusta. Opinnäytetyön teettäjän ajatuksen mukaan kannatti käyttää jo suunniteltu ja optimoitu 21 m masto hyödyksi. Jos mastoon lisätään pituutta, kestää jo suunniteltu lyhyempi masto pidemmän maston huippuna, mikäli kuormat pysy- vät samoina. Näin päädyttiin suunnittelemaan 21 m maston alle 9 m lisää kor- keutta. Näin päästiin 30 m mastoon. Suunnittelussa edettiin siten, että pidettiin maston paarteiden kulmat samoina kuin lyhyemmässä mastossa. Näin 30 m maston alajalkoväliksi muodostui 3,8 m.

Koska pidemmän maston alimmat paarteet saivat edellisen maston suunnitte- lun kokemuksen mukaisesti enemmän kuormaa, oli selvää, että 30 m maston tasojen väli maston alaosassa muodostuisi varsin lyhyeksi. Lisäksi rakennetta mitenkään muuttamatta näytti siltä, että diagonaaleista muodostuu liian pitkiä hoikkuuden vuoksi.

Koska alaosan paarreprofiili haluttiin pitää samana kuin maston yläosassa, vaihtoehtoja ei ollut useita. Päädyttiin muuttamaan 9 metrin alaosan rakennetta siten, että diagonaalien risteyskohdista käytetään paarteiden nurjahduspituutta vähentävää vaakasidettä. Lisäksi hoikkuuden vuoksi diagonaalien profiili vaihtui järeämpään, litteänsoikeaan ohutseinäputkeen 78x38x1,25 maston alaosassa.

21 ja 30 m mastot on esitetty kuvassa 9. Kuvan mastoista on esitetty vain yksi sivu, jotta kuvasta selviää mastojen rakenteellinen ero mahdollisimman hyvin. Kuvasta huomataan edellä mainittu seikka. 30 m maston yläosa on identtinen 21 m maston kanssa. 30 m maston paarteiden, diagonaalien ja vaakasiteiden massaksi tuli 939 kg.



KUVA 9. 21 ja 30 m mastot yksinkertaistettuna

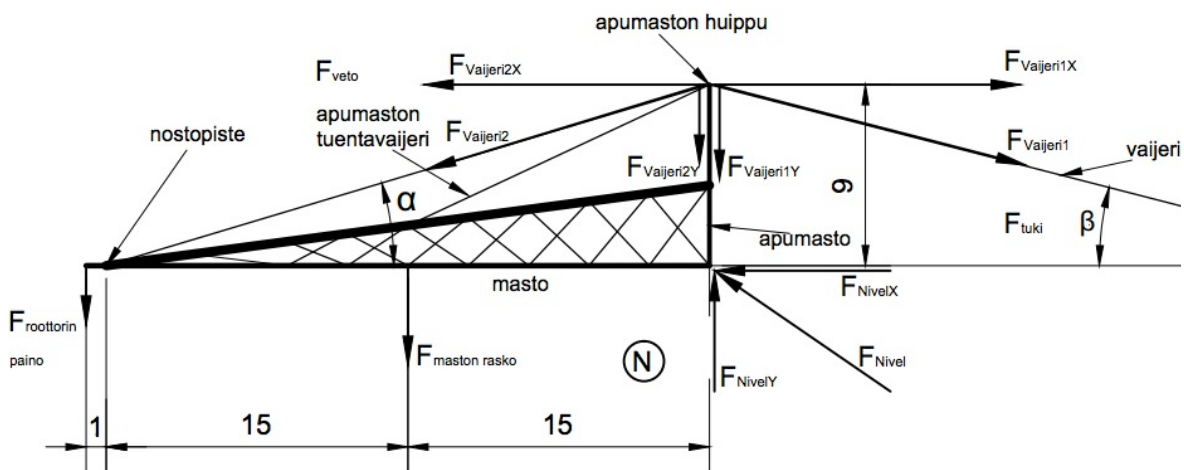
Näin päädyttiin 30 m korkeaan mastoon, jonka alajalkoväli on 3 807 mm. Tasojen määräksi muodostui 15 ja lisäksi vaakasiteiden kohdalle suunnitellut 3 apu-tasoa, yhteensä siis 18 tasoa.

5.5 Maston pystytys

Maston nosto on kuvattu kuvassa 10 yksinkertaistettuna. Tilanne on lähtötilanne, kun masto on vielä maassa ja kulma β pienin mahdollinen, joten tarvittava voima on suurin tilanteessa. 30 m maston pystytys suunniteltiin tehtäväksi mas-

ton mukana kaatuvan apumaston avulla. Apumasto on kiinnitetty maston pohjarakenteisiin kiinteästi kiinni. Apumaston huipun kautta kulkee vaijeri, joka on kiinnitetty toisesta päästä maston huipulla olevaan nostokorvakkoon.

Vaijerin toiseen päähän on kiinnitetty voimakas talja, jonka avulla vedetään masto pystyyn. Talja sijaitsee lähellä maanpintaa taljauspisteessä, 35 m etäisyydellä pisteestä N. Kuvassa mitat ovat metreinä.



KUVA 10. Maston noston periaatekuva, voimat ja mitat

Mikäli maston päähän sijoitetaan 10 kW:n turbiini, saattaa maston pystyyn nostaminen taljaamalla olla todella hankalaa turbiinin painon vuoksi. Tällöin on harkittava muita pystytysmenetelmiä, kuten nosturia tai taljan tilalle telaketjukaivinkonetta.

Nostossa käytettävä apumaston mitta on 9 metriä. Mitä pidempi apumasto on, sitä pienempi voima vetävälle vaijerille muodostuu. Toisaalta pitkä apumasto nurjahtaa lyhyttä helpommin. Apumaston päähän sijoitetaan rissapyörä, jolta vaijeri pääsee vapaasti irtoamaan maston noustessa. Lisäksi mastoa täytyy noston loppuvaiheessa vetosuunnan vastakkaisesta suunnasta pidätellä toisella taljalla, jotta lopullinen laskeutuminen on hallittu.

Maston mitta kuvassa 10 on 30 m. Koska roottori tulee maston huipulle, lisättiin roottorin aiheuttaman voiman etäisyydeksi 1 m maston huipusta. Maston oma

paino sijoitettiin maston puoliväliin. Tämä on varman päälle, koska masto levenee alaspäin mentäessä. Tällöin myös sen painopiste on enemmän juuressa diagonaalien nousukulman pienentyessä, mikä johtaa diagonaalien pituuksien kasvuun.

Nostopiste valittiin huipulle, koska maston paarteen huipun sidonta tehdään maston ylälevyyn. Tähän samaan kiinnityselimeen on hyvä tehdä sakkelleille korvakko, josta masto voidaan vetää pystyyn. Maston nostossa tarvittava vaijerin vaakavetovoima $F_{Vaijeri1X}$ on laskettu statiikan avulla kaavassa 13 pisteen N momentin suhteen (16, s. 72). Lähtöarvot ovat $F_{roottori} = 7,5 \text{ kN}$, mikä on edellä käytetty roottorin painon aiheuttama kuorma ja $F_{masto} = 12 \text{ kN}$ maston arvioitu paino. Molemmat voimat, $F_{roottori}$ ja F_{masto} arvioitiin tarkoituksellisesti todellisia arvoja suuremmaksi.

$$B - F_{roottori} * 31m - F_{maston\ rasko} * 15m + F_{Vaijeri1X} * 9m = 0 \quad \text{KAAVA 13}$$

Sijoitetaan voimien lähtöarvot kaavaan ja ratkaistaan kaavasta $F_{Vaijeri1X}$.

$$F_{Vaijeri1X} = \frac{7,5 \text{ kN} * 31 \text{ m} + 12 \text{ kN} * 15 \text{ m}}{9 \text{ m}} = 45\,833,3 \text{ N}$$

Kuvassa 10 olevat kulmat α ja β ratkaistaan trigonometrian avulla kaavalla 14 (16, s. 31).

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{9m}{31m} = 16,7^\circ \quad \text{KAAVA 14}$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{9m}{35m} = 14,4^\circ$$

Koska kuvassa 10 oleva voima $F_{Vaijeri1X}$ on voiman $F_{Vaijeri1}$ komponentti, voidaan voimat $F_{Vaijeri1}$ sekä $F_{Vaijeri1Y}$ laskea myös trigonometrian avulla kaavalla 14.

$$F_{Vaijeri1} = \frac{F_{Vaijeri1X}}{\cos \beta} = \frac{45\,833,3 \text{ N}}{\cos 14,4^\circ} = 47\,319,8 \text{ N}$$

$$F_{Vaijeri1Y} = F_{Vaijeri1} * \sin \beta = 47\,319,8\,N * \sin 14,4^\circ = 11\,768,0\,N$$

Apumaston päähän on kiinnitetty pyörä, jonka varassa vaijeri voi liukua kitkattomasti. Näin voidaan olettaa, että $F_{Vaijeri1} = F_{Vaijeri2}$. Tämä tarkoittaa sitä, että vaijerin vetovoimat olisivat yhtä suuret molemmin puolin apumastoa. Tämän oletuksen jälkeen voidaan voimat $F_{Vaijeri2X}$ ja $F_{Vaijeri2Y}$ laskea trigonometrialla kaavalla 14.

$$F_{Vaijeri2X} = F_{Vaijeri2} * \cos \alpha = 47\,319,8\,N * \cos 16,7^\circ = 45\,324,0\,N$$

$$F_{Vaijeri2Y} = F_{Vaijeri2} * \sin \alpha = 47\,319,8\,N * \sin 16,7^\circ = 13\,597,8\,N$$

Maston pystysuuntaisista voimista maston niveleen kohdistuu voimat $F_{roottori}$, F_{masto} ja $F_{VaijeriY}$. Statiikan tasapainoehdon mukaan niiden vastavoimana on maston nivelen pystykomponentti $F_{niveley}$, jonka suuruus on voimien $F_{roottori}$, F_{masto} ja $F_{VaijeriY}$ summa. $F_{niveley} = 7\,500\,N + 12\,000\,N + 11\,768\,N = 31\,268\,N$.

Maston nivelen vaakavoima $F_{nivelex}$ on vaijerin vetovoiman vaakasuuntaisen komponentin $F_{Vaijeri1X}$ vastakkainen voima. Näin nivelen resultanttivoima voidaan laskea Pythagoraan lauseella.

$$F_{Nivel} = \sqrt{F_{NivelX}^2 + F_{Niveley}^2} = \sqrt{(45\,833,3\,N)^2 + (31\,268,0\,N)^2} = 55\,483,1\,N.$$

Vaijerin voimista apumastoa puristaa kaksi, $F_{Vaijeri1Y}$ ja $F_{Vaijeri2Y}$. Laskemalla voimat yhteen saadaan apumastoa puristava voima, $F_{puristus}$. $F_{puristus} = F_{Vaijeri1Y} + F_{Vaijeri2Y} = 11\,768,0\,N + 13\,597,8\,N = 24\,365,8\,N$. Apumastossa kiinni olevan vaijerin vaakakomponentit ovat erisuuret, joten mastoon kohdistuu puristuksen lisäksi sitä taivuttava voima.

Kuvan 10 tilanteessa vaakavoimien erotus on $F_{Vaijeri1X} - F_{Vaijeri2X} = 509,3\,N$. Apumaston taipumisen estämiseksi on vaakavoimaa vastaan sijoitettu toinen vaijeri, joka on kiinnitetty mastoon. Näin ei tarvitse mitoittaa nurjahdusta puris-

tuksen ja taivutuksen kanssa. Seuraavaksi on suoritettu apumaston nurjahdustarkastelu, jonka lähtöarvoja on annettu taulukossa 13.

TAULUKKO 13. Apumaston nurjahdustarkastelu

Suure	Arvo
Profiilin mitat, [mm]	114,3x5,0
Materiaalin myötölujuus, f_y [N/mm ²]	355
Poikkileikkauksen pinta-ala, A [mm ²]	1 716,9
Taivutusneliömomentti, I [mm ⁴]	2 569 202
Sauvan nurjahduspituus, L_{cr} [mm]	10 905,3
Kimmokerroin, E [N/mm ²]	210 000
Kestävyyden osavarmuusluku, γ_{M1} []	1,0
Puristusvoiman mitoitusarvo, N_{ed} [N]	38 048,7

Lasketaan kimmoteorian mukainen kriittinen nurjahduskuoma kaavalla 10.

$$N_{Cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{L_{Cr}^2} = \frac{\pi^2 * 210\,000 \frac{N}{mm^2} * 2\,569\,202 \text{ mm}^4}{(10\,905,3 \text{ mm})^2} = 44\,775,7 \text{ N}$$

Seuraavaksi lasketaan muunnettu hoikkuus kaavalla 9.

$$\lambda = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{Cr}}} = \sqrt{\frac{1\,716,9 \text{ mm}^2 * 355 \frac{N}{mm^2}}{44\,775,7 \text{ N}}} = 3,689$$

Tämän jälkeen lasketaan nurjahduksen pienennystekijä χ kaavoilla 6 - 8.

$$\Phi = 0,5 * [1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \lambda^2] = 0,5 * [1 + 0,49(3,689 - 0,2) + 3,689^2]$$

$$\Phi = 8,159$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} \leq 1,0 = \frac{1}{8,159 + \sqrt{8,159^2 - 3,689^2}} = 0,064782 \approx 0,065 \leq 1,0$$

Seuraavaksi lasketaan nurjahduskestävyyden mitoitusarvo kaavalla 5.

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,065 * 1\,716,9 \text{ mm}^2 * 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1,0} = 39\,617,5 \text{ N} \approx 39,6 \text{ kN}$$

Lopuksi tarkastetaan puristetun sauvan mitoitusehto nurjahduksessa kaavalla 4.

Lasketaan apumastoa puristavaan voimaan vielä varmuusluku, jotta apumasto varmasti kestää, joten mitoitusarvo $N_{Ed} = F_{\text{puristus}} * 1,5 = 24\,365,8 \text{ N} * 1,5 = 38\,048,7 \text{ N}$.

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} = 38\,048,7 \text{ N} \leq 39\,617,5 \text{ N}$$

Kaavan 4 ehto täyttyy, joten todetaan, että valittu apumastoprofiili kestää sitä puristavan mitoituskuorman. Valittuna profiilina oleva 114,3x5,0 painaa 9 m pitkänä 121,5 kg, joten apumaston pystyyn nostossa ja kiinnityksessä maston alapäähän tarvitaan jo taljaa.

6 LIITOSOSIEN SUUNNITTELU

Liitososien suunnittelu oli vuorossa, kun tiedettiin, mitä liitetään toisiinsa ja millaisia voimia elementtien välillä on. Työssä suunniteltiin kuusi erilaista liitososaa, joiden avulla maston paarteet ja diagonaalit saadaan haluttuun muotoon. Liitososat ovat paarteen jatkoholkki, diagonaaliholkki, paarteen ylä- ja alajalat sekä nivelletyt alajalat, joissa on sekä perustuksen että paarteen puolen kappale ja viimeisenä maston nostokorvakko. Materiaalina kaikkiin valmistettaviin liitososiin on valittu yleinen rakenneteräs S355.

Ruuviliitosten suunnittelussa käytettiin apuna standardeja, pääosin Eurocode 3:n Liitosten mitoitus -standardia (25). Lisäksi hitsien laskennassa käytettiin avuksi Oulun seudun ammattikorkeakoulun Kone-elimet 1 -kurssin kurssimateriaalia (29).

6.1 Liitososiin kohdistuvat voimat

Liitososien suunnittelussa käytettiin voimia, jotka on saatu QSE Space -ohjelmistosta. Taulukossa 14 on esitetty laskennassa käytetyt standardin mukaiset osavarmuusluvut (25, s. 19).

TAULUKKO 14. Osavarmuusluvut (25, s. 19)

Osavarmuusluku	Arvo
γ_{M0}	1,0
γ_{M1}	1,0
γ_{M2}	1,25
γ_{M3}	1,25
γ_{M4}	1,0
γ_{M5}	1,0
γ_{M0}	1,1

Työn kannalta kriittiset voimat ja niiden tyyppi on esitetty taulukossa 15. Voimat ovat peräisin 30 m korkeasta mastosta, koska osa voimista on siinä suurempia kuin matalammassa 21 m mastossa. Suurempien voimien mukaan suunnitellut liitososat käyvät siten kumpaankin mastoon, koska molemmissa mastoissa paarre- ja diagonaaliprofiilit ovat samat.

TAULUKKO 15. Liitososien suunnittelussa käytetyt voimat

Voiman sijainti	Voiman suuruus F, [N]	Voiman tyyppi
Alin paarre	156 000	Puristus
Alimman paarteen jatko	144 000	Veto
Ylimmän diagonaaliseen voimat	11 500	Puristus
	6 300	Veto
Noston korvakko	83 310	Veto

6.2 Ruuvien lujuus

Työssä suunnitellut mastot on tarkoitettu kokoonpantavaksi ruuveilla valmiiden ja pintakäsiteltyjen profiilien ja liitososien kanssa maston pystytyspaikalla. Näin maston luona vältetään hitsaamiselta ja kokoonpano onnistuu perustyökaluilla. Koska mastossa on käytetty paljon ruuvikiinnityksiä, on niiden mitoittaminen ja lujuuksien tietäminen tärkeä osa maston suunnittelua. Mastoissa käytettävien ruuvien lujuusluokka on 8.8. Ruuvit ovat tyypiltään sellaisia, että niissä on varressa liitettävien osien kohdalla kierteetön osa. Tällaiset ruuvit ovat kokoonpan- taessa huomattavasti helpompia kuin kokokierteiset ruuvit. Lisäksi niiden leikkauslujuus on parempi kierteettömällä kohdalla.

6.2.1 Leikkauslujuus

Ruuvien leikkaantuminen on rakenteessa olennaisessa osassa. Asiakkaan ko- koamat liitokset ovat tehty ruuviliitoksin, joten ruuvien leikkauskestävyys on kriit-

تين maston turvallisuuden kannalta. Ruuvin leikkauskestävyys lasketaan kaavalla 15 (25, s. 28).

$$F_{V,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}}$$

KAAVA 15

$F_{V,Rd}$ = ruuvin leikkauskestävyys, (N)

$\alpha_v = 0,6$ lujuusluokilla 4.6, 5.6 ja 8.8

$\alpha_v = 0,5$ lujuusluokilla 4.8, 5.8, 6.8 ja 10.9

f_{ub} = ruuvin vetomurtolujuus, ($\frac{N}{mm^2}$), taulukko 16

γ_{M2} = osavarmuusluku, taulukko 14

Taulukossa 16 on esitetty ruuvien myötörajan ja vetomurtolujuuden nimellisarvot (25 s. 21).

TAULUKKO 16. Ruuvien myötörajan ja vetomurtolujuuden nimellisarvot (25)

Ruuvin lujuus	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
Myötöraja, f_{yb} [N/mm ²]	240	320	300	400	480	640	900
Vetomurtolujuus, f_{ub} [N/mm ²]	400	400	500	500	600	800	1000

Seuraavaksi on laskettu mastoissa paljon käytettyjen M8 8.8:n leikkauksen kestävyys.

$$F_{V,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 * 800 \frac{N}{mm^2} * \pi * (8 \text{ mm})^2}{1,25 * 4} = 19\,301,9 \text{ N}$$

Seuraavaksi on laskettu M10 8.8:n leikkauksen kestävyys.

$$F_{V,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 * 800 \frac{N}{mm^2} * \pi * (10 \text{ mm})^2}{1,25 * 4} = 30\,159,3 \text{ N}$$

6.2.2 Vetolujuus

Työssä osa ruuveista joutuu vedon alle. Tällaisia ruuveja ovat ainakin ala- ja yläjalkojen laippojen kiinnitysruuvit. Seuraavassa kaavassa 16 on esitetty ruu-vien vetokestävyys (25, s. 28).

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 * f_{ub} * A_s}{\gamma_{M2}} \quad \text{KAAVA 16}$$

$F_{t,Rd}$ = ruuvin vetokestävyys, (N)

f_{ub} = ruuvin vetomurtolujuus, $\left(\frac{N}{mm^2}\right)$, taulukko 16

k_2 = 0,63 uppokantaisille ruuveille, muille 0,9

A_s = ruuvin jännityspoikkipinta-ala ($A_s \approx 0,78 * A$), (mm^2)

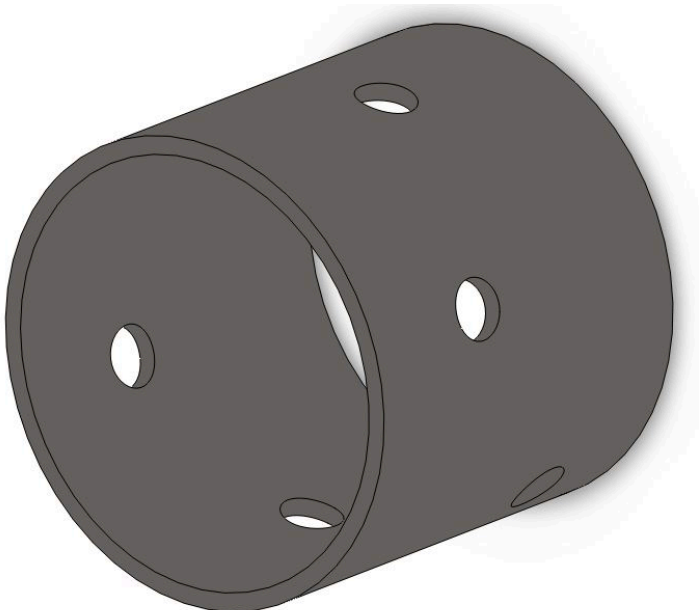
γ_{M2} = osavarmuusluku, taulukko 14

Seuraavaksi on laskettu M12 8.8:n vetolujuus.

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 * f_{ub} * A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 * 800 \frac{N}{mm^2} * \pi * (0,78 * 12 \text{ mm})^2}{1,25 * 4} = 39\,633,6 \text{ N}$$

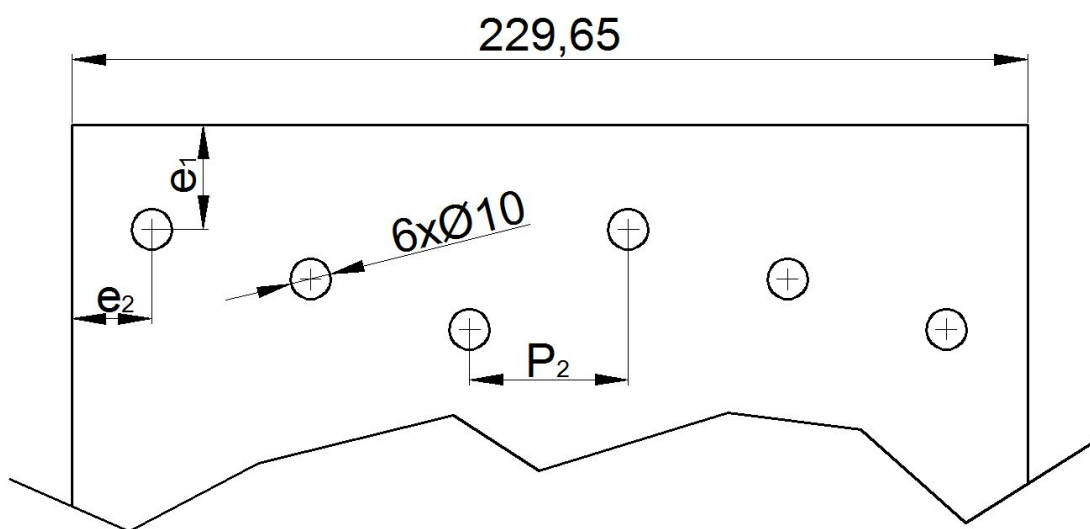
6.3 Paarre

Paarteen jatkoholkki on kappale, joka yhdistää kaksi paarretta päistään toisiinsa. Rakenteeksi valittiin paarteen ulkohalkaisijaa suurempi putki sisähalkaisijaltaan. Paarteet ja jatkoholkki ovat liitoskohdassa limittäin. Jatkoholkkiiin porataan reikiä läpi asti. Reiät porataan myös vastaaviin kohtiin kiinnitettävien paarteiden päihin. Näistä rei'istä työnnetään ruuvit läpi ja kiristetään ruuvien päihin tulevat mutterit. Paarteen pää on esitetty kuvassa 11.



KUVA 11. Paarteen pää

Paarre on tehty profiilista 76,1x3,0 ja jatkoholkin päälle sopivin standardiprofiili on 88,9x5,0. Näin siis jatkoholkista muodostuu parretta vahvempi suuremman ainepaksuuden johdosta. Mikäli paarre kestää vaikuttavan voiman, kestää jatkoholkkin sen. Tällaisenaan paarteen päälle ei löytynyt suoraa kaavaa, jolla sen kestävyttä olisi voinut laskea. Tästä syystä paarre esitetään tasoon levitetynä levynä kuvassa 12.



KUVA 12. Tasoon levitetty paarteen jatkoholkki

Edellä on laskettu yhden M10 8.8 leikkauskestävyys kaavalla 15 sekä ilmoitettu paarteen jatkoksista suurin kuormitus taulukossa 15. Jakamalla voima ruuvien leikkauskestävyydellä saadaan tarvittava ruuvien leikkauspintojen lukumäärä n kaavalla 17.

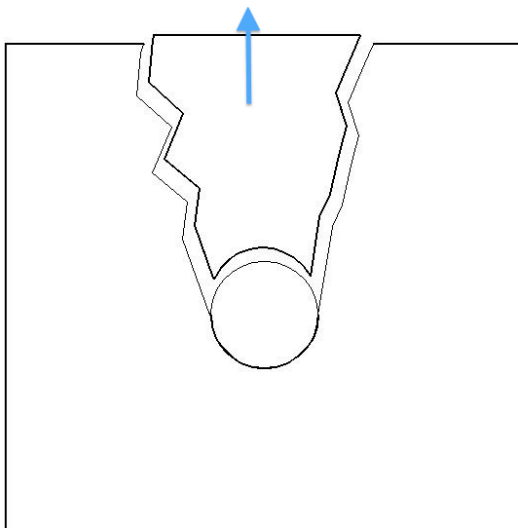
$$n = \frac{F}{F_{V,Rd}} = \frac{145\,000\text{ N}}{30\,159,3\text{ N}} = 4,81\text{ kpl}$$

KAAVA 17

Koska ruuvien leikkauspintojen lukumäärä on oltava kahdella jaollinen kokonaisluku rakenteen vuoksi. Näin jatkoholkin rakenteessa päädyttiin kolmeen M10 8.8 ruuviin paarteen päätä kohden, yhteensä 6 kappaletta M10 8.8 ruuvia jatkoholkkia kohden.

6.3.1 Paarteen pään reunapuristuskestävyys

Reunapuristuskestävyydellä tarkoitetaan sitä, että pystyykö kuorman alla oleva ruuvi kahlaamaan aineen läpi tai murtuuko reunasta pala. Kuvassa 13 on esimerkki reunapuristuskestävyyden periaatteesta.



KUVA 13. Reunapuristuskestävyys ja reunamurtuminen

Paarteen kestävyys $F_{V,Rd}$ voidaan tarkastella materiaalin reunapuristuskestävyyden avulla kaavalla 18 (25, s. 28).

$$F_{v,Rd} = \frac{k_1 * a_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}}$$

KAAVA 18

$F_{v,Rd}$ = materiaalin reunapuristuskestävyys, (N)

k_1 = pienin arvoista $2,8 * \frac{e_2}{d_o} - 1,7$ ja 2,5 reunarivin ruuveille

k_1 = muille kuin pään ruuveille pienin arvoista $1,4 * \frac{P_2}{d_o} - 1,7$ ja 2,5

a_b = pienin arvoista α_d ; $\frac{f_{ub}}{f_u}$; 1,0, siirrettävän voiman suunnassa:

α_d = levyn pään ruuveille: $\alpha_d = \frac{e_1}{3d_o}$;

α_d = muille kuin pään ruuveille: $\alpha_d = \frac{P_2}{3d_o} - \frac{1}{4}$

f_{ub} = ruuvin vetomurtolujuus, $(\frac{N}{mm^2})$, taulukko 16

f_u = rakenneteräksen vetomurtolujuus, $(\frac{N}{mm^2})$, taulukko 17

d = ruuvin halkaisija, (mm)

d_o = reiän koko, (mm)

γ_{M2} = osavarmuusluku, taulukko 14

Taulukossa 17 on esitetty rakenneterästen myötörajan ja vetomurtolujuuden nimellisarvot eri levynpaksuuksille.

TAULUKKO 17. Rakenneterästen myötörajan ja vetomurtolujuuden nimellisarvot (24)

Standardi ja teräslaji	Nimellispaksuus t[mm]			
	t ≤ 40 mm		40 mm < t ≤ 80 mm	
	f _y [N/mm ²]	f _u [N/mm ²]	f _y [N/mm ²]	f _u [N/mm ²]
EN 10025-2				
S235	235	360	215	360
S275	275	430	255	410
S355	355	510	335	470
S450	440	550	410	550

Seuraavaksi on esitetty paarteen jatkoholkin laskenta edellä esitellyn kaavan 18 avulla. Lähtöarvot on annettu taulukossa 18.

TAULUKKO 18. Paarteen reunamurtumisen tarkastelun lähtöarvot

Suure	Arvo
Kiinnittimen reiän keskiön etäisyys reunasta, e_1 [mm]	25
Kiinnittimen reiän keskiön etäisyys reunasta, e_2 [mm]	38,2
Viereisten kiinnitinruuvien keskiöetäisyys, P_2 [mm]	19,1
Ruuvien nimellishalkaisija, d [mm]	10
Ruuvien halkaisija, d_0 [mm]	10
Materiaalipaksuus, s [mm]	3

Koska putkessa ei ole reunaruuveja, käytetään k_1 :n selvittämiseksi muiden kuin pään ruuvien kaavaa. Tekijä k_1 on pienempi seuraavista arvoista:

- $1,4 * \frac{38,2 \text{ mm}}{10 \text{ mm}} - 1,7 = 3,648$
- 2,5.

Tekijäksi k_1 tulee luku 2,5. Tekijä a_b on pienin seuraavista arvoista:

- $\frac{25 \text{ mm}}{3 * 10 \text{ mm}} = 0,833$
- $\frac{39,2 \text{ mm}}{3 * 10 \text{ mm}} - \frac{1}{4} = 1,057$
- $\frac{800 \text{ MPa}}{510 \text{ MPa}} = 1,568$
- 1,0.

Tekijäksi a_b tulee luku 0,833.

Yksinkertaisuuden vuoksi lasketaan kaikki heikompia levyjen pään ruuvien mukaan. Lisäksi näin tulos on varmalla puolella.

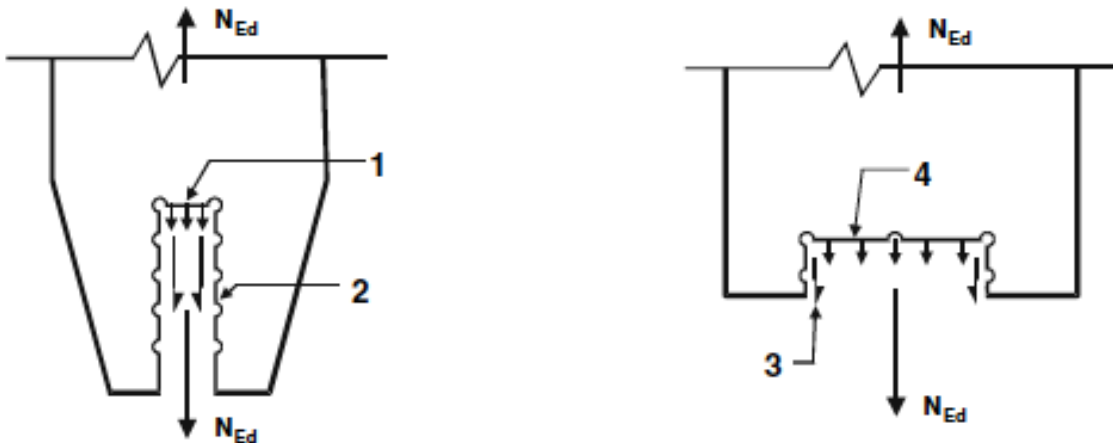
$$F_{v,Rd} = \frac{k_1 * a_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 * 0,833 * 510 \frac{N}{\text{mm}^2} * 10 \text{ mm} * 3 \text{ mm}}{1,25} = 25\,489,8 \text{ N}$$

$$F_{v,Rd} \approx 25\,490 \text{ N}$$

Koska ruuveja on kolme ja siten leikkeitä kuusi, todetaan, että ruuvien yhteenlaskettu leikkausvoima on $6 * 25\,490 \text{ N} = 152\,940 \text{ N}$. Tämä on suurempi kuin paarteita erottava suurin voima $144\,000 \text{ N}$, joten paarre kestää jatkokohtaan.

6.3.2 Paarteen pään palamurtuminen

Palamurtumisen perusajatus on perusaineen leikkaantuminen ruuvilinjoja pitkin. Palamurtumisessa on kyse niin leikkautumisesta kuin vetomurtumisesta. Palamurtumiseen tarvitaan enemmän kuin yksi ruuvi. Kuvassa 14 on esitetty kaksi erilaista palamurtumisia.



- 1 Pieni vetovoima
- 2 Suuri leikkausvoima
- 3 Pieni leikkausvoima
- 4 Suuri vetovoima

KUVA 14. Palamurtumisen esimerkkejä (26 s. 35)

Palamurtumiskestävyden mitoitusarvo $V_{eff,r,Rd}$, mitoitetaan kaavalla 19, kun ei-symmetriseen ruuviryhmään kohdistuu epäkeskeinen kuorma (25, s. 34).

$$V_{eff,2,Rd} = \frac{0,5 * f_u * A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} * \frac{f_y * A_{nv}}{\gamma_{M0}} \quad \text{KAAVA 19}$$

$V_{eff,2,Rd}$ = palamurtumiskestävyden mitoitusarvo, (N)

A_{nt} = vedon rasittama nettopinta-ala, (mm^2)

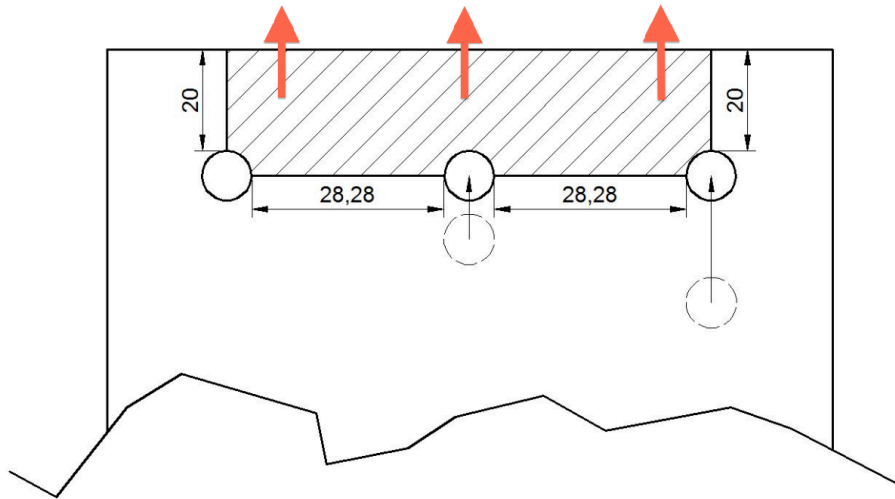
A_{nv} = leikkauksen rasittama nettopinta-ala, (mm^2)

f_u = rakenneteräksen vetomurtolujuus, ($\frac{N}{mm^2}$), taulukko 17

f_y = rakenneteräksen myötölujuus, ($\frac{N}{mm^2}$), taulukko 17

γ_{M0}, γ_{M2} = osavarmuuslukuja, taulukko 14

Yksinkertaistamisen vuoksi reikien paikka on muutettu kuvan 15 periaatteen mukaan muuttamalla tilannetta siten, että kaikkien ruuvien reiät ovat etäisyydeltään pienimmän etäisyyden päässä paarteen reunasta. Näin laskettuna päästään varmalle puolelle.



KUVA 15. Paarteen pään palamurtuminen

Paarteen pään palamurtuminen on laskettu kaavan 19 avulla. Koska paarteen päässä on periaatteessa kolme vedolle ja kaksi leikkaukselle kuvan kaltaista osaa, voidaan kaavan 19 avulla laskea palamurtuminen seuraavasti:

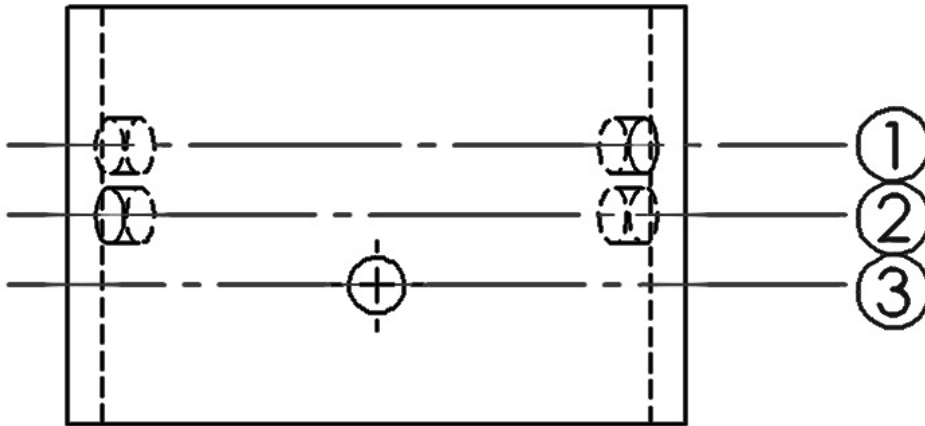
$$V_{eff,2,Rd} = 3 * \frac{0,5 * 510 \frac{N}{mm^2} * 28,28 mm * 3 mm * 2}{1,25} + 2 * \frac{1}{\sqrt{3}} * \frac{355 \frac{N}{mm^2} * 20 mm * 3 mm * 2}{1,0}$$

$$V_{eff,2,Rd} = 153\,034\,N$$

Paarteita toisistaan erilleen vetävä voima on 144 000 N, joten voidaan todeta, että paarteen pää kestää palamurtumisen.

6.3.3 Paarteen pään perusaineen kestävyys

Perusaineen kestävyystarkastelussa varmistetaan aineen pienimmän poikkileikkauksen kestävästi liitokseen kohdistuvan voiman. Perusaineen kestävyys tulee tarkistaa liitoskappaleen erilaisissa pisteissä, kuten kuvassa 16.



KUVA 16. Perusaineen kestävyden tarkastelu paarteen pään osalta

Kuvasta 16 nähdään, että tilanteet 1, 2 ja 3 ovat identtisiä ja vain reiän asema muuttuu, mutta materiaalin pienin poikkileikkauksen pinta-ala pysyy tilanteissa samana. Perusaineen kestävyden mitoitusarvo lasketaan kaavalla 20 (24, s. 52).

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} > F_d$$

KAAVA 20

$N_{pl,Rd}$ = perusaineen kestävyden mitoitusarvo, (N)

A = poikkileikkauksen pinta-ala, (mm^2)

f_y = rakenneteräksen myötöraja, ($\frac{N}{mm^2}$), taulukko 17

γ_{M0} = osavarmuusluku, taulukko 14

Lasketaan paarteen pään perusaineen kestävyys on kaavan 20 mukaan.

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{\left(\left(\pi * \left(\frac{76,1mm}{2} \right)^2 - \pi * \left(\frac{70,1mm}{2} \right)^2 \right) - 10mm * 3mm * 2 \right) * 355 \frac{N}{mm^2}}{1,0}$$

$$N_{pl,Rd} = 223\,278N$$

Paarteita erottava voima on 144 000 N, joten nähdään, että paarteen pään perusaineen kestävyys on riittävä.

6.3.4 Paarteen pään pintapaineen tarkastelu

Pintapaine ruuvien kohdalla perusaineessa ei saa ylittää tiettyjä arvoja. Sallittu pintapaine on suurempi kuin yleensä sallitut jännitykset. Kaavassa 21 on esitetty pintapaineen sallittu arvo sylinterimäisessä kosketuspinnassa. (30, s. 13.1.)

$$p_{sall} = 1,8 * f_u$$

KAAVA 21

$$p_{sall} = \text{sallittu pintapaine, } \left(\frac{N}{mm^2} \right)$$

$$f_u = \text{rakenneteräksen murtolujuus, } \left(\frac{N}{mm^2} \right), \text{ taulukko 17}$$

Reikää kuormittava pintapaine lasketaan kaavalla 22.

$$p = \frac{F_d}{A}$$

KAAVA 22

$$F_d = \text{kuormittava voima, } (N)$$

$$A = \text{reiän pinta-ala, } (mm^2)$$

Seuraavaksi on tarkasteltu sallittu pintapaine paarteen osalta kaavan 21 mukaan.

$$p_{sall} = 1,8 * 510 \frac{N}{mm^2} = 918 \frac{N}{mm^2}$$

Koska paarre on kiinnitetty paarteeseen jatkoholkkiin kolmella läpimenevällä ruuvilla, voidaan ruuvien määrä kertoa kuudella. Pintapaine saadaan kaavan 22 avulla.

$$p = \frac{144\,000\text{ N}}{6 * 10\text{mm} * 3\text{mm}} = 800 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

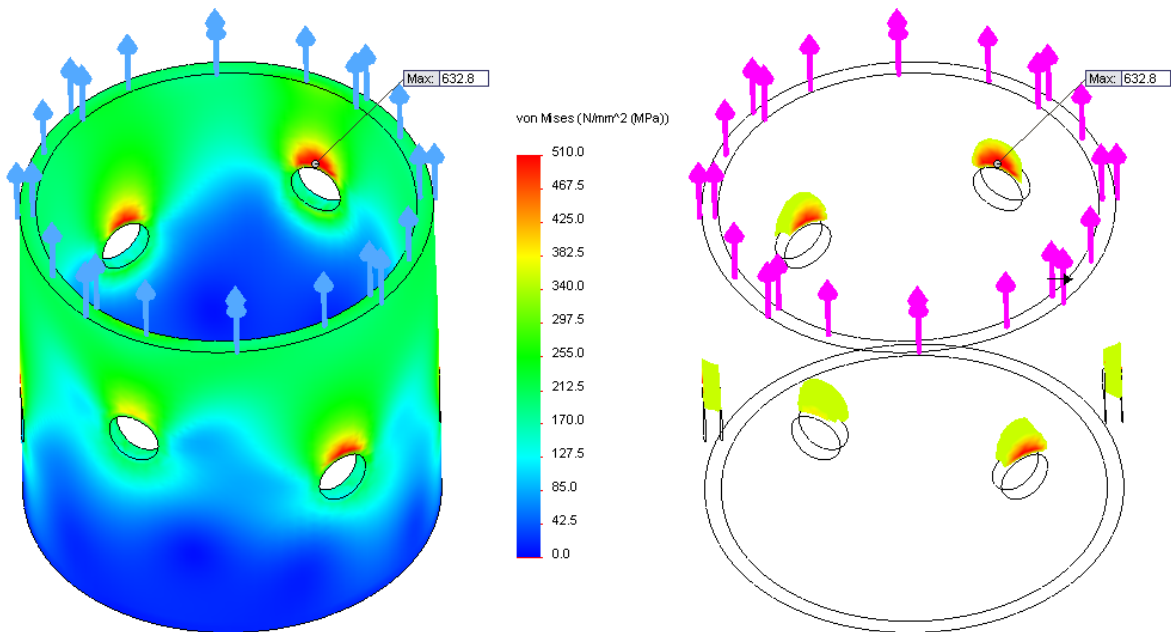
Nähdään, että syntyvä pintapaine on alle sallitun pintapaineen. Näin perusaineeseen ei kohdistu niin suurta jännitystä, että se murtuisi.

6.3.5 Paarteeseen pään FEM-tarkastelu

Standardien mukaan laskemalla mitoittamisen lisäksi haluttiin tarkastella mitoitettuja kappaleita vielä FEM-ohjelmistolla. Näin saadaan hyvä käsitys siitä, missä kohtaa liitoskappaletta jännitykset ovat suurimmillaan. Toisaalta FEM-analyysi voi paljastaa väärinymmärryksiä tai virheitä standardien kautta tehdyn mitoituksen laskuissa ja standardien luennassa.

FEM-analyysit tehtiin samalla ohjelmistolla, jolla mastojen solmupisteverkko rakennettiin, Dassault Systemesin SolidWorksilla. Analyysissä määritellään kappaleen materiaali, tuennat, vaikuttavat kuormat sekä elementtiverkko ja analysoidaan kappale. SolidWorksin FEM-ohjelmisto on varsin helppokäyttöinen.

Kuvassa 17 on esitetty paarteeseen pään FEM-analyysi tilanteessa, jossa paarre jatketaan jatkoholkilla. Kuvassa vasemmanpuoleinen jännityskartta kuvaa väriellä jännityksiä kappaleessa. Pienin jännitys on tumman sininen ja suurimmat jännitykset ovat punaisia. Kuvassa keskellä oleva liukuvärikartta kuvaa jännityksien suuruutta. Skaala on tummansinisen 0 MPa:n ja punaisen 510 MPa:n välissä. Skaalan maksimiksi valittiin S355:n alin murtolujuus, 510 MPa. Nuolet kuvaavat voiman suuntaa. Voiman suuruus on 144 000 N.



KUVA 17. Paarteen FEM -analyysi; vasemmalla jännitykset ja oikealla yli 355 MPa:n jännityksen ylittävät alueet

Kuvassa 17 oikealla on esitetty kappaleesta ne osat jännitystä kuvaavalla värillä, joiden jännitys kohoaa yli 355 MPa:n. Alle 355 MPa:n jännityksiä ei kuvata ollenkaan. Näin päästään paremmin käsitykseen tietyn rajan ylittävistä jännityksistä ja tavallaan nähdään paremmin pinnan sisään. Kuvan 11 kappaleen suurimmat jännitykset syntyvät odotetusti kiinnitysreikien ympärille. Kuten edellä on todettu, on materiaalin pintapaineen sallittu paikallinen arvo suurempi kuin rakenneteräksen murtolujuus. Paarteessa luultavasti esiintyy pieniä muodonmuutoksia reikien ympäristössä, mutta ne ovat pienellä alueella ja sallittujen arvojen sisällä.

6.4 Diagonaalien mitoitus

Diagonaalikappaleen perusmalli on litistää litteänsoikeaa profiilia päistään siten, että ruuvien kohdalla on diagonaalien ja liitososan tasopinnat vastakkain. Litteänsoikean profiilin litistys onnistuu yksinkertaisilla työkaluilla, koska profiili on pidemmältä kyljeltään osittain tasainen. Tasainen pinta on helposti tuettavissa tasopintaa vasten ja oikea litistysuunta on näin helppo varmistaa.

6.4.1 Diagonaalin nurjahdustarkastelu

Poikkileikkaukseltaan litteänsoikeille ohutprofiileille ei löydy tarvittavia lähtöarvoja nurjahduksen laskentaan. Yksinkertaistamisen vuoksi oletetaan profiili pie-nimmän ulkomitan mukaan pyöreäksi putkeksi. Näin laskettaessa 50x30x1,25 litteänsoikeaa profiilia käsitellään nurjahtamisen kannalta periaatteessa 30x1,25 putkea. Lähtöarvot nurjahdustarkasteluun on esitetty seuraavalla sivulla taulu-kossa 19.

TAULUKKO 19. Diagonaalin nurjahdustarkastelun lähtöarvot

Suure	Arvo
Profiilin	50x30x1,25
Materiaalin myötölujuus, f_y [N/mm^2]	355
Poikkileikkauksen pinta-ala, A [mm^2]	112,9
Taivutusneliömomentti, I [mm^4]	11 687,0
Sauvan nurjahduspituus, L_{cr} [mm]	956,0
Kimmokerroin, E [N/mm^2]	210 000
Kestävyyden osavarmuusluku, γ_{M1} []	1,0
Puristusvoiman mitoitusarvo, N_{ed} [N]	11 500

Lasketaan kimmoteorian mukainen kriittinen nurjahduskuoma kaavalla 10.

$$N_{Cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{L_{Cr}^2} = \frac{\pi^2 * 210\,000 \frac{N}{\text{mm}^2} * 11\,687,0 \text{ mm}^4}{(956 \text{ mm})^2} = 26\,503,7 \text{ N}$$

Seuraavaksi lasketaan muunnettu hoikkuus kaavalla 9.

$$\lambda = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{Cr}}} = \sqrt{\frac{112,9 \text{ mm}^2 * 355 \frac{N}{\text{mm}^2}}{26\,503,7 \text{ N}}} = 1,229\,72 \approx 1,23$$

Tämän jälkeen lasketaan nurjahduksen pienennystekijä χ kaavoilla 6 - 8.

$$\Phi = 0,5 * [1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \lambda^2] = 0,5 * [1 + 0,49(1,23 - 0,2) + 1,23^2]$$

$$\Phi = 1,5088 \approx 1,51$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} \leq 1,0 = \frac{1}{1,51 + \sqrt{1,51^2 - 1,23^2}} = 0,419\ 129 \approx 0,420 \leq 1,0$$

Seuraavaksi lasketaan nurjahduskestävyyden mitoitusarvo kaavalla 5.

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,420 * 112,9\ mm^2 * 355\ \frac{N}{mm^2}}{1,0} = 16\ 833,4\ N \approx 16,8\ kN$$

Lopuksi tarkastetaan puristetun sauvan mitoitusehto nurjahduksessa kaavalla 4.

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} = 11\ 500\ N \leq 16\ 833,4\ N$$

Kaavan 4 ehto täyttyy, joten todetaan, että valittu diagonaaliprofiili kestää mitoituskormin.

6.4.2 Diagonaalien pään mitoitus reunapuristuskestävyyden avulla

Diagonaalien pään mitoitus reunapuristuskestävyyden avulla lasketaan edellä olleen esimerkin tapaan. Diagonaalien kiinnityksessä päässä on vain yksi ruuvi, joten käytetään reunapuristuskestävyyden mitoituksessa reunarivin ruuvien mitoitusta kaavan 18 mukaan. Tekijä k_1 on pienempi seuraavista arvoista:

- $2,8 * \frac{25\ mm}{8\ mm} - 1,7 = 7,05$
- 2,5.

Tekijäksi k_1 tulee luku 2,5. Tekijä a_b on pienin seuraavista arvoista:

- $\alpha_d = \frac{20\ mm}{3 * 8\ mm} = 0,833$
- $\alpha_d = \frac{800\ MPa}{510\ MPa} = 1,568$
- 1,0.

Tekijäksi a_b tulee luku 0,833.

Reunapuristuskestävyys lasketaan kaavalla 18.

$$F_{v,Rd} = \frac{k_1 * a_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 * 0,833 * 510 \frac{N}{mm^2} * 8 \text{ mm} * 2,5 \text{ mm}}{1,25} = 16\,993,2N$$

Diagonaalin pään reunapuristuskestävyys on suurempi, kuin suurin diagonaalin kohdistuva vetovoima 6 300 N tai puristusvoima 11 500 N. Näin todetaan, että diagonaalin pää kestää siihen kohdistuvat voimat reunapuristuskestävyyden osalta.

6.4.3 Diagonaalin pään perusaineen kestävyys

Diagonaalin pään perusaineen kestävyys voidaan yksinkertaistaa siten, että materiaalin pienimpään poikkileikkaukseen otetaan huomioon vain diagonaalin leveys reiän kohdalla. Mikäli diagonaali litistettäisiin täysin, sen leveys olisi suurempi kuin litistämättömän diagonaalin leveys. Näin ottamalla huomioon materiaalin poikkileikkauksessa litistämättömän profiilin leveys ollaan varmallalla puolella. Perusaineen kestävyys on laskettu kaavan 20 avulla.

$$N_{pl,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} > F_d = \frac{(50 \text{ mm} - 8 \text{ mm}) * (1,25 \text{ mm} * 2) * 355 \frac{N}{mm^2}}{1,00} > 11\,500 \text{ N}$$

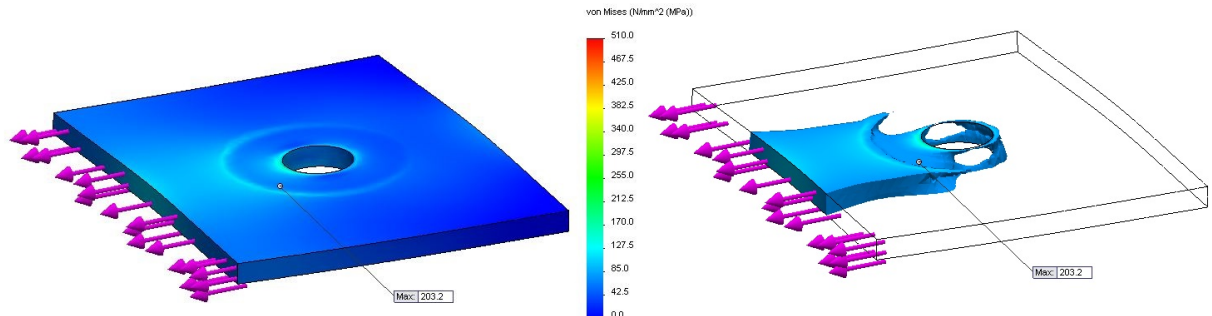
$$N_{pl,Rd} = 37\,275 \text{ N} > 11\,500 \text{ N}$$

Koska perusaineen kestävyys ylittää diagonaalia kuormittavan suurimman voiman, todetaan diagonaalin kestävänsä siihen kohdistuvat voimat.

6.4.4 Diagonaalin pään FEM-tarkastelu

Kuvassa 18 on esitetty diagonaalin pään FEM-tarkastelu. Kuvasta vasemmalta nähdään, että jännitykset ovat varsin maltilliset, paikallisen maksimijännityksen ollessa 203,2 MPa. Kuvassa oikealla on esitetty yli 75 MPa:n alueet jännitystä kuvaavalla värillä. Nähdään, että odotetusti suurimmat jännitykset tulevat reiän

ympäristöön sekä ruuvien taakse olevalle kannakselle. Voiman vaikutussuunta on kuvattu nuolilla. Voiman suuruus on 11 500 N.



KUVA 18. Diagonaalien pään FEM-tarkastelu; vasemmalla jännitykset ja oikealla yli 75 MPa:n jännityksen ylittävät alueet

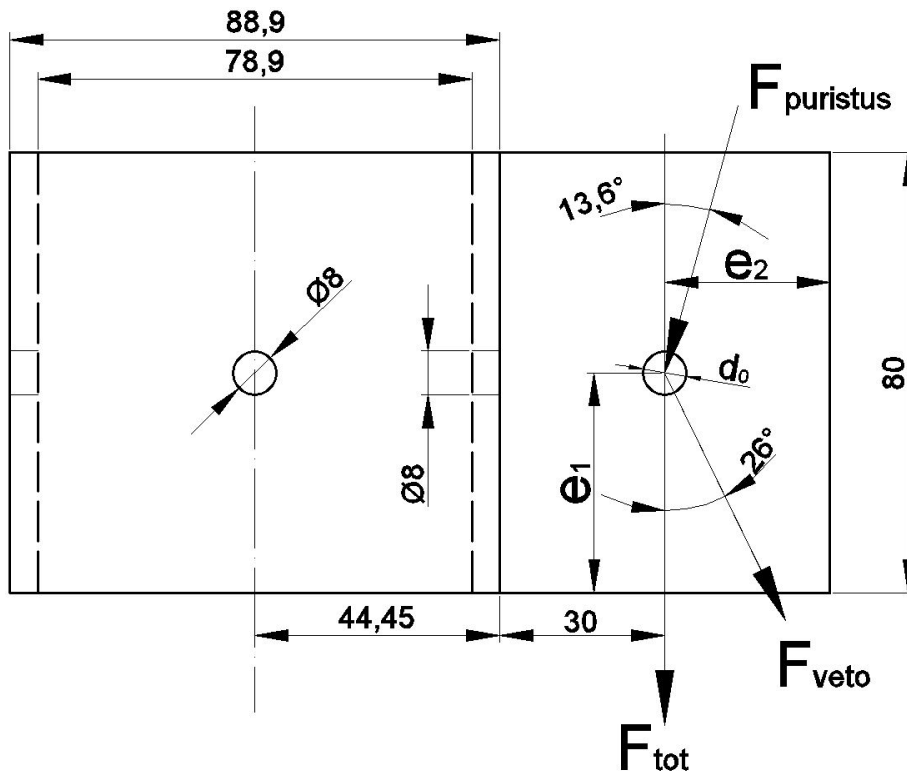
6.5 Diagonaalien sidonta paarteeseen

Mastossa paarteeseen kiinnitetään diagonaaleja. Tähän tarvitaan osa, jota kutsutaan diagonaaliholkiksi. Diagonaaliholkki muodostuu ulkohalkaisijaltaan 88,9 mm ja 5 mm paksusta putkesta, johon on hitsattu pienahitseillä kaksi evää kiinni. Evissä on reiät diagonaaleissa olevia reikiä varten. Yhteen reikään tulee vähintään M8-ruuvilla ja mutterilla kiinni kaksi diagonaalia vastakkaisille puolille evää. Myös putkessa on reiät, joista diagonaaliholkki kiinnitetään paarteeseen. Kuvassa 19 on esitetty opinnäytetyön tilaajan mastosta diagonaaliholkki.



KUVA 19. Diagonaaliholkki opinnäytetyön tilaajan mastossa

Kuvassa 20 on esitetty yksinkertaistettu diagonaaliholkki yhdeltä sivulta. Kuvassa on eri mittoja ja kulmia laskennan periaatetta selvittämään.



KUVA 20. Diagonaaliholkin mittoja

Taulukossa 20 on esitetty diagonaaliholkin mitoituksessa tarvittavia lähtöarvoja. Kuvassa 20 on taulukon 20 arvoja selventäviä merkintöjä, joiden avulla lähtöarvojen merkitys selventyy.

TAULUKKO 20. Diagonaaliholkin tarkastelun lähtöarvot

Suure	Arvo
Kiinnittimen reiän keskiön etäisyys reunasta, e_1 [mm]	40
Kiinnittimen reiän keskiön etäisyys reunasta, e_2 [mm]	30
Ruuvien nimellishalkaisija, d [mm]	8
Ruuvien halkaisija, d_0 [mm]	8
Materiaalipaksuus, s [mm]	3

Koska yhteen evään tulee kiinni kaksi diagonaalia, joudutaan diagonaalien välittä tämä resultanttivoima F_{tot} laskemaan trigonometrian avulla.

$$F_{tot} = \cos 13,6^\circ * 11\,500\,N + \cos 26,0^\circ * 6\,300\,N = 16\,840\,N$$

Saatu tulos 16 840 N on pienempi kuin kaavalla 15 laskettu M8 8.8 leikkauksen kestävyys.

6.5.1 Diagonaaliholkin kiinnitysruuvien leikkaantuminen

Lasketaan resultanttivoiman aiheuttama leikkaus ruuviin. Tapauksessa on kaksi leikkauspintaa yhtä ruuvien reikää kohden. Oletetaan, että kuvassa 20 keskellä holkkia oleva reikä ja siihen tuleva ruuvi toimii nivelenä, joka sallii pyörähtämisen itsensä ympäri. Näin diagonaaliholkin ulkopintaan syntyy ruuvia leikkaava voima, jonka suuruus lasketaan seuraavaksi.

$$F_l = \frac{F_{tot} * (44,45\,mm + 30\,mm)}{44,45\,mm} = \frac{16\,840\,N * 74,45\,mm}{44,45\,mm} = 28\,192,8\,N$$

Koska leikkauspintoja on holkin paksuudesta johtuen kaksi, voidaan kaavalla 15 laskettu M8 8.8:n leikkauksen kestävyys kertoa kahdella. $F_{V,Rd} = 2 \times 19\,301,9\,N = 38\,603,8\,N$. Nähdään, että M8 8.8 leikkauksen kestävyys on suurempi kuin holkkia alaspäin vääntävän voiman aiheuttaman jännityksen. Käytännössä ruuviksi valitaan silti vähintään M10 8.8 tai M12 8.8, vaikka laskemalla näyttää että M8 8.8 siihen kohdistuneet voimat kestää. Tämä siksi, että maston kokoonpanijalla on oltava tunne, että masto on turvallinen.

6.5.2 Diagonaaliholkin reunapuristuskestävyys

Diagonaaliholkin evän reunapuristuksen kestävyys on laskettu kaavan 18 avulla. Tekijä k_1 on pienempi seuraavista arvoista:

- $2,8 * \frac{30\,mm}{8\,mm} - 1,7 = 8,8$
- 2,5.

Tekijäksi k_1 tulee luku 2,5. Tekijä a_b on pienin seuraavista arvoista:

- $\alpha_d = \frac{40 \text{ mm}}{3 \cdot 8 \text{ mm}} = 1,67$
- $\alpha_d = \frac{800 \text{ MPa}}{510 \text{ MPa}} = 1,568$
- 1,0.

Tekijäksi a_b tulee luku 1. Diagonaaliholkin reunapuristuskestävyys lasketaan kaavalla 18.

$$F_{v,Rd} = \frac{k_1 * a_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 * 1,0 * 510 \frac{N}{mm^2} * 8 \text{ mm} * 3 \text{ mm}}{1,25} = 24\,480 \text{ N}$$

Nähdään, että sallittu arvo 24 480 N on suurempi kuin edellä laskettu $F_{tot} = 16\,840 \text{ N}$. Koska diagonaaliholkin reunapuristuskestävyys on suurempi kuin siihen kohdistuva kuormitus, todetaan, että holkki kestää siihen kohdistuvat voimat.

6.5.3 Diagonaaliholkin evän peruskestävyys

Diagonaaliholkin evän rakenneteräksen peruskestävyys on laskettu kaavan 20 avulla.

$$N_{pl,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} > F_d = \frac{(60 \text{ mm} - 8 \text{ mm}) * 3 \text{ mm} * 355 \frac{N}{mm^2}}{1,00} = 55\,380 \text{ N}$$

Nähdään, että sallittu arvo 55 380 N on suurempi kuin edellä laskettu $F_{tot} = 16\,840 \text{ N}$. Diagonaaliholkin evän peruskestävyys kestää siihen kohdistuvat voimat.

6.6 Kiinteät ylä- ja alajalat

Kuvassa 21 on esitetty opinnäytetyön tilaajan mastoissa oleva alajalka, josta selviää periaate. Yläjalkana on mahdollista käyttää samanlaista jalkaa, mutta silloin kannattaa jättää vedenpoistoa varten olevat reiät pois.



KUVA 21. Maston ala- ja yläjalka

6.6.1 Kiinteiden ylä- ja alajalkojen levyn taivutusjännitys

Työssä kiinteissä ala- ja yläjaloissa on vastaavat kappaleet sekä vaikuttavat voimat kuin paarteiden jatkoholkeissa. Siten putkiosaa ei tarvitse enää tarkastella. Sitä vastoin jalkojen alalevyn momenttia voidaan tarkastella ajattelemalla levy palkiksi, joka on tuettu reunoiltaan kiinteästi kaavan 23 avulla (20, s. 411).

$$M_F = \frac{F \cdot l}{8}$$

KAAVA 23

M_F = momentti, (Nmm)

F = levyä taivuttava voima, (N)

l = voiman vaikutusvarsi, (mm)

Levyssä vaikuttaa momentti, jonka suuruus on laskettu seuraavaksi.

$$M_F = \frac{F \cdot l}{8} = \frac{159\,000\text{ N} \cdot 130\text{ mm}}{8} = 2,58 \cdot 10^6\text{ Nmm}$$

Levyn taivutusvastus voidaan laskea kaavan 24 avulla (20, s. 463).

$$W = \frac{b \cdot a^2}{6}$$

KAAVA 24

W = taivutusvastus, (mm^3)

b = levyn paksuus, (mm)

a = levyn leveys, (mm)

Levyn taivutusvastus on laskettu kaavan 24 mukaan.

$$W = \frac{b \cdot a^2}{6} = \frac{10 \text{ mm} \cdot (130 \text{ mm})^2}{6} = 28\,166,7 \text{ mm}^3$$

Levyssä oleva taivutusjännitys voidaan laskea kaavan 25 avulla (20, s. 461).

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

KAAVA 25

σ_t = taivutusjännitys, ($\frac{N}{mm^2}$)

M_F = momentti, (Nmm)

W = taivutusvastus, (mm^3)

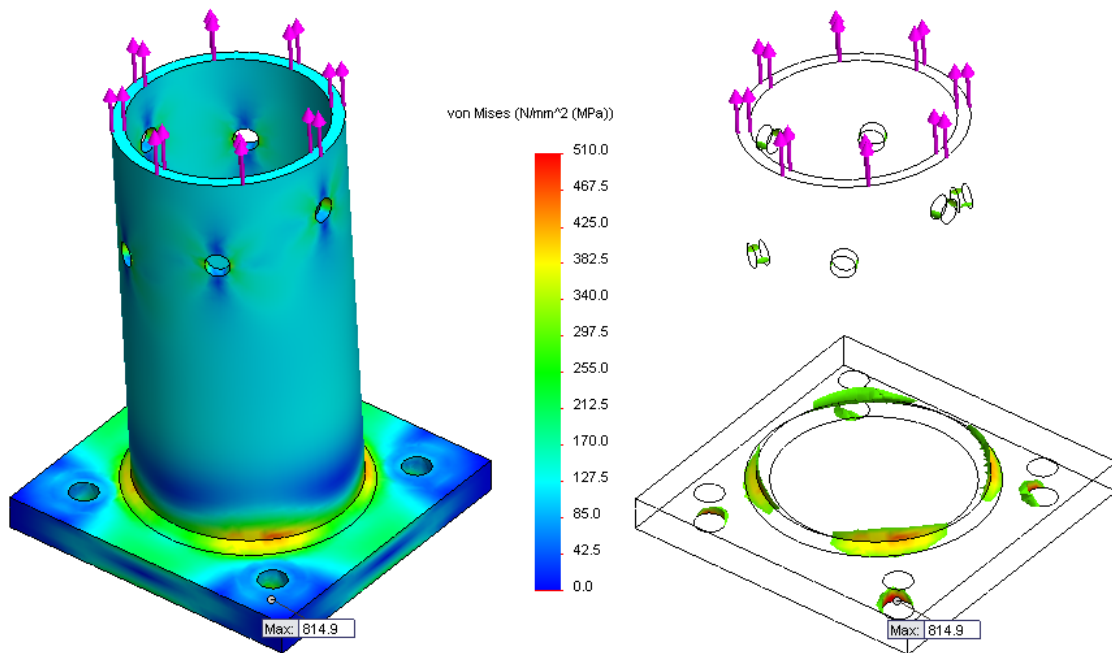
Levyn taivutusjännitys on laskettu kaavan 25 mukaan.

$$\sigma_t = \frac{M_F}{W} = \frac{2,58 \cdot 10^6 \text{ Nmm}}{28\,166,7 \text{ mm}^3} = 91,6 \frac{N}{mm^2}$$

Käytetyn materiaalin S355 alempi myötölujuus on esitetty taulukossa 17. Myötölujuus on alle 40 mm paksuisille levyille $355 \frac{N}{mm^2}$, joten levy kestää voiman aiheuttaman jännityksen.

6.6.2 Kiinteän ylä- ja alajalan FEM-tarkastelu

Kiinteiden jalkojen putkiosuus tarkastelu on samanlainen jo tarkastellun paarteiden pään kanssa. FEM-tarkastelu keskittyy enemmän levyyn ja sen reikien tarkasteluun. Kuvassa 22 on esitetty kappaleen FEM-tarkastelu.



KUVA 22. Ala- ja yläjalan FEM-tarkastelu; vasemmalla jännitykset ja oikealla yli 300 MPa:n jännityksen ylittävät alueet

Kuvassa 22 vasemmalla on esitetty jalan jännitykset värikartan avulla. Värikartan suurin arvo on 510 MPa. Maksimijännitys 614,9 MPa muodostui ruuvin reiän ympäristöön, mutta se on varsin pienellä alueella. Lisäksi maksimijännitys on pienempi kuin sallittu pintapaine. Kuvassa oikealla on esitetty vain yli 300 MPa:n jännityksen alueet jännitystä kuvaavalla värillä. Nähdään, että suurimmat jännitykset muodostuvat kiinnitysreikien ja hitsien ympäristöön.

FEM-tarkastelussa tuli ilmi, että ruuvien reikien ympäristöön syntyy sallitut arvot ylittävä jännitys 10 mm levyn paksuudella. Sopiva levyn paksuus FEM-analyysin perusteella on noin 14 mm.

6.7 Nivelletty jalka

Nivelletty jalka on mastossa tarpeen silloin, kun masto kokoonpannaan maassa, kiinnitetään kahdesta nivelestä perustuksiin ja vedetään pystyyn. Kuvassa 23 on esitetty erään tuulivoimalan nivel, josta periaate käy ilmi.

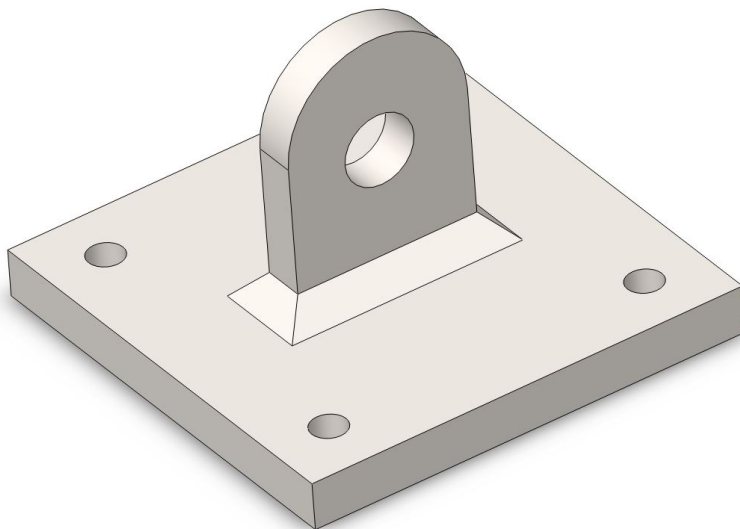


KUVA 23. Niveljalka

Nivel koostuu kolmesta kappaleesta, maston puoleisesta osasta, perustuksen puoleisesta osasta ja tappista, joka liittää osat yhteen. Suosittu tapa on käyttää ruuvia tappina, koska se on valmiina osana helposti saatavilla oleva sekä edullinen.

6.7.1 Perustuksen puolen nivelkappaleen mitoitus

Perustuksen puolen nivelkappaleen periaate on esitetty kuvassa 24. Kappale on muuten vastaava kuin ala- tai yläjalka, mutta putken tilalla on korvakko, jossa on reikä keskellä tappia varten.



KUVA 24. Perustuksen puolen nivelkappale

Kun halutaan mitoittaa niveltappi, tarkistetaan ensiksi niveltapin leikkauksenkestävyys kaavalla 26 (25, s. 40).

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 * A * f_{up}}{\gamma_{M2}} > F_{v,Ed}$$

KAAVA 26

$F_{v,Rd}$ = niveltapin leikkauksen kestävyys, (N)

A = niveltapin poikkileikkauksen pinta-ala, (mm^2)

f_{up} = niveltapin materiaalin vetomurtolujuus, ($\frac{N}{mm^2}$), taulukko 16

γ_{M2} = osavarmuusluku, taulukko 14

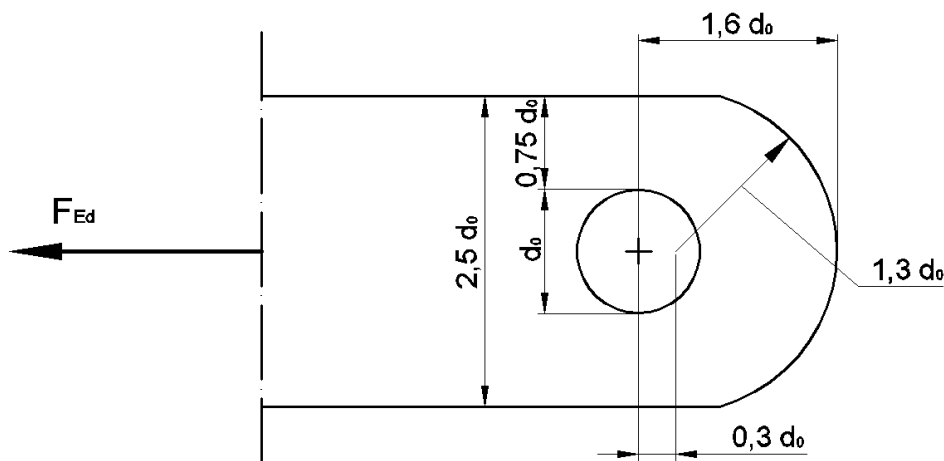
$F_{v,Ed}$ = niveltappiin vaikuttava voima

Niveltapiksi on valittu M24 8.8 ruuvi. Lasketaan niveltapin leikkauksen kestävyys.

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 * A * f_{up}}{\gamma_{M2}} > F_{v,Ed} = \frac{0,6 * \pi * \left(\frac{24 \text{ mm}}{2}\right)^2 * 800 \frac{N}{mm^2}}{1,25} > F_{v,Ed}$$

$$F_{v,Rd} = 173\,718 \text{ N} > 159\,000 \text{ N}$$

Kun tapin halkaisija ja sen kestävyys on selvillä, voidaan kuvan 25 periaatteella mitoittaa levyn geometria.



KUVA 25. Niveltapillisen rakenneosan geometriset mittavaatimukset (25, s. 39)

Levyn paksuuden pitää täyttää kaavan 27 ehto (25, s. 40).

$$t \geq 0,7 * \sqrt{\frac{F_{Ed} * \gamma_{M0}}{f_y}} \text{ ja } d_o \leq 2,5 t$$

KAAVA 27

$$t = \text{levyn paksuus, } \left(\frac{N}{mm^2}\right)$$

F_{Ed} = rakenneosaan vaikuttava voima, (N)

γ_{M0} = osavarmuusluku, taulukko 14

f_y = pienempi arvoista: niveltapin tai liitetyn levyn myötöraja, $\left(\frac{N}{mm^2}\right)$, taulukot 16 ja 17

Lasketaan kaavan 27 avulla levyn paksuus.

$$t \geq 0,7 * \sqrt{\frac{F_{Ed} * \gamma_{M0}}{f_y}} : d_o \leq 2,5 t$$

$$t \geq 0,7 * \sqrt{\frac{159\,000\,N * 1,0}{355 \frac{N}{mm^2}}} : 24\,mm \leq 2,5 * 16\,mm$$

$$t \geq 14,81\,mm : 24\,mm \leq 40\,mm$$

Nähdään, että levyn paksuus täytyy olla yhtä suuri tai yli 14,81 mm. Reiän halkaisijan ehto suhteessa levyn paksuuteen täyttyy, joten niveltapin rakenneosa kestää sille annetut jännitykset. Valitaan levyn paksuudeksi 16mm. Levyn ja niveltapin reunapuristus voidaan selvittää kaavalla 28 (25, s. 40).

$$F_{b,Rd} = \frac{1,5 * t * d * f_y}{\gamma_{M0}} \geq F_{b,Ed}$$

KAAVA 28

$F_{b,Rd}$ = levyn ja niveltapin reunapuristus, (N)

t = liitetyn levyn ainepaksuus, (mm)

d = niveltapin halkaisija, (mm)

f_y = pienempi arvoista: niveltapin tai liitetyn levyn myötöraja, $\left(\frac{N}{mm^2}\right)$, taulukot 16 ja 17

$F_{b,Ed}$ = rakenneosaan vaikuttava voima

Lasketaan kaavan 28 avulla levyn ja niveltapin reunapuristus

$$F_{b,Rd} = \frac{1,5 * t * d * f_y}{\gamma_{M0}} \geq F_{b,Ed} = \frac{1,5 * 16 \text{ mm} * 24 \text{ mm} * 355 \frac{N}{\text{mm}^2}}{1,0} \geq 159\,000 \text{ N}$$

$$F_{b,Rd} = 204\,480 \text{ N} \geq 159\,000 \text{ N}$$

Nähdään, että levyn ja niveltapin reunapuristuksen sallittu arvo on suurempi, kuin rakenneosaan vaikuttava voima.

6.7.2 Perustuksen puolen nivelkappaleen reunapuristus maston pystytysvaiheessa

Niveleen kohdistuu mastoa pystytettäessä voima, jonka laskenta on esitetty maston pystytystä käsittelevässä luvussa 5.5. Lasketaan niveleen kohdistuvan voiman reunapuristuskestävyys kaavan 18 avulla. Laskun yksinkertaistamiseksi tarkastellaan niveleen kohdistuvaa suurinta voimakomponenttia F_{nivel} perustuksen puolen nivelkappaleen heikoimpaan suuntaan. Näin ollaan tarkastelussa varmalla puolella. Pystytyksessä niveleen kohdistuu voima $F_{\text{nivel}} = 55\,483,1 \text{ N}$.

Tekijä k_1 on pienempi seuraavista arvoista:

- $2,8 * \frac{26,4 \text{ mm}}{24 \text{ mm}} - 1,7 = 1,38$
- 2,5.

Tekijäksi k_1 tulee luku 1,38. Tekijä a_b on pienin seuraavista arvoista:

- $\frac{18 \text{ mm}}{3 * 24 \text{ mm}} = 0,25$
- $\frac{800 \text{ MPa}}{510 \text{ MPa}} = 1,568$
- 1,0.

Tekijäksi a_b tulee luku 0,25. Perustuksen puolen nivelkappaleen reunapuristuskestävyys lasketaan kaavalla 18.

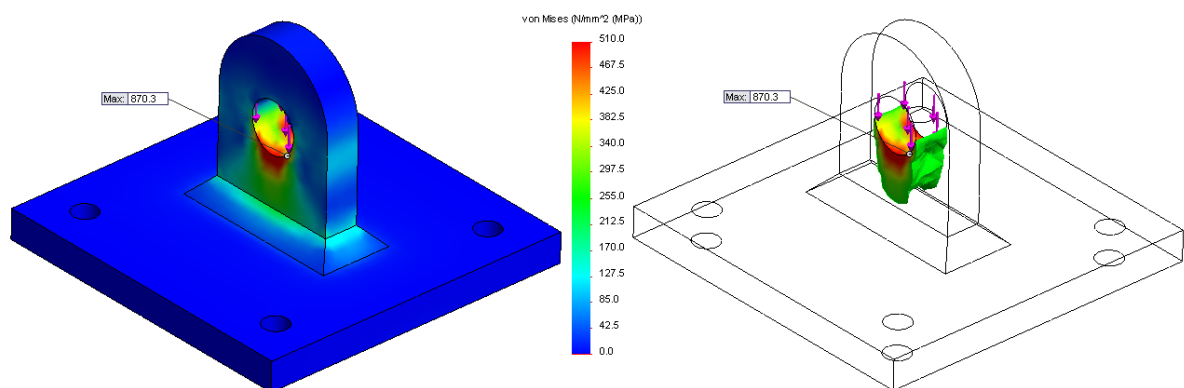
$$F_{v,Rd} = \frac{k_1 * a_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{1,38 * 0,25 * 510 \frac{N}{\text{mm}^2} * 24 \text{ mm} * 16 \text{ mm}}{1,25}$$

$$F_{v,Rd} = 54\,051,8 \text{ N}$$

Koska mastossa on niveliä kaksi, voidaan sallittu voima kertoa kahdella. Näin $F_{v,Rd}$ on $2 * 54\,051,8\text{ N} = 108\,103,6\text{ N}$. Nähdään, että sallittu arvo $108\,103,6\text{ N}$ on suurempi, kuin edellä laskettu $F_{nivel} = 55\,483,1\text{ N}$. Todetaan nivelien siis kestävän pystytyksen aikaiset kuormat.

6.7.3 Perustuksen puolen nivelkappaleen FEM-tarkastelu

Kuten edellä on todettu, on kappale hyvin samanlainen kuin ala- ja yläjalat. FEM-analyysi keskittyy tarkastelemaan nivelkorvakkoa ja siinä esiintyviä jännityksiä. Kuvassa 26 vasemmalla on esitetty jännitykset värikartan avulla. Värikartan maksimiarvo on 510 MPa. Maksimijännitys 870,3 MPa muodostuu nivelkappaleeseen, tapin kosketuspinnalle. Tämä on kuitenkin hyvin paikallinen arvo eikä se ylitä sallittua pintapainetta.



KUVA 26. Perustuksen puolen nivelkappaleen FEM-tarkastelu; vasemmalla jännitykset ja oikealla yli 250 MPa:n jännityksen ylittävät alueet

Kuvassa 26 oikealla on esitetty vain yli 250 MPa:n jännitykset alueet jännitystä kuvaavalla värillä. Nähdään, että suurimmat jännitykset muodostuvat odotetusti niveltapin reiän alapinnalle ja syvemmälle korvakkolevyyn.

6.7.4 Paarteen puolen nivelkappaleen mitoitus

Paarteen puolen nivelkappale on hyvin samanlainen kuin perustuksen puolen nivelkappale. Ainoana erona on, että nivelkorvakkoja on kaksi. Tarkasteltavaksi

jää ainoastaan nivelkorvakkojen levyn paksuus ja levyn ja niveltapin reunapuristus. Koska nivelkorvakkolevyjä on kaksi, jaetaan vaikuttava voima kahdella. Nivelkorvakon levyn paksuus lasketaan kaavan 27 avulla.

$$t \geq 0,7 * \sqrt{\frac{F_{Ed} * \gamma_{M0}}{f_y}} : d_o \leq 2,5 t$$

$$t \geq 0,7 * \sqrt{\frac{159\,000\,N * 1,0}{2 * 355 \frac{N}{mm^2}}} : 24\,mm \leq 2,5 * 12\,mm$$

$$t \geq 11,48\,mm : 24\,mm \leq 30\,mm$$

Nähdään, että levyn paksuus täytyy olla yli 11,48 mm. Reiän halkaisijan ehto täyttyy, joten niveltapin rakenneosa kestää sille annetut jännitykset. Valitaan levyn paksuudeksi 12 mm. Levyn ja niveltapin reunapuristus voidaan selvittää kaavan 28 avulla.

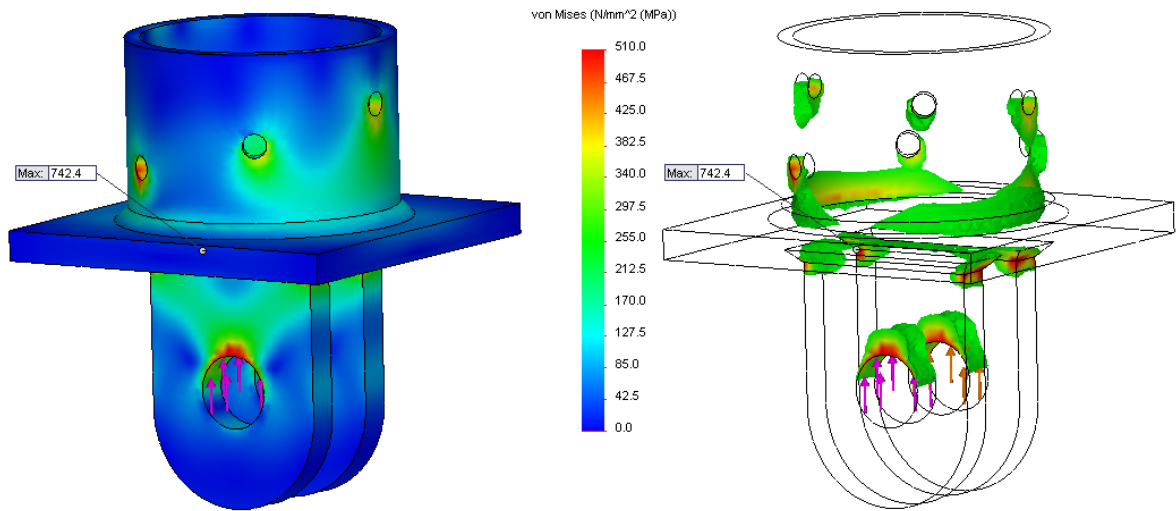
$$F_{b,Rd} = \frac{1,5 * t * d * f_y}{\gamma_{M0}} \geq F_{b,Ed}$$

$$F_{b,Rd} = \frac{1,5 * 12\,mm * 24\,mm * 355 \frac{N}{mm^2}}{1,0} \geq \frac{159\,000\,N}{2} = 153\,360\,N \geq 79\,500\,N$$

Nähdään, että levyn ja niveltapin reunapuristuksen sallittu arvo on suurempi kuin rakenneosaan vaikuttava voima.

6.7.5 Paarteen puolen nivelkappaleen FEM-tarkastelu

Paarteen puolen nivelkappaleen FEM-tarkastelu on esitetty kuvassa 27. Kuvassa vasemmalla on esitetty jännitykset värikartan avulla. Värikartan maksimi-arvo on 510 MPa. Maksimijännitys 724,2 MPa muodostuu nivelkorvakon juureen, hitsiin. Näin suuri jännitys on kuitenkin hyvin pienellä alueella.

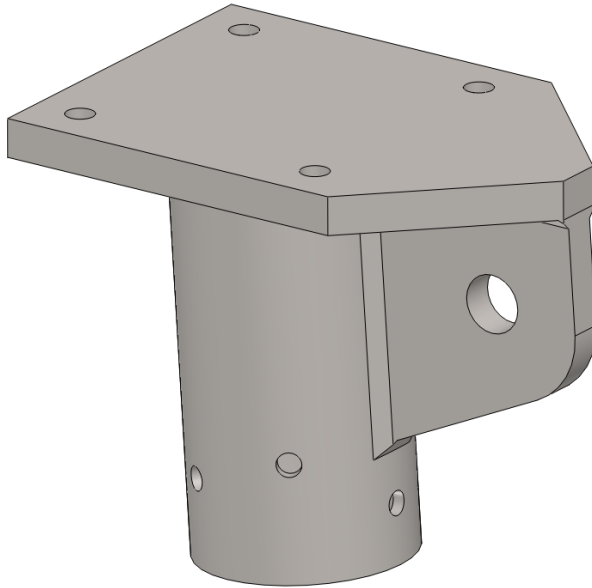


KUVA 27. Paarteen puolen nivelkappaleen FEM-tarkastelu; vasemmalla jännitykset ja oikealla yli 250 MPa:n jännityksen ylittävät alueet

Kuvassa oikealla on esitetty vain yli 250 MPa:n jännityksen alueet jännitystä kuvaavalla värillä. Nähdään, että suurimmat jännitykset muodostuvat tapin reikien pinnoille, nivelkorvakon hitseihin ja holkin alapään sisäpinnoille sekä kiinnitysreikiin. Voidaan todeta, että rakennekappaleen kestävän jännitykset, mutta hitseihin ja nivelkorvakkolevyjen liitoksen suunnitteluun kannattaa perehtyä varsinaisia liitososia suunniteltaessa.

6.8 Maston nostokorvakko

Maston nostokorvakko on yhdistetty yhteen yläjalan kappaleeseen. Rakenne on muuten samanlainen, mutta nostosuunnan puolelle pohjalevyyn on lisätty kielekke. Nostokorvakko on kiinnitetty vetosuunnan puolelle putkeen ja kielekkeeseen. Nostokorvakko sijoitetaan mastossa vastakkaiselle puolelle kuin kaksi nivelellistä alajalkaa. Näin nivelet pääsevät kääntymään, kun nostokorvakosta vedetään mastoa pystyyn vaijerin avulla. Pystyyn nostossa voidaan käyttää sopivan kokoista sakkelia. Kuvassa 28 on esitetty maston nostokorvakko.



KUVA 28. Maston nostokorvakko

6.8.1 Maston nostokorvakon mitoitus

Nostokorvakon mitoituksessa on käytetty samaa periaatetta, jolla nivelkappaleet mitoitettiin. Koska sakkeli on nostossa käytetty elin, siinä käytetään eri varmuuslukuja, kuin työssä käytetyissä standardeissa. Viisainta onkin valita sopiva sakkeli joltakin valmistajalta ja tarkistaa sen soveltuvuus. Sopiva sakkeli löytyy esimerkiksi Certexin internetsivuilta (31). Tapin halkaisija on 24 mm ja sallittu kuorma on 12,5 t eli $12\,500\text{ kg} * 9,81 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 122\,625\text{ N}$.

Korvakon muoto ei ole aivan samanlainen kuin kuvassa 24 niveltapillisen rakenneosan geometriset mitat. Tärkeimmiltä osiltaan se kuitenkin mukailee muotoa. Kun tapin halkaisija on selvillä, lasketaan sopiva levyn paksuus kaavan 27 avulla.

$$t \geq 0,7 * \sqrt{\frac{F_{Ed} * \gamma_{M0}}{f_y}} : d_o \leq 2,5 t$$

$$t \geq 0,7 * \sqrt{\frac{47\,319,8\text{ N} * 1,0}{355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}} : 24\text{ mm} \leq 2,5 * 16\text{ mm}$$

$$t \geq 8,08 \text{ mm} : 24 \text{ mm} \leq 40 \text{ mm}$$

Levyn paksuudeksi valittiin 16 mm, vaikka kaavan 27 mukaan ohuempikin olisi riittänyt. Korvakkoa käytetään nostossa, jossa mikään ei saa mennä pieleen ja varmuusluku on muuta rakennetta korkeampi. Lasketaan levyn ja niveltapin reunapuristuksen sallittu arvo kaavan 28 avulla. Tulosta verrataan laskettuun maston pystytyksessä tarvittavaan vetovoimaan 47 319,8 N.

$$F_{b,Rd} = \frac{1,5 * t * d * f_y}{\gamma_{M0}} \geq F_{b,Ed}$$

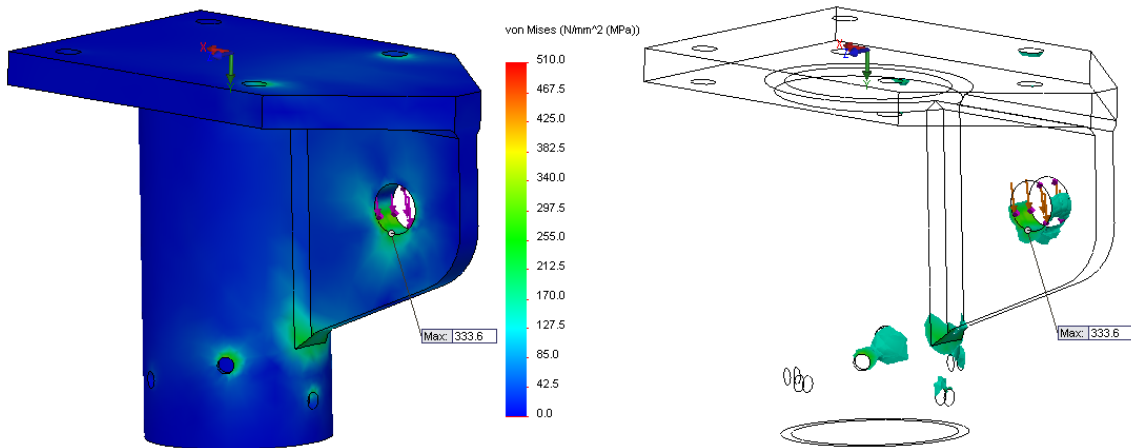
$$F_{b,Rd} = \frac{1,5 * 16 \text{ mm} * 24 \text{ mm} * 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1,0} \geq 47 319,8 \text{ N}$$

$$F_{b,Rd} = 204 480 \text{ N} \geq 47 319,8 \text{ N}$$

Levyn paksuudella 16 mm reunapuristuksen varmuusluku on noin 4,3. ja levyn paksuuden osalta noin 2,0.

6.8.2 Maston nostokorvakon FEM-tarkastelu

Paarteen puolen nivelkappaleen FEM-tarkastelu on esitetty kuvassa 29. Kuvassa vasemmalla on esitetty jännitykset värikartan avulla. Värikartan maksimiarvo on 510 MPa. Maksimijännitys 333,6 MPa muodostuu tapin reiän sisäpinnalle. Kuvasta nähdään, että nostokorvakko on mitoitettu tahallisesti järeäksi, jotta se kestää varmasti vaativan nostotilanteen.



KUVA 29. Maston nostokorvakon FEM-tarkastelu; vasemmalla jännitykset ja oikealla yli 150 MPa:n jännityksen ylittävät alueet

Kuvassa oikealla on esitetty vain yli 150 MPa:n jännityksen alueet jännitystä kuvaavalla värillä. Nähdään, että suurimmat jännitykset muodostuvat tapin reiän pinnoille ja holkin alapäähän korvakkolevyn kohdalle.

7 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli suunnitella edullinen, turvallinen, helposti kuljetettavissa oleva sekä asiakkaan itse kokoonpantavissa oleva mastosarja. Tavoitteisiin oli myös kirjattu tarkasteltavaksi itsestään seisovaa ja harustettua ristikkomastoa. Tavoitteena oli tuottaa mastojen liitososien geometriset mallit, lujuuslaskelmat, työpiirustukset ja kokoonpanopiirustukset. Työn edetessä mastojen suunnitteluvaiheeseen kävi nopeasti selväksi, että opinnäytetyön työmäärään nähden tavoitteet olivat liian laajat. Ristikkomasto ja harustettu masto ovat suunnittelutyön kannalta erilaisia tapauksia, joten päädyttiin jättämään harustetut mastot työstä pois. Niistä kerrottiin lyhyesti työn teoriaosassa.

Ensiksi suunniteltua 21 m maston mittoja hakiessa tehtiin kaiken kaikkiaan 11 erilaista mastomallia edellä kuvatuin tavoin. Tämä vei paljon aikaa. Seuraavan maston, 30 m korkean, suunnittelun jälkeen huomattiin, että opinnäytetyön tekemiseen varattu aika alkaa käydä vähiin. Tavoitteena oli suunnitella mastot mittoihin 18 - 30 m kolmen metrin välein. Mastot 18 m, 24 m ja 27 m jäivät työssä suunnittelematta. Ne ovat kuitenkin työn pohjalta kohtuullisella suunnittelulla toteutettavissa. Muutettavia asioita on alimman paarteen katkaisu oikean mittaiseksi sekä diagonaalien pituuksien sovittaminen jäljelle jääneisiin paarteisiin.

Mastojen suunnittelussa pois jäi myös mitoittaminen muille teholuokille kuin 10 kW. Alun perin suunnitelmissa oli mitoittaa mastoja myös turbiiniteholuokkaan 5 kW ja 20 kW. 10 kW tehoiselle turbiinille suunniteltu masto on hyvin käytettävissä myös 5 kW turbiinin kanssa. Markkinoilla olevia vapaasti seisovia ristikkomastoihin vertaamalla nyt suunniteltu 10 kW masto ei ole ylijäreä 5 kW:n turbiinille. Periaatteessa 20 kW masto on suunniteltavissa muuttamalla FEM-ohjelmistoon turbiinin tuuli- ja painokuorma. Tämän jälkeen tehtävänä olisi sopivien paarre- ja diagonaaliprofiilien hakeminen ja liitososien uusi suunnittelu kasvaneiden voimien vuoksi.

Liitososien osalta tehtiin niiden geometriamallit, lujuustekninen tarkastelu ja FEM-tarkastelu. Suunniteltuja liitososia on yhteensä kuusi. Alkuperäisestä suunnitelmasta työ- ja kokoonpanopiirustusten laatiminen jäi pois.

7.1 Työn tulokset

Valtaosa markkinoilla olevista vapaasti seisovista ristikkomastoista on toteutettu toisin kuin työssä suunnitellut mastot. Tyypillistä on, että profiileina on käytetty avoimia profiileja helpottamaan liitosten tekoa. Koska avoin profiili on nurjahdusteknisesti suljettua epäedullisempi, tulee mastoista enemmän materiaalia vieviä ja siten raskaita. Mikäli lujuusteknisesti suljettuja profiileja on käytetty, ne on liitetty lähes poikkeuksetta hitsaamalla toisiinsa. Työssä suunnitellut mastot ovat edullinen, itse kokoonpantava ja lujuusteknisesti hyvin optimoitu mastopari.

Työn tuloksina voidaan pitää myös mastojen spesifikaatioita. Spesifikaatio mastolle 21 m on esitetty liitteessä 2 ja 30 m mastolle liitteessä 3. Toisaalta tuloksena on mastojen solmupisteverkot. Työn tuloksia ovat myös laskelmat, lujuustekniset tarkastelut, liitososien 3D-mallit ja FEM-tarkastelut.

7.2 Vertailu markkinoilla oleviin mastoihin

Suomessa on valmistajia, jotka tarjoavat tuulivoimaloihin erilaisia mastoja. Tarjolla on vapaasti seisovia ja harustettuja ristikkomastoja sekä putkimastoja. Vertailuun otettiin neljä vapaasti seisovaa ristikkomastoa, joiden hinta löydettiin suoraan mastoja tarjoavien yritysten internet-sivuilta. Taulukossa 21 on esitetty löydetyt tiedot. Mastojen keskimääräinen korkeus oli 20,25 m, suunnitteluteho 7 kW, paino 798 kg, hinta 8 430 € (sis. alv 23%), hinta-painosuhte 11,1 €/kg ja hinta-tehosuhde 1 263 €/kW. Tämä on vertailumasto, johon opinnäytetyössä suunniteltua 21 m mastoa voidaan verrata.

TAULUKKO 21. Kaupallisia ristikkomastoja (32; 33; 34)

Maston myyjä	Korkeus, [m]	Maksimi teho, [kW]	Paino, [kg]	Hinta alv, [€]	Hinta-paino suhde, [€/kg]	Hinta-teho suhde, [€/kW]
Tuulivoimala.com	21	6,5	600	9 890	16,5	1 521,5
Tuulivoimala.com	24	6,5	900	10 989	12,2	1 690,6
Roaming	18	5	631	5 568	8,8	1 113,6
Bergey Wind	18	10	1 061	7 275	6,9	727,5
Keskiarvo	20,25	7	798	8 430	11,1	1 263,3

Työssä suunniteltu 21 m maston suunnitteluteho on 10 kW, paino 669 kg. Suunniteltu 21 m masto on korkeampi, turbiinin maksimikoko on suurempi ja masto painaa vähemmän kuin vertailuna käytettävä masto. Voidaan siis todeta suunnittelun onnistuneen varsin hyvin.

Työssä suunnitellun maston ja liitososien materiaalin kilohinta on noin 4 €/kg. 21 m maston materiaalien hinnaksi tulisi noin 2 680 €, (alv. 23 % 3 300 €). Alihankintakuluihin, kilpailijoiden mastoja nähden alhaisempaan myyntihintaan ja yrittäjän voittoon jää vertailumastoon nähden noin 5 000 €. Edellä olevasta tarkastelusta puuttuu myös se tieto, että vertailumaston turbiinin maksimiteho on 3 kW alhaisempi kuin työssä suunnitellun 21 m maston. Riippuen mastojen kysynnästä ja alihankintakuluista on mastoilla mahdollisuus tehdä liiketoimintaa.

8 POHDINTA

Työn tavoitteena oli suunnitella edullinen, turvallinen, helposti kuljetettavissa oleva sekä asiakkaan itse kokoonpantavissa oleva mastosarja. Pientuulivoimalaitoksen suunnittelun ja mitoituksen hankalin ja ehkä arveluttavin asia oli tuulikuorman määrittäminen mastoon runkoon ja turbiiniin. Työssä tehtiin kuormien määrittäminen mitä ilmeisemmin varman päälle. Toisaalta tarkempien ja lähempänä todellisuutta löytyvien menetelmien ja tapojen löytyessä olisi mahdollista keventää rakennetta. Näin saataisiin paremmin optimoituja ja keveämpiä mastoja turvallisuuden kärsimättä. Koska kyseessä on mahdollisesti taajamiin sijoitettavista tuulivoimaloista, ei niiden turvallisuudesta voi tinkiä. Siksi mahdollisimman todellisten tietojen saaminen olisi hyvä jo suunnittelijan omantunnonkin vuoksi.

Itse työn tekijänä ja suunnittelijana olen todella tyytyväinen maston mittojen hakeamiseen. Vaikka aikaa olisi ollut paljon enemmän, en nykyisillä lähtötiedoilla ja saatavilla olevilla standardiprofiileilla olisi parempaan pystynyt. Olisi ollut mielenkiintoista suunnitella laajempi mastosarja ulottaen se myös eri teholuokkiin.

Työ opetti minulle ristikoiden suunnittelusta ainakin perusteet sekä avasi uusimpien standardien käyttöä. Standardeja ensi kertaa selatessa on tiedon määrä ja standardien monimutkaisuus ja vaikealukuisuus häkellyttävä. Vaikka lujuusoppi ei ole juuri koskaan helppoa ja yksiselitteistä, tuntui, etteivät uudet standardit ainakaan tilannetta vieneet parempaan suuntaan. Toisaalta standardeihin kunnollisen perehtymisen jälkeen niiden käyttö oli helppoa.

8.1 Opinnäytetyön laajuus

Työ oli opinnäytetyön kannalta liian laaja. Työn hyödyllisyyden kannalta olisi kannattanut jakaa työ kahteen opinnäytetyöhön suunniteltaessa vapaasti seisovaa mastosarjaa. Sarja olisi voinut käsittää kolme eri teholuokkaan, 5 kW - 10 kW - 20 kW, suunniteltua sarjaa pituuksina kolmen metrin välein alkaen 18 metristä ja päättyen 30 metriin.

Ensimmäisessä työssä olisi perehdytty pelkästään mastojen mittojen optimointiin ja varsinkin diagonaalien pituuden optimointiin huomioiden raaka-aineena käytettävät 6 metrin salot. Nyt tehdyssä työssä ei ennetetty tarkastelemaan riittävän hyvin tehokasta materiaalin käyttöä. Varovasti arvioiden hukkaan menee useita kymmeniä metrejä diagonaaliprofiilia lyhyemmälläkin mastolla. Tämä lisää valmistuskustannuksia, jotka olisi pystyttävä siirtämään asiakkaan maksaan hintaan menekin kärsimättä. Työn tavoitteena oli kuitenkin maston pitäminen mahdollisimman edullisena, jotta investointikynnys olisi tuulivoimalaan mahdollisimman matala.

Toinen työ olisi käsittänyt liitososien suunnittelua lujustechnisesti sekä valmistuksen näkökulmasta. Materiaalitehokkuutta selvästi parantava ratkaisu olisi suunnitella diagonaalien risteyskohtaan jokin helposti käytettävä ja edullisesti valmistettavissa oleva kappale, jotta diagonaalien materiaalina käytettävät salot tulisi käytettyä mahdollisimman hyvin.

8.2 Lisäselvitystä vaativat ehdotukset

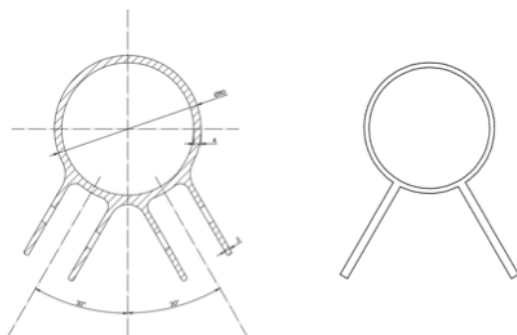
Yksi lisäselvityksaihe olisi perehtyä tuuliturbiinien kiinnitykseen mastoon mahdollisimman laajasti. Kun tiedettäisiin turbiinien vaatimukset ja yleiset kiinnityksperiaatteet, voitaisiin nopeasti suunnitella asiakkaan turbiinille sopiva kiinnityslevy alihankintaa tai asiakkaan omaa valmistusta ajatellen.

Tuulivoimalaitos tarvitsee lisäksi paljon erilaisia tarvikkeita ollakseen käyttökelpoinen. Mastossa saattaa olla tikkaat, erilaisia kaapeleita sähkön siirtoon ja ohjaukseen, vaijereita jarruille jne. Asiakasta helpottamaan voisi selvittää yleisimmin tarvittavat tarvikkeet, suunnitella niiden käyttö ja selvittää hyvä hankintapaikka tai jopa hankkia tarvikkeita asiakkaalle suoraan.

Lisäselvityksaiheena voisi olla myös asiakkaan kannalta valmiiden perustusten mittojen ja periaatteiden selvittäminen perustamispaikan maaperä huomioiden. Perustusten mitoista ja tekemisestä voisi tehdä yksityiskohtaiset ohjeet, joilla teknisesti suuntautuneen henkilön olisi mahdollista valmistaa itse perustukset tuulivoimalalleen.

Selvittämisen arvoinen seikka on myös profiilien valmistuttaminen alihankintana, esimerkiksi putkilaserleikkausta suorittavalla yrityksellä. Varsin houkutteleva vaihtoehto on teettää maston eri osat alihankintana. Mastoyrittäjän työksi jäisi osien pakkaaminen ja lähettäminen.

Mielenkiintoisin lisäselvityksen aihe on kuitenkin opinnäytetyön tilaajan idea käyttää paarreprofiilina alumiinia. Alumiiniprofiili pursotettaisiin asiakasprofiileita toimittavassa yrityksessä siten, ettei tarvittaisi erillistä diagonaaliholkkia. Diagonaalien sidonta olisi järjestetty suoraan paarteena toimivan alumiiniprofiilin eviin. Jos menekki olisi tarpeeksi suurta, olisi työkaluna tarvittavan vetokiven hankinta järkevää. Kuvassa 30 on esitetty idea asiakasprofiilista.



KUVA 30. Ehdotelmia alumiinisen asiakasprofiilin poikkileikkauksiksi

Asiakasprofiilien hinta hiukan suuremmissa erissä on nykyisin varsin kilpailukykyinen teräksen kanssa hinnan ja myös lujuuden kanssa. Lisäksi alumiini on huomattavan kevyt, joten se on helposti asiakkaan käsiteltävissä.

Työssä suunniteltujen mastojen kaupallinen hyödyntäminen ei kuitenkaan vaadi esitetyistä lisäselvitysehdotuksista muuta kuin liitososien alihankintaselvityksen. Myös yrittäjän mastojen liitososineen täysin itse valmistaminen on mahdollista, vaikkakin liitososien lukumäärästä johtuen epätodennäköistä. Yritystoiminnan lähtiessä toimimaan kokemus karttuu tuulivoimalan eri laitteista. Kokemuksen myötä olisi helpompi lähestyä lisäselvitysehdotuksia, koska tietämys laitteista olisi lisääntynyt. Nyt suunnitelluilla mastoilla voi hyvin aloittaa liiketoiminnan.

LÄHTEET

1. Vuorinen, Asko 2009. Energian käyttäjän käsikirja. Espoo: Ekoenergo Oy.
2. Ahola, Ville 2012. Tuuligeneraattorimastojen käännön ohjaus. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, automaatiotekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö.
3. Energy in Sweden, Facts and Figures 2010. 2010. Energimyndigheten. Saatavissa:
<http://webbshop.cm.se/System/TemplateView.aspx?p=Energimyndigheten&view=default&cat=/Broschyre&id=e0a2619a83294099a16519a0b5edd26f>.
Hakupäivä 30.6.2012.
4. Isosaari, Kyösti 2012. Mistä energiaa taloon? Omakotiasujan energia- ja ympäristöopas. Helsinki: Otavamedia Oy.
5. Electricity and natural gas price statistics. 2013. European Commission. Eurostat. Saatavissa:
http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Electricity_and_natural_gas_price_statistics#Publications. Hakupäivä 30.6.2012.
6. Sähkön kansainvälinen hintatilasto, 1. puolivuotiskausi 2011. 2013. Energia-teollisuus ry. Saatavissa: <http://www.slideshare.net/energiateollisuus/shkn-kansainvlinen-hintatilasto-1-puolivuotiskausi-2011>. Hakupäivä 30.6.2012.
7. Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 2013. Saatavissa:
<http://www.tuulivoimayhdistys.fi/>. Hakupäivä 1.7.2012.
8. Wikipedia, vapaa tietosanakirja. 2013. Saatavissa:
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Etusivu>. Hakupäivä 31.6.2012 - 29.4.2013.
9. European Wind Energy Association, EWEA. 2009. Wind Energy - The Facts. Lontoo: Earthscan.
10. WinWinD. Saatavissa: <http://www.winwind.com>. Hakupäivä: 1.8.2012

11. Tuulivoimayhtiö WinWinD hakeutuu yrityssaneeraukseen. 2013. Taloussanomamat 7.2.2013. Saatavissa:
<http://www.taloussanomamat.fi/energia/2013/02/07/tuulivoimayhtio-winwind-hakeutuu-yrityssaneeraukseen/20132148/12>. Hakupäivä 3.5.2013.
12. Iltavirta. Saatavissa: <http://www.ilmavirta.com/index.html>. Hakupäivä: 2.8.2012.
13. Mastot maisemassa. Ympäristöopas 107. 2003. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa:
<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=4318&lan=fi>. Hakupäivä 2.8.2012.
14. Wind Energy Basics. 2013. Draft upper great plains wind energy programmatic EIS. Saatavissa:
<http://plainswindeis.anl.gov/eis/what/index.cfm>. Hakupäivä: 3.5.2012.
15. Outinen, Hannu 2006. Statiikka tekniikan opiskelijoita varten. Tampere: Pressus Oy.
16. Windesol, uusiutuvien energialähteiden tietosanakirja. 2013. Saatavissa:
<http://windesol.fi/>. Hakupäivä 14.8.2012.
17. RIL 201-1-2011. 2011. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat, eurokoodit EN 1990, EN 1991-1-1, EN 1991-1-3, EN 1991-1-4. 2011 Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
18. Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus Eurocode 3 -oppikirja. 2011. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry.
19. Väisänen, Päivi 2007. Teräs, Perustietoa arkkitehtipiskelijälle. Saatavissa:
http://arkkitehtuuri.tkk.fi/oppituolit/ro/julkaisut/Teras_web.pdf. Hakupäivä: 14.8.2012.
20. Valtanen, Esko 2010. Tekniikan Taulukkokirja. Jyväskylä: Genesis-Kirjat Oy.

21. Säkkinen, Jukka 2011. T312003 Valmistustekniikka 1, 3 op. Opintojakson oppimateriaali keväällä 2011. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
22. Aaltonen, Kalevi – Aromäki, Mauri – Ihalainen, Erkki – Sihvonen, Pentti 2009. Valmistustekniikka. Helsinki: Otatietao, Gaudeamus Helsinki University Press, HYY-yhtymä.
23. Tietoa ruuviliitoksesta. 2011. Imatran Pultti Oy. Saatavissa: http://www.imatranpultti.fi/images/pdfs/tietoa_ruuviliitoksista.pdf. Hakupäivä 15.8.2012.
24. SFS-EN 1993-1-1. 2005. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
25. SFS-EN 1993-1-1. 2006. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten mitoitus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
26. SFS-EN 1993-3-1. 2006. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 3-1: Mastot ja savupiiput. Mastot. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
27. Rakenneputket. EN 1993 -Käsikirja 2012. 2012. Saatavissa: https://software.ruukki.com/Ruukki-Rakenneputket-Kasikirja-2012_PDF-versio.pdf. Hakupäivä 29.4.2013. Hämeenlinna: Rautaruukki Oyj.
28. Vensys 64 Calculated power curve. 2013. Indigo Wind Energy Systems. Saatavissa: http://www.indigowindenergy.com/PC_64_77.html. Hakupäivä 21.4.2013.
29. Lahtinen, Pekka 2012. T316003 Kone-elimet 1, 3 op. Opintojakson oppimateriaali keväällä 2012. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
30. Saarineva, Jarmo 1995. Lujuusoppi. Tampere: Pressus Oy.

31. Certex Finland Oy. 2013. Saatavissa: <http://www.certex.fi>. Hakupäivä 6.4.2013.
32. Tuulivoimala.com. 2013. Saatavissa: <http://www.tuulivoimala.com/Default.asp>. Hakupäivä 29.4.2013.
33. Roaming Oy. 2013. Saatavissa: <http://roaming.fi/index.htm>. Hakupäivä 29.4.2013.
34. Bergey Wind Power. 2012. Saatavissa: <http://bergey.com>. Hakupäivä 29.4.2013.

LIITTEET

Valmistaja / Myyjä	Malli	Nimellisteho [kW]	Roottorin pyyhkäisyypinta-ala [m ²]	Teho/pinta-ala -suhde [W/m ²]	Nimellistehoon tarvittava tuulenoisuus [m/s]
Eveco	10 kW Turbine	9,6	73,9	129,2	11,0
Green Energy Solutions	Winforce 10 KW Wind Turbine	10,0	75,4	132,6	9,0
Bergey WindPower	10 kW Bergey Excel 10	8,9	38,5	231,2	11,0
Tairui Windpower Co. LTD	10 KW Wind Turbine	12,2	50,3	242,5	12,0
Hummer Wind Power	Hummer 10kW	10,0	50,3	198,8	10,0
FuturEnergy	AirForce 10	11,5	50,3	228,6	10,0
Aeolos Wind Turbine	10 kW Wind Turbine	10,0	50,3	198,8	10,0
Ningbo East Energy International Trading Co., Ltd	10 KW	10,0	50,3	198,8	10,0
Westwind Wind Turbines	10KW WEST-WIND	10,0	32,2	310,6	12,0
Fortis Wind Energy	Alize Wind Turbine	10,0	38,5	259,7	13,0
GoGreen	GSI-EFD-10KW	10,0	50,3	198,8	10,0
Hopeful Wind Energy Technology	H8-10K	10,0	50,3	198,8	10,0
Ventera Energy	VT10-240	10,0	35,0	285,7	13,0
Nanjing Supermann Industrial&Trading Co.,Ltd.	LS-10KW	10,0	50,3	198,8	10,0
Saffehanda	Horizontal Axis Wind Turbine 10kw	10,0	50,3	198,8	10,0
Ningjin Huaya Industry Co., Ltd	FD8-10kw	10,0	50,3	198,8	12,0
Wisteria Energy	WHW-10 kW	10,0	50,3	198,8	10,0
Saiam Power	SA-10KW	10,0	38,5	259,7	10,0
Kodin vihreä energia Oy	Ilmari 10 kW	10,0	70,9	141,0	9,5
Finesse Finland Oy	LT8.0-10kW	10,0	50,3	198,8	10,0
Keskiarvot		10,1	50,3	210,5	10,6

21 m MASTON SPESIFIKAATIO**Päämitat**

Leveys	2800 mm
Syvyys	2 425 mm
Korkeus	21 000 mm

Kuormien osavarmuusluvut

Roottorin tuulikuorma	1,6
Maston tuulikuorma	1,6
Maston rakenteiden oma kuorma	1,2
Turbiinin painon kuorma	1,2

Profiilien raaka-aineet

Paarteet	S355 76,1x3,0
Diagonaalit	S355 50x30x1,25
Kiinnitysosat	S355 88,9x5,0
	S355 levy, paksuudet 3, 12 ,14 ja 16 mm

Massat

Paarteiden massa	341 kg
Diagonaalien massa	259 kg
Kiinnikkeiden massa	69 kg
Yhteismassa	669 kg

Profiilien kulutus

Paarteet	63,0 m
Diagonaalit	85,6 m

Mitoituksen lähtöarvot

Mitoitusteho	10 kW
Roottorin pyyhkäisyypinta-ala	61,4 m ²
Tuulen nopeus	21 m/s

Osien lukumäärät

Paarre	12 kpl
Diagonaali	60 kpl
Kiinteä ala- ja yläjalka	3 kpl
Kiinteä yläjalka ja nostokorvakko	1 kpl
Niveljalka, perustuksen puoli	2 kpl
Niveljalka, paarteen puoli	2 kpl
Paarteen jatkoholkki	9 kpl
Diagonaaliholkki	33 kpl

Kuormat

Mitoitusteho	10 kW
Roottorin tuulikuorma	8 800 N
Maston tuulikuorma	3 000 N
Maston rakenteiden oma kuorma	6 500 N
Turbiinin painon kuorma	7 500 N
Huipun suurin siirtymä	171 mm

30 m MASTON SPESIFIKAATIO**Päämitat**

Leveys	3 807 mm
Syvyys	3 297 mm
Korkeus	30 000 mm

Kuormien osavarmuusluvut

Roottorin tuulikuorma	1,6
Maston tuulikuorma	1,6
Maston rakenteiden oma kuorma	1,2
Turbiinin painon kuorma	1,2

Profiilien raaka-aineet

Paarteet	S355 76,1x3,0
Ylimmät diagonaalit	S355 50x30x1,25
Alimmat diagonaalit ja vaakasiteet	S355 78x38x1,25
Kiinnitysosat	S355 88,9x5,0
	S355 levy, paksuudet 3, 12, 14 ja 16 mm

Massat

Paarteet	487 kg
Ylimmät diagonaalit	259 kg
Alimmat diagonaalit ja vaakasiteet	193 kg
Kiinnikkeet	94 kg
Yhteismassa	1 033 kg

Profiilien kulutus

Paarteet	90,0 m
Ylimmät diagonaalit	85,6 m
Alimmat diagonaalit ja vaakasiteet	80,8 m

Mitoituksen lähtöarvot

Mitoitusteho	10 kW
Roottorin pyyhkäisyypinta-ala	61,4 m ²
Tuulen nopeus	21 m/s

Osien lukumäärät

Paarre	15 kpl
Diagonaali	78 kpl
Vaakasiteet	9 kpl
Kiinteä ala- ja yläjalka	3 kpl
Kiinteä yläjalka ja nostokorvakko	1 kpl
Niveljalka, perustuksen puoli	2 kpl
Niveljalka, paarteen puoli	2 kpl
Paarteen jatkoholkki	12 kpl
Diagonaaliholkki	54 kpl

Kuormat

Mitoitusteho	10 kW
Roottorin tuulikuorma	8 800 N
Maston tuulikuorma	3 850 N
Maston rakenteiden oma kuorma	6 500 N
Turbiinin painon kuorma	7 500 N

Huipun suurin siirtymä

285 mm