

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

TUULIVOIMAGENERAATTORIN ROOTTORIRAKENTEEN SUUNNITTELU
DESIGN OF ROTOR STRUCTURE IN WIND POWER GENERATOR

Lappeenrannassa 11.01.2013

Tommi Mäkelä

0341454

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO

LYHENTEET

1	JOHDANTO	6
2	TUULIVOIMALAT	8
2.1	Toimintaperiaate	9
2.2	Konehuone	9
2.3	Vaihteisto	10
2.4	Generaattori	11
2.5	Rakenteeseen kohdistuvat kuormitukset.....	12
2.6	Hyötysuhde	14
2.7	Eri tuulivoimalatyypit	15
2.7.1	Vakionopeuksinen tuulivoimakäyttö	15
2.7.2	Muuttuvanopeuksinen tuulivoimakäyttö täysitehoisella taajuusmuuttajalla ...	16
2.7.3	Muuttuvanopeuksinen tuulivoimakäyttö osatehoisella taajuusmuuttajalla	17
2.7.4	Muuttuvanopeuksinen tuulivoimakäyttö muutettavalla roottorin resistanssilla	17
2.7.5	Konseptien välinen vertailu	18
2.8	Kuljetukseen ja asennukseen liittyvät ongelmat	19
3	TEHTÄVÄNMÄÄRITTELY, LUONNOSTELU JA KEHITTELY.....	20
3.1	Vaatimuslistan laatiminen.....	20
3.2	Abstrahointi	21
3.3	Toimintorakenne	22
3.4	Luonnostelu	22
3.5	Kokonaisratkaisujen esittely	24
3.6	Kokonaisratkaisujen vertailu	30

4	TULOSTEN TARKASTELU.....	33
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	37
	LÄHTEET	39
	LIITTEET	

SYMBOLILUETTELO

A	[m ²]	Turbiinin lapojen pyyhkäisyypinta-ala
A_s	[mm ²]	Ruuviliitoksen pinta-ala
B	[T]	Seisojan käämityksen kehittämä magneettivuon tiheys
C_p	[-]	Tehovakio
d	[mm]	Ilmaväliahkaisija
E_k	[J]	Liike-energia
F	[N]	Magneettinen vetovoima
F_c	[N]	Keskipakoisvoima
f	[Hz]	Verkon taajuus
g	[m/s ²]	Painovoima
I	[A]	Sähkövirta
k	[J/K]	Boltzmannin vakio
l	[mm]	Pituus
n	[m/s]	Pyörimisnopeus
n_s	[m/s]	Tahtinopeus
P	[W]	Teho
p	[-]	Napaparien lukumäärä
R_{er}	[MPa]	Myötölujuus
s	[-]	Jättämä
smv	[Nm]	Sähkömotorinen voima
T	[Nm]	Vääntömomentti
V	[N]	Leikkausvoima
v	[m/s]	Nopeus
z	[-]	Ruuvien lukumäärä
ρ	[kg/m ³]	Ilman tiheys
τ	[MPa]	Leikkausjännitys

LYHENTEET

DFIG	<i>Double Fed Induction Generator</i> , kaksoissyöttöinen epätahtigeneraattori
EWEA	<i>European Wind Energy Association</i> , Euroopan tuulivoimatuottajien edunvalvontajärjestö
SCIG	<i>Squirrel-cage Induction Generator</i> , oikosulkugeneraattori
PMG	<i>Permanent Magnet Generator</i> , kestmagneettigeneraattori
PSMG	<i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i> , kestmagneettitahtigeneraattori
RPM	<i>Revolutions per minute</i> , kierrosta minuutissa
WRIG	<i>Wound Rotor Induction Generator</i> , liukurengasgeneraattori

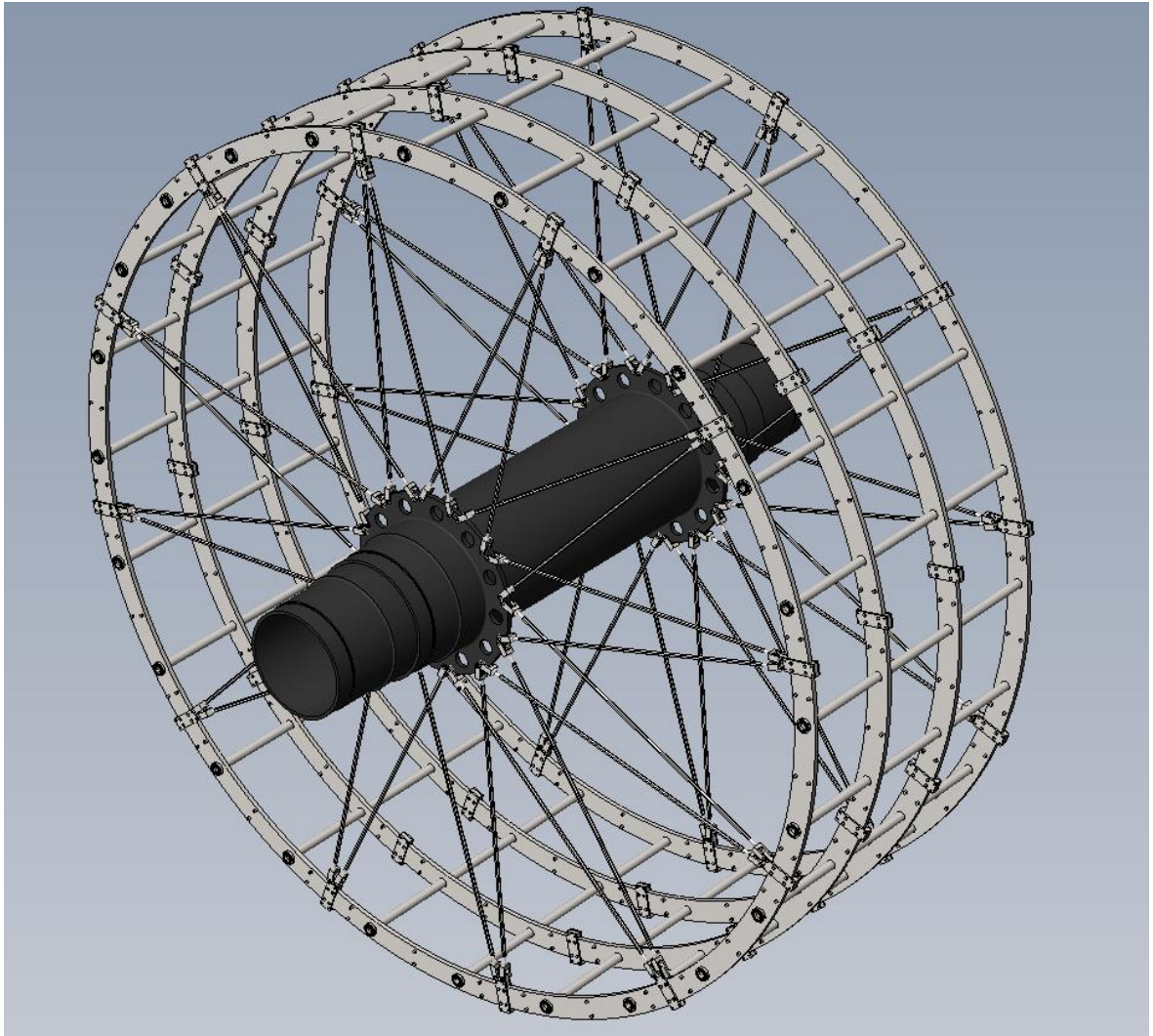
1 JOHDANTO

Ekologisuus on tällä hetkellä yksi tärkeimmistä teollisuuteen vaikuttavista tekijöistä, minkä johdosta uusiutuvien energianlähteiden käyttöä pyritään lisäämään. Tuulivoima on uusiutuva energianlähde, joka soveltuu hyvin paikalliseen energiantuotantoon. Tuulivoima on lisäksi ekologisimpia tapoja tuottaa energiaa, sillä uusiutuvana luonnonvarana tuulivoiman käyttö hidastaa ilmastonmuutosta, jos sillä korvataan esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Tuulivoimalla tuotettiin 3 % Euroopan sähköstä vuoden 2007 lopussa. Euroopan tuulivoimatuottajien edunvalvontajärjestö (*EWEA*) ennustaa tuulivoimalla tuotettavan sähkön määrän olevan 13 % vuonna 2020. (Suomen tuulivoimayhdistys, 2012.)

Tässä kandidaatintyössä käsitellään tuulivoimalan generaattorin roottorirakennetta. Roottorin suunnittelussa hyödynnetään olemassa olevaa roottorimallia, jota pyritään kehittämään sekä ideoimaan uusia ratkaisuja nykyisen mallin suunnitteluun. Tehtävänannon kannalta yksi oleellisimmista asioita on roottorin koko. Roottorirakenteiden suunnittelua rajoittaa niiden suuri koko, jolloin osia ja osakokoonpanoja on hankala käsitellä suuren painon takia. Tämän johdosta osat on suunniteltava pienempinä komponentteina, jotka liitetään toisiinsa lopullisessa kasausvaiheessa. Lisäksi tärkeäksi muodostuu liitoselementtien kiinnitys roottorin kehällä sekä liitoksien toiminta, minkä johdosta työssä pyritään kehittämään uusia ratkaisuja kehän liitoselementteihin.

Roottorirakenteen pinnat kiinnitetään päistään sisäosan akseliin ja ulkokehälle. Pintojen kiristäminen ja kiinnittäminen on oleellista laitteen toiminnan kannalta, sillä kehän muodon on pysyttävä pyöreänä. Lisäksi pinnat ovat tärkeässä osassa koottaessa roottorirakennetta, sillä niiden avulla pystytään suorittamaan osakokoonpanojen yhdistäminen. Roottorirakenteeseen kohdistuu suuri vääntö sen pyöriessä, joten pienetkin muodonmuutokset voivat aiheuttaa vaurioita rakenteeseen.

Kuvassa 1 esitettyä alkuperäinen roottorikokoonpanon rakenne.



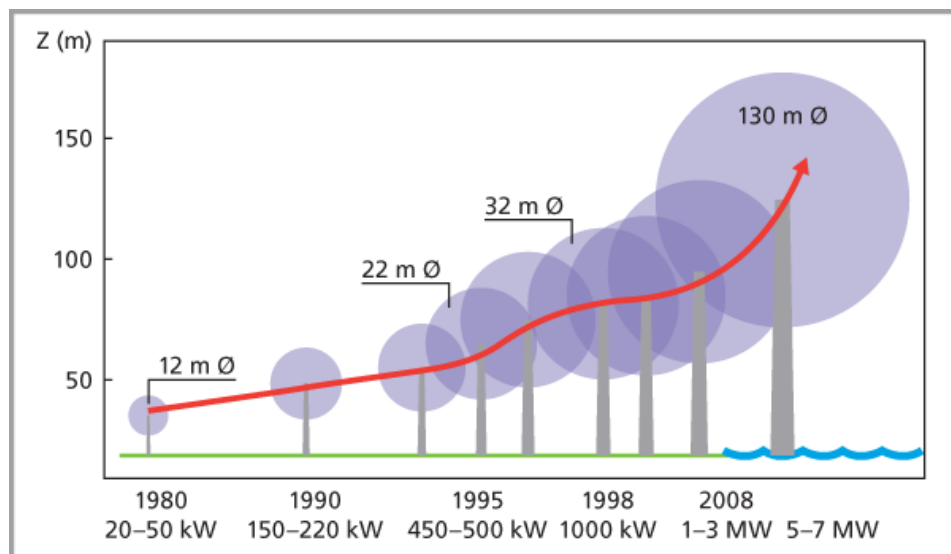
Kuva 1. Tuulivoimageneraattorin roottorirakenne (LUT Scott Semken, 2012).

Työn tavoitteena on kehittää roottorirakennetta valmistukseen, asennukseen ja suorituskyykyyn liittyvien toimintojen osalta. Toisessa luvussa käydään ensin läpi tuulivoimaloiden yleistä rakennetta. Lisäksi luvussa esitellään työhön liittyviä keskeisiä teoretietoja sekä käydään läpi tuulivoimaloiden jakoperusteita generaattoreiden perusteella. Luvun lopussa esitellään asennukseen vaikuttavia ulkopuolisia tekijöitä. Kolmannessa luvussa esitellään suunnittelun kannalta keskeisiä asioita järjestelmällisen tuotesuunnittelun perusteella. Lisäksi luvussa esitellään alkuperäisen mallin pohjalta suunniteltuja uusia osakomponenttien kehitysideoita sekä erilaisia kokonaisratkaisuvaihtoehtoja roottorirakenteen asennukseen. Neljännessä luvussa kootaan tärkeimmät tulokset yhteen ja viimeisessä luvussa käydään läpi johtopäätökset.

2 TUULIVOIMALAT

Sähkönkulutus jatkaa kasvuaan, vaikka kulutuksen vähentäminen olisi suotavaa ilmastonmuutoksen kannalta. Euroopan Unionin projektin 20-20-20 tavoitteena on kasvattaa uusiutuvan energian käyttöä sekä parantaa energiatehokkuutta 20 % vuoteen 2020 mennessä. Energiatehokkuus on jäänyt taka-alalle puhuttaessa uusiutuvasta energiasta, vaikka se on usein helpoin ja nopein tapa hillitä kasvihuoneilmiötä. Energiatehokkuutta voidaan parantaa monella tapaa; yksittäiset kuluttajat voivat esimerkiksi vähentää valmiustilassa olevien laitteiden käyttöä sammuttamalla laitteet tai ostamalla parhaan energialuokituksen tuotteita. Suurin potentiaali löytyy kuitenkin teollisuudesta, joka vastaa suurimmasta osasta maailmanlaajuisesta sähkönkulutuksesta. (Coastline, 2012, s.12.)

Ilmastonmuutoksen hillitseminen tarkoittaa siirtymistä mahdollisimman vähäpäästöiseen energiajärjestelmään. Tämä puolestaan tarkoittaa valtavia markkinoita uusiutuvan energian markkinoille, joista yksi keskeisimmistä on tuulivoima. Tuulivoiman osuus koko maailman energiantuotannosta kasvaa nopeasti ja tuotteita pyritään kehittämään jatkuvasti. Tulevaisuuden tuulivoimalat ovatkin kokoluokaltaan huomattavasti suurempia kuin nykyiset, mikä puolestaan asettaa uusia haasteita niiden tuotekehitykselle. Kuvassa 2 esitettynä tuulivoimaloiden koon kasvu viimeisten vuosikymmenien aikana. (VTT, 2012.)



Kuva 2. Tuulivoimaloiden kasvu 1980-luvulta eteenpäin (Tuulivoimatieto, 2011).

Kuvasta voidaan huomata nopeaa kasvua etenkin 2000-luvulla. Tuulivoimaloiden koon kasvamisen myötä on saavutettu parempi aerodynamiikka. Lisäksi tuulisuus on parantunut korkeamman tornin ansiosta, minkä johdosta tuulivoimaloiden hyötysuhde on parantunut verrattuna pienempiin tuulivoimaloihin. Samalla vuosituotto on yli satakertaistunut kyseisenä aikavälinä. (Tuulivoimatieto, rakenne, 2011.)

2.1 Toimintaperiaate

Tuuliturbiinilla muutetaan tuulen eli virtaavan ilman liike-energiaa tuuliturbiinin akselin pyörimisenergiaksi eli mekaaniseksi energiaksi. Akseli pyörittää edelleen sähköä tuottavaa generaattoria ja tuottaa sähköä. Nykyään yleisimmin käytettävät 1-5 MW tuulivoimalaitokset ovat vaaka-akselisia, kolmelapaisia ja niiden roottori sijaitsee torniin nähden tuulen yläpuolella. Tämyntyyppisessä tuulivoimalassa pyörivien lapojen liike-energia muutetaan sähkövirraksi. (Tuulivoiman projektiopas, 1999, s.11.) Tuulivoimalan pyyhkäisyypinta-ala on potkurin uloimman osan piirtämä ympyrän pinta-ala. Vaaka-akselisten tuulivoimaloiden suurin etu onkin pyyhkäisyypinta-ala, jonka ansiosta tuulesta saadaan enemmän energiaa talteen. (Tuulivoimatieto, vaaka- ja pystyakseliset, 2011.)

Vaaka-akselisten tuulivoimaloiden käyttöä rajoittaa voimalan potkuri, joka on suunnattava aina tuulta kohti, jotta voimala toimisi (Tuulivoiman projektiopas, 1999). Tuulivoimalan sijoituspaikalla on energiantuotannon kannalta ratkaiseva merkitys, sillä tuulivoimalan edessä olevat esteet voivat aiheuttaa tuuleen turbulenssia, jolloin tuulivoimalan hyödynnettävissä oleva tuulennopeuskomponentti pienenee. Tämän vuoksi tuulivoimalat pyritään sijoittamaan avoimeen paikkaan, jotta päästäisiin parempaan vuosituotantoon. (Tuulivoimala, 2012.)

2.2 Konehuone

Konehuoneeseen on sijoitettuna vaihteisto, generaattori ja ohjausjärjestelmät. Konehuoneen koko ja muoto tulee huomioida erityisen tarkasti suunnitteluvaiheessa etenkin talvisia sääoloja silmällä pitäen. Tässä työssä pyrittiin suunnittelemaan ratkaisuja, jotka mahdollistavat roottorin paremman suorituskyvyn sekä helpottavat roottorin

asennusta kaikkina vuodenaikoina. Korkealla konehuoneella varustetun tuulivoimalaitoksen huolto voidaan tehdä ilman konehuoneen katon aukaisua, jolloin konehuoneeseen ei pääse likaa, pölyä, kosteutta tai esimerkiksi lunta. Tällöin päästään pienemmällä työllä käsiksi konehuoneen osiin sekä vältetään pahimmilta ympäristön hetkellisiltä vaikutuksilta.

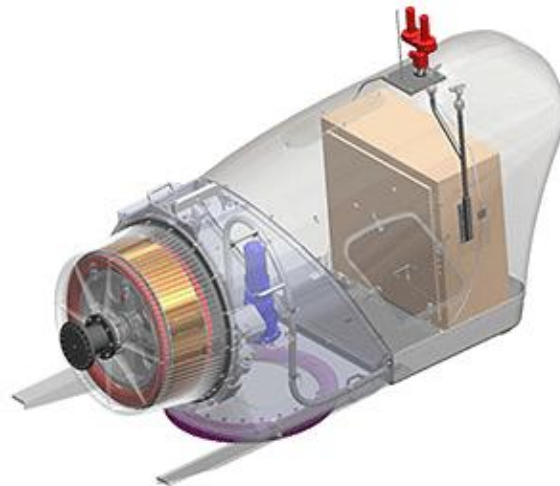
Vaihteisto muuntaa roottorin matalan kierrosluvun (10-40 *rpm*) generaattorille sopivaksi (1000-1500 *rpm*). Generaattori on useimmiten 4- tai 6-napainen epätahtigeneraattori, jolloin sähköverkon taajuudesta määräytyy laitteen pyörimisnopeus. Erilliset moottorit kääntävät konehuonetta tuulen suuntaan suunta-anturin ja säätölaitteen avulla. Laitoksen pysäytys suoritetaan karkijarrun avulla sakkaussäätöisissä laitoksissa tai vaihtoehtoisesti lapaa kääntämällä pois tuulen suunnasta, kun kyseessä on aktiivisella sakkauksella varustettu tuulivoimalaitos tai lapakulmasäätöinen laitos. Lisäksi käytössä on vielä toinen erillinen pysäytysmekanismi, levyjarru, joka sijaitsee joko hitaalla tai nopealla akselilla. Levyjarru voi tarpeen tullen olla myös molemmilla akseleilla. Yleensä levyjarrua kuitenkin käytetään nopealla akselilla. (Tuulivoiman projektiopas, 1999, s.12.)

2.3 Vaihteisto

Tuulivoima on hyvin vaativa sovelluskohde, sillä vaatimustasot ovat tarkkuuden suhteen erittäin korkeita. Lähes kaikki laitokset perustuvat toistaiseksi mekaaniseen ylennysvaihteeseen roottorin ja generaattorin välissä. Vaihteisto vaatii toimiakseen todella säännöllistä tarkkailua ja huoltoa. Vaihteistoviat ovatkin melko yleisiä. Markkinoilla on ollut myös vaihteettomia laitoksia jo vuodesta 1994. Vaihteettomassa laitoksessa on erittäin moninapainen tahtigeneraattori, jolloin verkon vaatima taajuus voidaan saavuttaa jo hitaalla pyörimisnopeudella. Tässä ratkaisussa etuna on paino, sillä painavasta vaihdelaatikosta päästään kokonaan eroon. Haittana on tahtigeneraattorin ja tehoelektroniikan kalliit kustannukset sekä generaattorin suuri koko ja paino. Lisäksi niiden huolto on vaativaa, ja komponentit ovat vikaherkkiä. Näin ollen yhteisvaikutuksia laitoksen koko käyttöiän yli on hyvin vaikea arvioida. (Laaksonen, H. Repo, S. 2003, s.25.)

2.4 Generaattori

Pyörivät sähkökoneet muuntavat mekaanisen energian sähköenergiaksi, jolloin puhutaan generaattoreista (Aura, 1995, s.304-305). Yleisimmin käytetty generaattori on 4- tai 6-napainen epätahtigeneraattori, jolloin sen pyörimisnopeus määräytyy sähköverkon taajuudesta (Tuulivoiman projektiopas, 1999). Kuvassa 3 havainnollistettu generaattorin sijaintipiste.



Kuva 3. Generaattorin sijainti konehuoneessa (U.S Department of energy, 2012).

Epätahtikoneet ovat vaihtovirtakoneita, joiden toiminta perustuu pyörivään magneettikenttään koneen sisällä. Jokainen konetyyppi voidaan toteuttaa usealla eri tavalla, jolloin niiden ominaisuudet voidaan muokata tapauskohtaisesti. Kaikista normaalirakenteisista koneista voidaan erottaa seuraavat pääosat:

- Roottori eli pyörijä
- Staattori eli seisoja
- Laakerikilvet tai laakeripukit (isoilla koneilla)
- Laakerit

Roottori sijaitsee laakereiden varassa staattoriaukossa. Staattorin ja roottorin välissä on ilmarako, jotta roottori voi pyöriä vapaasti. Tässä työssä kiinnitettiin erityistä huomiota roottorin kehärakenteen suunnitteluun niin, että kehärakenteen ulkopinnat ovat tasaiset kaikkialla. Tällöin ilmarako on yhtä suuri joka kohdassa roottorirakenteen ulkopintoja. Laakerit ovat kiinnitettyinä laakerikilpiin, jotka puolestaan kannattelevat roottoria. Laakerikilvet sen sijaan ovat kiinnitettyinä staattoriin, joka muodostaa koneen rungon.

Staattoriin ja roottoriin on sijoitettu käämitykset, joiden muoto ja rakenne vaihtelevat erityyppisten koneiden mukaan. Koneissa on myös yleensä liitinkotelo, johon kytketään syöttökaapeli. (Handroos, 2011, s.2.)

Generaattorin toiminta perustuu magneettikentässä liikkuvaan johtimeen syntyvään sähkömotoriseen voimaan smv eli lähdejännitteeseen. Johtimen liikkeessä tietyllä nopeudella kohtisuoraan magneettikenttää vastaan syntyy sähkömotorinen voima E , joka voidaan laskea kaavasta

$$E=Blv \quad (1)$$

missä B magneettivuon tiheys, l on johtimen pituus ja v nopeus. Sähkömotorisen voiman syntyyn on merkitykseltään liikkuuko magneettikenttä vai johtimet. (Paavola, Lehtinen, 1991, s. 427.)

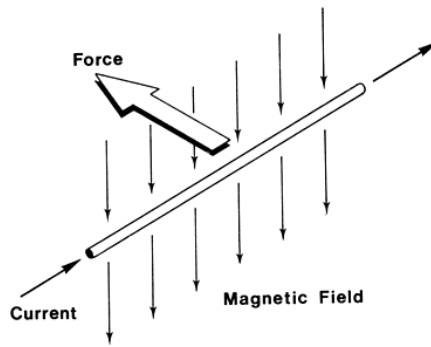
2.5 Rakenteeseen kohdistuvat kuormitukset

Työn kannalta oleellisia asioita ovat roottorirakenteeseen kohdistuvat kuormitukset. Kuormitusten vaikutus on otettava tarkasti huomioon suunniteltaessa roottorirakennetta. Roottorirakenteen huomattavan suuren koon johdosta pienikin vauriotapaus aiheuttaa ongelmia sen toimintaan.

Roottorin johdinsilmukassa vaikuttava virta aiheuttaa silmukan ympärille oman magneettikentän. Molemmat magneettikentät yhdistyvät, jolloin syntyy resultoiva kenttä. Johdinsilmukan niihin sivuihin, jotka leikkaavat magneettikenttää, vaikuttavat yhtä suuret, mutta vastakkaisuuntaiset voimat F eli voimapari, joka pyrkii kiertämään silmukkaa. Voima vaikuttaa kohtisuorasti sekä magneettikenttään että virralliseen johtimeen nähden. Sivuihin vaikuttavat magneettiset vetovoimat

$$F = IlB \quad (2)$$

missä I on johdinsilmukassa vaikuttava virta. Magneettivuon, virran ja voiman suunta suhteessa toisiinsa esitettynä kuvassa 4.



Kuva 4. Magneettivuon, virran ja voiman suunta (Handroos, 2011, s.3).

Rakenteeseen vaikuttava vääntömomentti T lasketaan akselin suhteen kaavalla

$$T = 2\pi F = dF = dlBI = kBI \quad (3)$$

jossa k on silmukan rakenteesta riippuva vakio. (Aura, L & Tonteri, A. J, 1995, s.316-317.)

Kun staattorikäimitykseen kytketään 3-vaiheinen jännite, käänitys synnyttää magneettikentän koneen ilmaväliin, jonka pyörimisnopeus eli tahtinopeus n_s on

$$n_s = \frac{f}{p} \quad (4)$$

missä f on verkon taajuus ja p napaparien lukumäärä.

Pyörivä magneettikenttä indusoi roottorikäimityksen jännitteen. Oikosuljettu käänitys synnyttää käänitykseen virran, joka luo ilmaväliin toisen pyörivän magneettikentän. Magneettikenttien välisen voimavaikutuksen eli vääntömomentin johdosta roottori lähtee pyörimään, kiihtyy ja jää pyörimään hieman magneettikentän nopeutta alhaisemmalla nopeudella. Roottorin pyörimisnopeuden n ja tahtinopeuden n_s suhteellista eroa kutsutaan jättämäksi s , joka saadaan kaavasta

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (5)$$

Tämän pyörimisnopeuden ja tahtinopeuden eron johdosta koneesta käytetään nimitystä epätahtikone. Generaattorina toimivan epätahtikoneen pyörimisnopeus on suurempi kuin tahtinopeus. (Handroos, 2011, s.9.)

Lisäksi roottorin suunnittelussa on huomioitava keskipakoisvoiman F_c sekä painovoiman g vaikutukset, jotka on otettava huomioon mallin suunnittelussa, sekä tutkittaessa roottorin kestävyyttä lujuustarkastelussa.

2.6 Hyötysuhde

Tuulivoimalaitoksen roottorin läpi virtaavan ilman tehosisällöstä saadaan teoriassa hyödynnettyä noin 59%, joka on samalla tuulivoimalaitoksen teoreettinen maksimihyötysuhde (Tuulivoiman projektiopas, 1999, s.10).

Tuulivoimalan tuottama teho riippuu tuulen nopeuden kolmannesta potenssista ja teho P saadaan laskettua yhtälöstä

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho v^3 A \quad (6)$$

jossa C_p on tehovakio, ilman tiheys ρ , tuulen nopeus v ja A roottorin pyyhkäisy-pinta-ala. (Auvinen, Lehtonen 2003.)

Käytännössä roottorihyötysuhteet ovat korkeimmillaankin 50% tietämällä. Häviöitä syntyy virtauksen turbulenttisuudesta, sillä roottori pystyy hyödyntämään virtauksesta pelkästään pyörimisakselin suuntaisen nopeuskomponentin. Lisäksi häviöitä aiheutuu lapaprofiilin ja roottorin pyörimisnopeuden epäoptimaalisuudesta. Näiden ohella pienempiä häviöitä syntyy roottorin lisäksi myös generaattorissa, voimansiirrossa muuntajassa ja kaapeleissa, mutta niillä on kokonaishyötysuhteen kannalta suhteellisen pieni merkitys. (Tuulivoiman projektiopas, 1999, s.10-11.)

2.7 Eri tuulivoimalatyypit

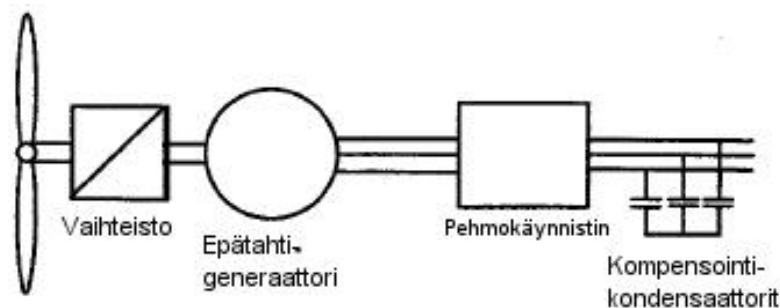
Tuulivoimalat voidaan jakaa pääryhmiin niiden rakenteiden ja käytettyjen generaattoreiden perusteella. Yleisesti käytetään seuraavaa jaottelutapaa:

- Vakionopeuksinen tuulivoimakäyttö
- Muuttuvanopeuksinen tuulivoimakäyttö täysitehoisella taajuusmuuttajalla
- Muuttuvanopeuksinen tuulivoimakäyttö osatehoisella taajuusmuuttajalla
- Muuttuvanopeuksinen tuulivoimakäyttö muutettavalla roottorin resistanssilla

Vaihteistoa käyttävillä tuulivoimaloilla yleinen jakoperiaate toteutetaan erottamalla moniportaisia vaihteita käyttävät generaattorit ja yksiportaisia vaihteita käyttävät hitaat generaattorit. (Hansen, 2007.)

2.7.1 Vakionopeuksinen tuulivoimakäyttö

Vakionopeuksisessa laitoksessa tuuliturbiinin roottori pyörii vakionopeudella riippumatta tuulennopeudesta. Generaattorina käytetään oikosulkugeneraattoria (*SCIG*), joka on kytkettynä suoraan verkkoon. Konseptia kutsutaan vakionopeuksiseksi, koska *SCIG* toimii ainoastaan kapealla alueella synkronisen nopeuden lähellä (Li, Chen, 2008). Roottorin pyörimisnopeus määräytyy verkon taajuudesta, epätahtigeneraattorin napaluvusta ja vaihteiston välityssuhteesta. Mikäli tuulennopeus muuttuu, vakionopeutta ylläpidetään generaattorin magnetoinnilla ja lapojen eri tehonsäätömenetelmillä. Kuvassa 5 periaatekuva tavallisen vakionopeuksisen tuulivoimalan rakenteesta.



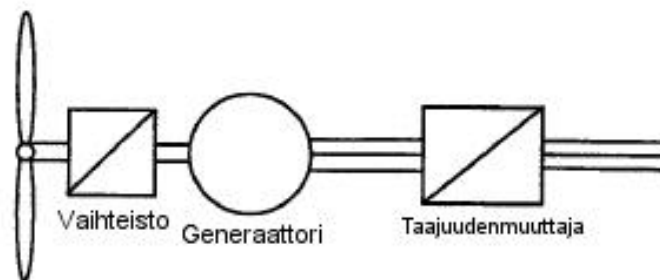
Kuva 5. Periaatekuva vakionopeuksisesta tuulivoimalasta (Laaksonen et al., 2003, s.15).

Nimellistuulennopeutta alhaisemmillä tuulennopeuksilla tehonsäätö toteutetaan vähentämällä generaattorin magnetointia ja tuulennopeuden kasvaessa toimitaan

päinvastoin eli kasvatetaan roottorin magnetointia, jolloin generaattori jarruttaa roottoria suuremmalla voimalla ja näin ollen ulos saatava teho kasvaa. (Laaksonen et al., 2003, s.14, 74.)

2.7.2 Muuttuvanopeuksinen tuulivoimakäyttö täysitehoisella taajuusmuuttajalla

Muuttuvanopeuksisissa laitoksissa koneisto määrää itse pyörimisnopeuden. Pyörimisnopeuden ja tuulenopeuden suhteen (kärkinopeussuhde) säilyessä pysyvästi lähellä optimia myös roottori toimii lähellä maksimihyötysuhdetta tuulenopeudesta riippumatta. Lisäksi tuuliturbiinin roottorin pyörimisnopeuden maksiminopeutta rajoitetaan, kun nimellisteho on saavutettu. Muuttuvanopeuksisten laitosten tuottamaa sähköä ei voida syöttää suoraan verkkoon. Tuotettu vaihtovataajuuksinen vaihtovirta tasasuunnataan ensin ja vaihtosuunnataan taajuudenmuuttajalla verkkotaajuiseksi vaihtovirraksi tämän jälkeen. Käytettävä generaattori voi olla joko tahti- tai epätahtigeneraattori. Kuvassa 6 esitettyä muuttuvanopeuksisen tuulivoimalan rakenne täysitehoisella taajuusmuuttajalla. (Tuulivoiman projektiopas, 1999, s.82.)

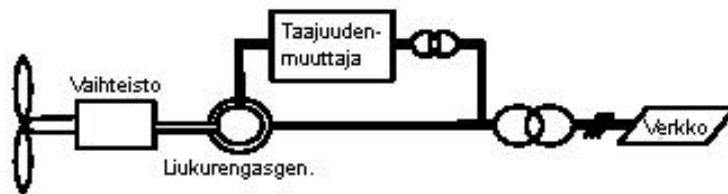


Kuva 6. Muuttuvanopeuksinen tuulivoimala täysitehoisella taajuusmuuttajalla (Laaksonen et al., 2003, s.16).

Generaattorin epäsuorasta verkkoonkytkennästä taajuudenmuuttajan välityksellä voidaan saavuttaa huomattavia etuja muun muassa tornin varjon ja tuulenopeuden gradientin aiheuttamat tehonvaihtelut eivät heijastu verkkoon välkyntänä muuttuvanopeuksisessa tuulivoimalassa ja lisäksi saatava ulostuloteho on tasaisempaa verrattuna vakionopeuksiseen tuulivoimalaan. (Laaksonen et al., 2003, s.16.)

2.7.3 Muuttuvanopeuksinen tuulivoimakäyttö osatehoisella taajuusmuuttajalla

Kaksoissyöttö-kytkentä (*DFIG*) sallii generaattorin pyörimisnopeuden vaihtelun tuulen tehon mukaan. Tuulivoimalassa on liukurengasgeneraattori, jonka roottori on kytketty taajuusmuuttajan kautta verkkoon ja staattorin kytkentä tapahtuu puolestaan suoraan verkkoon. Synkronointinopeuden alapuolella toimittaessa osa tehosta virtaa taajuusmuuttajan kautta verkosta roottorikäimitykseen ja sieltä edelleen staattorikäimitykseen ja verkkoon. Kyseessä on siis kaksoissyöttö-kytkentä, jossa taajuudenmuuttaja säättää suoraan roottorikäimitysten virtaa. Kaksoissyöttökytkennässä noin 25-30 % tuotetusta tehosta syötetään verkkoon taajuudenmuuttajan kautta. Tällöin taajuusmuuttajan päävirtapiirin kytkimet voidaan mitoittaa 25 % voimalan nimellistehosta ja näin pystytään säättämään kustannuksissa. Kuvassa 7 esitettynä osatehoisella taajuusmuuttajalla varustetun tuulivoimalan rakenne. (Laaksonen et al., 2003, s.17.)



Kuva 7. Muuttuvanopeuksinen tuulivoimala osatehoisella taajuusmuuttajalla (Laaksonen et al., 2003, s.19).

2.7.4 Muuttuvanopeuksinen tuulivoimakäyttö muutettavalla roottorin resistanssilla

Konseptissa epätahtigeneraattorina käytetään liukurengasgeneraattoria (*WRIG*). Generaattorin staattori on kytkettynä suoraan muuntajan kautta sähköverkkoon. Käyttämällä ulkoista säädettävää roottoriresistanssia, voidaan roottorin kokonaisresistanssia myös muuttaa ja näin ollen pystytään vaihtelevaan jättämään 1-10 %, jolloin myös tuulivoimalaitoksen roottorin pyörimisnopeus voi vaihdella saman verran. Pyörimisnopeuden vaihtelun alueen kapeudesta huolimatta tälläkin tavalla saavutetaan hyötyä; Tuulivoimalaitoksen tuulen nopeuden muutosten ja tornin aiheuttamat tehonvaihtelut pienenevät, kun tuulen puuskien energia varastoidaan generaattorin roottorin mekaaniseksi pyörimisenergiaksi, joka vapautetaan hiljaisemmalla tuulella. Kuvassa 8 esitetty

perusrakenne tuulivoimalasta, jossa on mahdollista säätää roottorin resistanssia. (Laaksonen et al., 2003, s.18,34.)



Kuva 8. Muuttuvanopeuksinen tuulivoimala muutettavalla roottorin resistanssilla (Laaksonen et al., 2003, s.18).

2.7.5 Konseptien välinen vertailu

Vakionopeuksinen tuulivoimakäyttö oli 1990-luvun alussa laajalti suosituin konsepti, mistä kertoo vuoden 1995 tilastoissa yli 70 % käyttö uusissa tuulivoimaloissa. Nykyään konseptin käyttö on ollut tasaisessa laskussa verrattaessa uusiin konsepteihin. (Hansen, 2007.) *SCIG*:n etuja ovat yksinkertainen rakenne ja suhteellisen halpa valmistus. Haittapuolena voidaan pitää nopeuden säädöttömyyttä ja toimivuutta ainoastaan kapealla nopeusalueella. Lisäksi tuulen nopeuden vaihtelut vaikuttavat suoraan mekaanisen ja sähköisen vääntömomentin vaihteluun. (Tuulivoiman projektiopas, 1999.)

Täysin muuttuvanopeuksisen konseptin etuja muihin konsepteihin nähden on parempi hyötysuhde osakuormilla, joilla tuulivoimalat toimivat suurimmaksi osaksi niiden käyttöajasta. Konseptin käyttöä ovat rajoittaneet etenkin kustannukset, sillä ratkaisu on kallis ja se aiheuttaa suuria tehohäviöitä taajuusmuuttajan tehoelektroniikassa, sillä kaiken tehon tulee kulkea sen kautta. Täysin muuttuvanopeuksisia konsepteja on käytetty suhteellisen vähän (Hansen, 2007). Viime vuosina kestopagneetteja hyödyntävien generaattoreiden käytöstä on tullut kannattavampaa parantuneen suorituskyvyn sekä laskeneiden materiaalikustannusten ansiosta. (Li, Chen 2008.)

Osatehoisen taajuusmuuttujan mukaisten konseptien määrä on ollut voimakkaassa kasvussa niiden markkinoille tulon jälkeen, 1990-luvun loppupuolesta eteenpäin (Hansen, 2007). Konseptin etuina on aiemmin esitelty taloudellisuuteen perustuva kehitys. Huonoina puolina voidaan pitää konseptin vaatimaa huoltoa muihin ratkaisuihin verrattuna, sillä

konsepti sisältää useita säännöllisesti huoltoa vaativia komponentteja. Lisäksi verkon vikatilanteissa suuret staattorivirrat synnyttävät suuria roottorivirtoja, joten taajuusmuuttaja tulee suojata tuhoutumiselta. (Li, Chen, 2008.) Tämän konseptin suosiosta kertoo vuoden 2005 tilastoissa yli 60 % osuus uusista tuulivoimaloista, mikä tekee siitä selvästi suosituimman.

Rajoitetusti muuttuvanopeuksinen tuulivoimakäyttö ei ole saavuttanut suosiota markkinoilla, sillä sen käyttö on ollut suhteellisen vähäistä etenkin 2000-luvulla. Parhaimmillaan 1990-luvun loppupuolella sitä käytettiin noin 25 % uusista tuulivoimaloista. Nykyään käyttö on vähentynyt ennestään muiden konseptien paremman säädettävyyden ja hyötysuhteen ansiosta. (Hansen, 2007.)

2.8 Kuljetukseen ja asennukseen liittyvät ongelmat

Tuulivoimalat vaativat erikoiskuljetuksia, sillä kuljetettavat massat ovat suuria. Roottori sijaitsee konehuoneessa, joka yksistään painaa 80-200 tonnia. Lisäksi hankalasti kuljetettavia osia ovat voimalan lavat, jotka voivat olla pituudeltaan 45-60 metriä sekä torni, joka nykyisissä suurissa voimaloissa on useimmiten pituudeltaan 100-120 metriä. (Tuulivoiman projektiopas, 1999.)

Osat joudutaan usein kuljettamaan kohteeseen maanteitse. Tarpeen vaatiessa voidaan joutua vahvistamaan siltoja tai parantamaan teiden kantavuutta. Pitkien kappaleiden johdosta voi olla välttämätöntä myös leventää teitä tai muokata mutkia avarammiksi, jotta osat mahtuvat kulkemaan paikan päälle. Asennuspaikalla tärkeää on tasainen nostoalue, missä maan kaltevuuden tulisi olla alle 1 %. Pystyttäminen ja kasaaminen suoritetaan yleensä kahdella nosturilla. Osat nostetaan paikoilleen yksitellen, aloittaen kasaaminen tornista, jonka jälkeen pystytetään konehuone ja lopuksi tuulivoimalan lavat sekä napa. (Taaleritehdas, 2012.)

3 TEHTÄVÄNMÄÄRITTELY, LUONNOSTELU JA KEHITTELY

Suunnittelutyön lähtökohta on ongelman kohtaaminen. Jokaisella tehtävällä on tietyt reunaehdot, jotka tulee ottaa huomioon optimaalisen ratkaisun saavuttamiseksi. Tehtävänasettelu tulisi suorittaa alusta alkaen mahdollisimman laajasti, jotta täydennykset ja korjaukset rajoittuisivat vain välttämättömimpään. Tätä varten ja myöhempiä suunnitteluvaiheiden aikana tehtyjen ratkaisujen perustaksi on tärkeää tehdä vaatimuslista ongelman ymmärtämiseksi. (Pahl, Beitz, 1990, s.62-63.)

3.1 Vaatimuslistan laatiminen

Vaatimuslistaa varten suunnittelijan täytyy tehdä selväksi vaaditut tavoitteet ja rajoitukset, jotta virheellisten kehitelmien määrää voitaisiin vähentää jo aikaisessa suunnitteluvaiheessa. Vaaditut ominaisuudet on jaettu vaatimuksiin (*V*) ja tavoitteisiin (*T*), jotta voidaan erottaa mallin kannalta keskeisimmät toiminnot. Vaatimukset pyritään ilmoittamaan täsmällisinä lukuarvoina, mikäli mahdollista. Muussa tapauksessa pyritään muotoilemaan sanalliset lausumat mahdollisimman tarkasti. (Pahl, Beitz, 1990, s.64.)

Vaatimuslistan luominen aloitettiin riittävän teoriapohjan kartoituksen jälkeen toisessa luvussa esitettyjen teorian tietojen pohjalta. Vaatimuslistan keskeisiksi asioiksi muodostui roottorin pyörimisestä aiheutuvien rasitusten kestävyys, asennukseen liittyvät tekijät sekä yleiseen turvallisuuteen liittyvät toimintotekijät. Vaatimuslistan pohjana käytettiin roottorirakenteen aikaisemmin suunniteltua alkuperäismallia.

Mallin pohjalta pyrittiin havainnollistamaan asennukseen liittyviä ongelmia, joita kohdataan etenkin osien suuren koon myötä. Tämä oli yksi keskeisimmistä tekijöistä suunniteltaessa uusia ratkaisuja asennusvaiheen helpottamiseksi. Lisäksi huomiota kiinnitettiin rakenteen kriittisiin liitoksiin ja niihin vaikuttaviin voimiin erityisesti kehärakenteessa sekä pintojen kiinnityskohdissa. Työssä käsiteltävän mallin halkaisija on lähes 6000 mm ja generaattorin pyöriessä yli 1000 rpm kehärakenteeseen kohdistuu suuria rasituksia. Lopullinen vaatimuslista liitteessä 1.

3.2 Abstrahointi

Jokaiseen suunnitteluprosessiin liittyy tiettyjä ennakkoluuloja ja -käsityksiä suunniteltavan tuotteen toimintaan liittyen. Perinteisistä mielikuvista sekä ennakkokäsityksistä voidaan erottautua abstraktion avulla. Abstrahoinnissa ei huomioida yksilöllisyyttä ja tilapäisyyttä, vaan pyritään korostamaan yleispätevyyttä sekä oleellisia asioita. Yleistämisen myötä päästään tehtävän ytimeen ja näin voidaan tunnistaa kokonaistoiminto sekä ongelmasta kertovat oleelliset edellytykset sitoutumatta mihinkään tiettyyn ratkaisuvaihtoehtoon. (Pahl, Beitz, 1990, s.73.)

Yleispätevyys ja oleellisuus voidaan saavuttaa analysoimalla vaatimuslistasta erilaiset toiminnot sekä käsiteltävän tehtävän oleelliset reunaehdot, jonka jälkeen voidaan suorittaa askelittainen abstrahointi seuraavin vaihein:

1. Karsitaan toivomukset pois.
2. Jätetään epäoleelliset vaatimukset pois.
3. Määrälliset toteamukset muutetaan laadullisiksi ja supistetaan oleelliseen pitäytyviksi lausumiksi.
4. Laajennetaan tähän asti tunnettuja vaatimuksia.
5. Analysoidaan ongelmaa ratkaisuun nähden neutraalisti. (Pahl, Beitz, 1990, s.74.)

Tässä työssä abstrahoinnin ensimmäisessä vaiheessa vaatimuslistan toivomukset jätettiin pois. Toisessa vaiheessa jätettiin pois epäoleelliset tekijät, jotka olivat kustannuksiin ja valmistukseen liittyvät tekijät. Kolmannessa vaiheessa määrälliset vaatimukset muutettiin laadulliseksi. Neljäs sekä viides kohta abstrahoinnista jätettiin vähemmälle huomiolle ja niitä pyrittiin käsittelemään yleiseltä tasolta. Abstrahoinnin jälkeen suunniteltavan rakenteen tärkeimmiksi tekijöiksi muodostui:

- Osakomponenttien koon pitäminen pieninä ja kevyinä
- Roottoripinnojen kiinnitys ja kiristys
- Kehärakenne, joka kestää roottorirakenteeseen kohdistuvan väännön käsittäen ulkokehän sekä pinnat
- Turvallisuus

3.3 Toimintorakenne

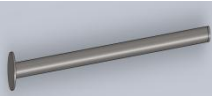
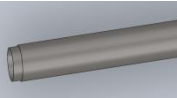
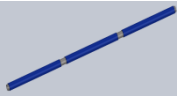

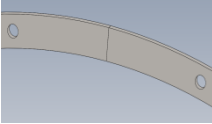
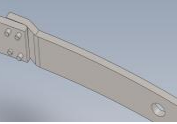
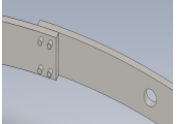

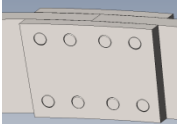
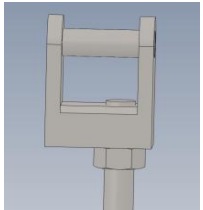
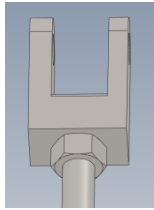
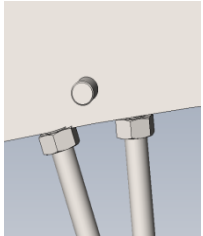
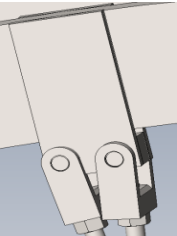
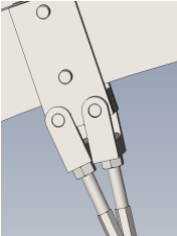
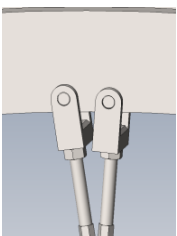
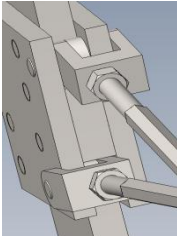
Toimintorakenteessa kokonaistoiminto jaetaan pienempiin osatoimintoihin. Yksittäisten osatoimintojen yhdistäminen tuottaa toimintorakenteen. Kokonaistoiminto voidaan hajottaa hyvinkin pieniin osatoimintoihin, riippuen kuinka tarkasti ratkaisut halutaan määrittää. Toimintorakenne voidaan muodostaa kahdella eri tavalla; uuskonstruktio tai sovelluskonstruktio. Uuskonstruktiossa tavallisesti osatoiminnot ja niiden toisiinsa liittyminen ovat aluksi tuntemattomia. Sovelluskonstruktiossa kokonaisrakenne rakenneryhmineen ja yksittäisine toimintoineen on jo tunnettu. Toimintorakenne voidaan siis esittää analysoimalla edelleen kehiteltävä tuote. (Pahl, Beitz, 1990, s.81-83.)

Tässä työssä muodostettiin sovelluskonstruktio mukainen toimintorakenne, jossa toimintorakenteen laatiminen muodostui erittäin tärkeäksi osaksi työtä, sillä sen avulla voidaan helposti erottaa ja kehitellä erillisinä tuotteen tunnettuja tai edelleen kehiteltäviä osakokoonpanoja. Työssä käsiteltiin roottorirakenteen osia pienempinä osakokoonpanoina, joille pyrittiin kehittämään uusia innovatiivisia ratkaisuja. Näistä pienemmistä osakokoonpanoista voidaan muodostaa koko roottorin malli valituilla variaatioilla. Koko toimintorakenne esitettynä liitteessä 2.

3.4 Luonnostelu

Luonnosteluvaiheessa pyrittiin kehittämään erilaisia vaihtoehtoja osakokoonpanoille ja yksittäisille osille. Eri ratkaisuvaihtoehtoista muodostettiin taulukko, joka muodostaa ideamatriisin. Ideamatriisissa esitellään yksinkertaisessa taulukkomuodossa tärkeimmiksi katsotuille toiminnoille erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja. Ideamatriisin eri vaihtoehtoja käytiin läpi ja niitä vertailtiin keskenään. Eri ratkaisuvaihtoehdot vaativat tilanteesta riippuen muutoksia myös muun mallin suunnitteluun, jotta kokonaistoiminto säilyisi ehjänä ja toimintavarmuus olisi edelleen vähintään alkuperäisellä tasolla. Yhden osan muuttamisesta seuraa paljon pieniä muita muutoksia ja tämän johdosta eri ideoiden yhdistämiseen kiinnitettiin erityisen paljon huomiota, jotta mallin rakenne pystyttäisiin pitämään riittävän yksinkertaisena. Taulukossa 1 esitettynä roottorirakenteen ideamatriisi.

Taulukko 1: Ideamatriisi

Ulkokehien tukiputket	Päässä tukilatta 	Ulko-osista kavennettu putki 	Keskelle ylimääräiset väliputket 	Kehien paikoitus lukitusrenkailla 	Ulkokehien kiinnitys hitsaamalla
Ulkokehän rakenne	Hitsataan ulkokehät yhteen päittäisliitoksella 	Päistään päällekkäin olevat palkit 	Kiinnitetään osat ruuviliitoksella limittäin 	Hitsataan välikappale, joka pitää osat yhdessä 	Yhdistetään osat tukilevyllä ruuviliitoksella 
Kaaritukien määrä	Vähemmän palkkeja, vähemmän erillisiä osia	Enemmän palkkeja, jolloin osat kevyempiä	Alkuperäinen määrä	4-6 erillistä kehäkokoontapanaa, jotka kootaan kaarituista	
Pinnojen kiristys	Ruuviliitos 	Hitsausmutteri 	Hitsiliitos		
Pinnojen kiinnitys	Hitsausmutteri ulkokehälle, kiristys kierreruuvilla 	Hitsataan ulkokehään kiinnike, kiristys kierreruuvilla 	Pinnoista kiinnitys ruuveilla ulkokehän levyihin 	Pinnat kiinnitetään ruuveilla ulkokehän tehtyihin reikiin 	Ruuviliitos, jossa pinnojen päiden kiinnityskomponentit eri sivuilla 

Ideamatriisin pohjalta koottiin eri kokoonpanoratkaisuja. Parhaimmiksi katsottujen ideoiden pohjalta suunniteltiin erilaisia kokonaistoimintoratkaisuja. Suunnittelun alkuvaiheessa kokoonpanoissa testattiin mahdollisia erilaisia vaihtoehtoja, jotta varmistuttiin eri ratkaisuvaihtoehtojen toimivuudesta.

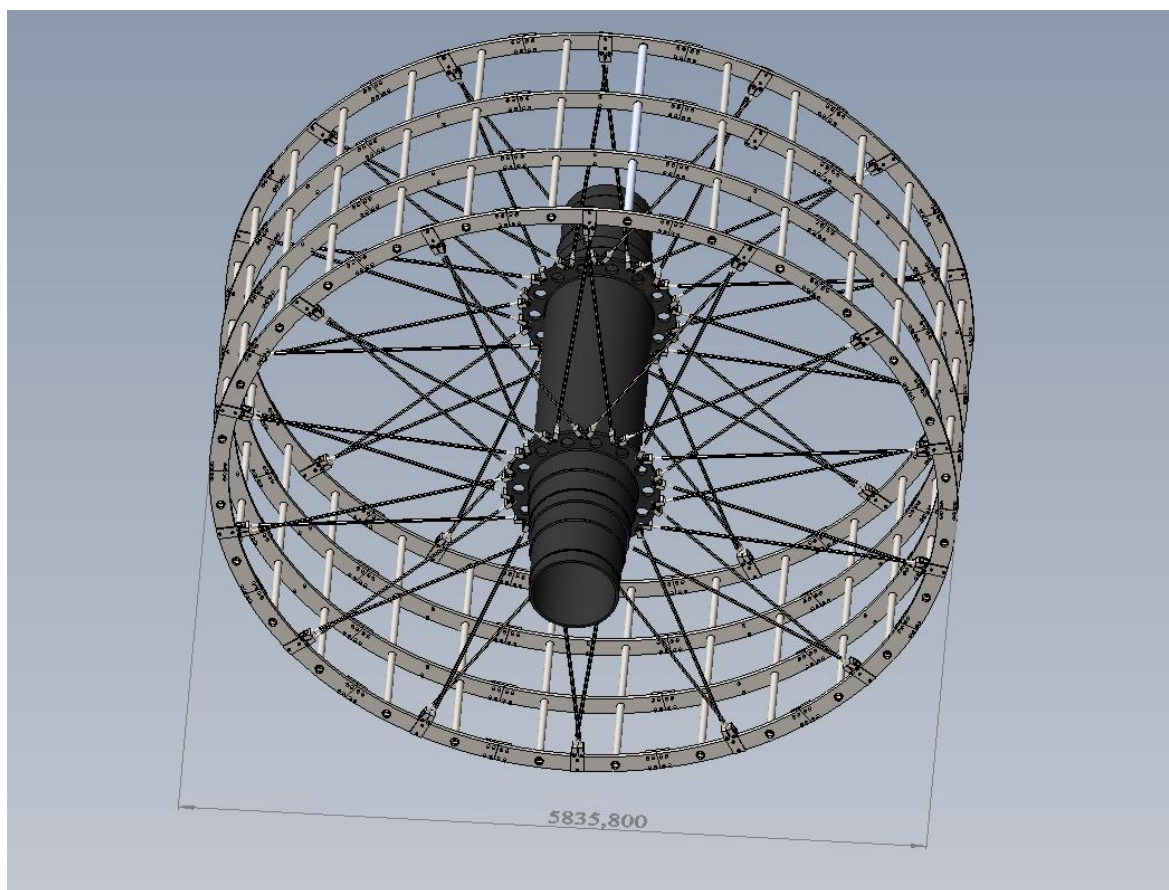
3.5 Kokonaisratkaisujen esittely

Edellisessä kappaleessa esitetyn vaatimuslistan pohjalta aloitettiin muodostamaan kokonaisratkaisuja yhdistämällä osatoimintoja. Tehtävänasettelussa vaaditun kokonaistoiminnon toteuttamiseksi tämän ratkaisukentän avulla on nyt hahmoteltava kokonaisratkaisuja yhdistelemällä eri osatoimintoja kokonaisrakenteeksi. Yhdistämisen pääongelma on osatoimintojen fysikaalisten yhteensopivuuksien tunnistaminen mahdollisimman häiriöttömien energia-, aines- ja/tai signaalivirtojen ja geometrisen yhteensopivuuden saavuttamiseksi. Toinen ongelma koskee teknillisesti ja taloudellisesti edullisen yhdistelmän kokoaminen mahdollisista osakokoonpanoista. (Pahl, Beitz, 1990, s.129.)

Ideamatriisissa esitettyjen ratkaisuvaihtoehtojen pohjalta hahmoteltiin erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja. Suunnittelun alkuvaiheessa huomattiin joidenkin osatoimintojen estävän kokonaisratkaisun täysivaltaisen toiminnan, jolloin nämä osakokoonpanoratkaisut karsittiin pois. Vertailemalla toimivia ratkaisuja sekä teknillisesti että taloudellisesti koottiin kaksi erilaista kokonaisratkaisua. Seuraavassa esiteltynä kootut kokonaisratkaisuvaihtoehdot.

Molemmat kokonaisratkaisut perustuvat pohjimmiltaan alkuperäiseen malliin. Aikaisempi malli oli todettu toimivaksi, joten tämän vuoksi koko mallin uudistamista ei nähty tarpeelliseksi vaan kokonaisratkaisuissa keskityttiin erityisesti kehittämään alkuperäisen mallin mukaista kokonaisratkaisua. Yksityiskohtien muutoksilla ja uudentyypisillä liitoksilla pyrittiin tuomaan uusia innovatiivisia ratkaisuja mallin suunnitteluun.

Ensimmäisessä kokonaisratkaisussa keskityttiin päätoimintojen lisäksi myös asennusvaiheeseen liittyviin ongelmiin. Roottorin kehärakenne on painava ja kehän tukipalkit on koottava pienempinä komponentteina, jotta niitä pystytään siirtämään helposti roottoria kasattaessa. Tämän vuoksi suunnittelu aloitettiin pienentämällä kehän kaarevia tukipalkkeja, jolloin niiden painoa saatiin vähennettyä noin 20 % alkuperäisestä. Tällöin osia on huomattavasti helpompi käsitellä kokoonpanovaiheessa. Osien pienentämisen johdosta yksittäisten tukipalkkien määrä kasvoi alkuperäisestä kahdestatoista nykyiseen neljääntoista. Koko mallin paino pysyy kuitenkin edelleen samana, mutta yksittäisten osien liikuttelu on huomattavasti helpompaa. Kuvassa 9 esitettynä ensimmäisen kokonaisratkaisun mukainen kokonaisrakenne.

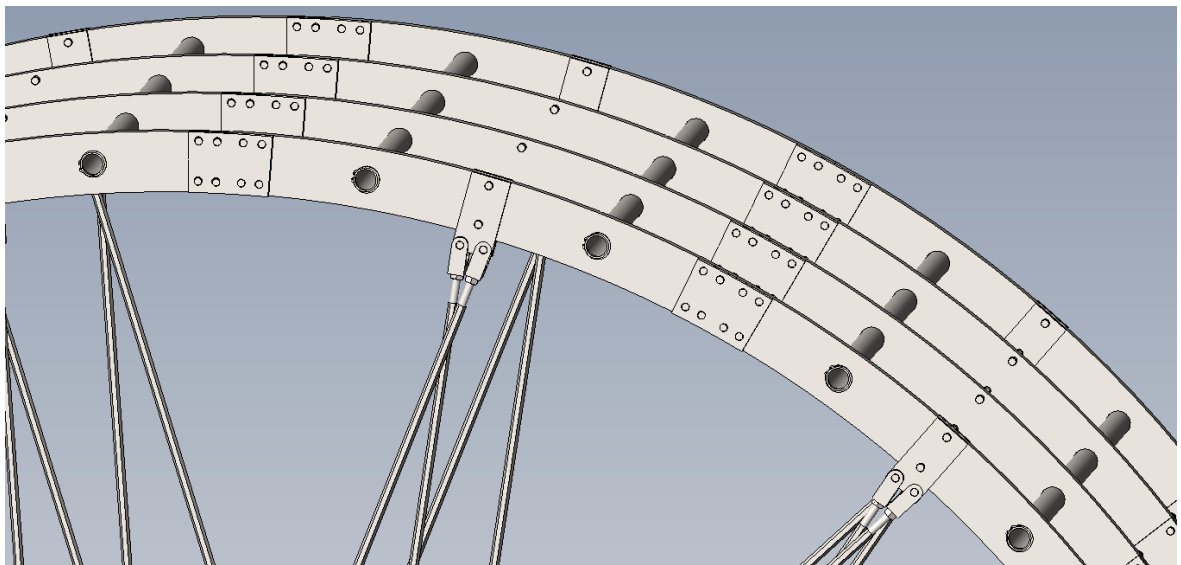


Kuva 9. Ensimmäinen kokonaisratkaisu sekä roottorirakenteen halkaisija.

Tukipalkit kiinnitetään toisiinsa peräkkäin, jolloin palkit voidaan kiinnittää kehärakenteen ulkopuolelle tulevalla välituella toisiinsa. Samalla palkeissa olevien reikien paikoitusta muutettiin vastaamaan kyseistä rakennetta. Tämän rakenteen suurimpana etuna voidaan pitää ulkokehän muotoa, sillä tässä ratkaisussa tukipalkkien ulkopuolelle ei tule

ulkopuolisia osia eli kehät toimivat koko rakenteen ulommaisina komponentteina ja kaikki muut rakenteet sijaitsevat sisäpuolella. Tässä mallissa pystyttiin myös vähentämään pienten irto-osien määrää, jolloin asennusvaiheessa on vähemmän yksittäisiä osia.

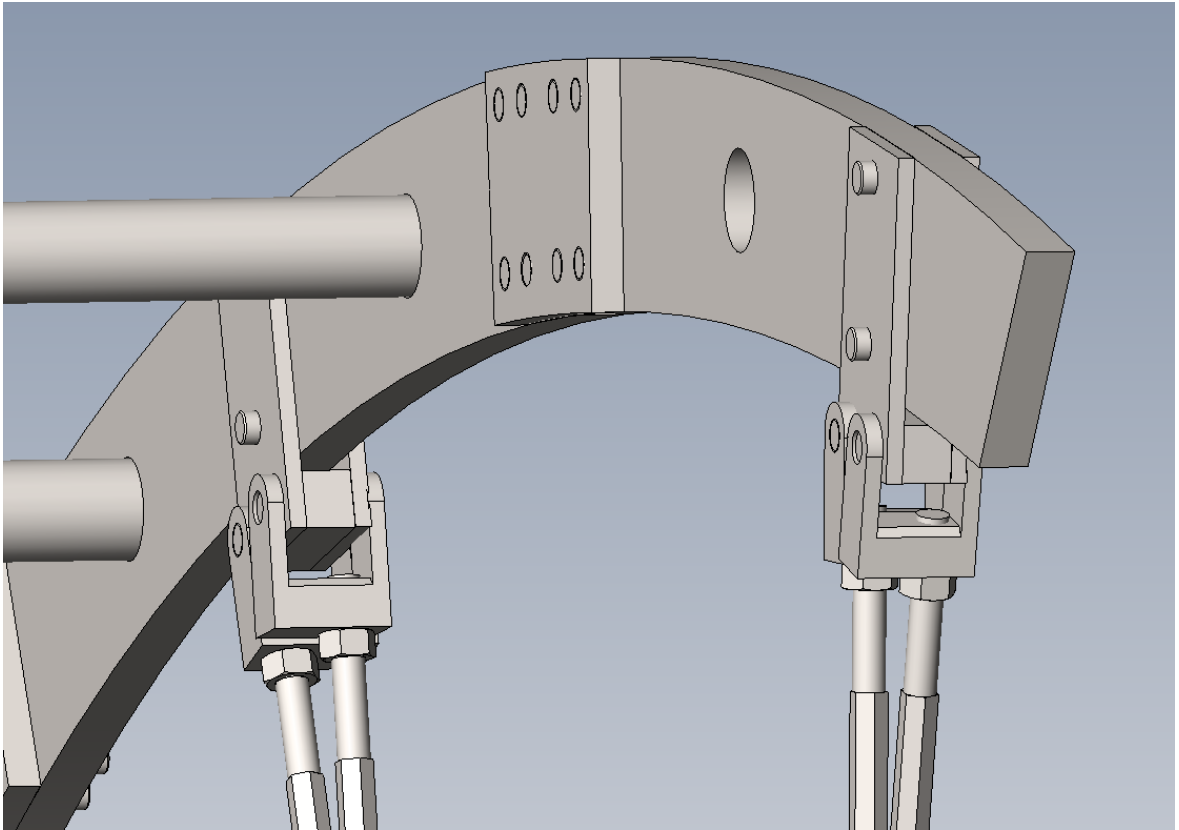
Ulkokehien väliset tukiputket kiinnitetään tukipalkkeihin tasaisella jaolla. Niiden sijainti on mitoitettu tasaisesti kantamaan kohdistuvia rasituksia. Samalla pintojen määrää rakenteessa lisättiin, koska pintojen kiinnitys tapahtuu kiinnityskomponenttiin jokaisen tukipalkin keskelle ruuviliitoksella. Alkuperäismallissa oli 12 pinnaparia, mutta tässä konseptissa pinnapareja on 14. Samalla keskiakselin olakkeen rakenne muutettiin uutta mallia vastaavaksi eli akselin kiinnityspintaan lisättiin reikiä sekä reikien paikoitusta muutettiin niin, että ne toimivat uuden mallin mukaisessa rakenteessa. Pintojen keskinäistä kulmaa muutettiin pienemmäksi muutosten johdosta, jolloin voima johdetaan suuremmissa kulmassa kuin alkuperäisessä mallissa. Kuvassa 10 esitettynä ulkokehän rakenne.



Kuva 10. Kehärakenne ja pintojen kiinnitys. Kehärakenteen ulkopuolelle ei tule kiinnitysliitoksia.

Pintojen päiden kiinnityselementin muotoa muutettiin uuden tukirakenteen mukaiseksi. Uusi rakenne on leveämpi kuin alkuperäinen. Samalla materiaalipaksuutta lisättiin tässä yhteydessä, jotta rakenne kestää siihen kohdistuvan väännön. Lisäksi kiinnityspisteen sijaintia muutettiin niin, että kiinnitys tapahtuu nyt suoraan ulkokehän kiinnitysrakenteeseen. Näin kiinnityspisteestä pystyttiin poistamaan ylimääräinen rakenne, jolloin rakenteesta saadaan kestävämpi ja se on helpompi koota. Pinnan päässä olevan

kiinnitysliitoksen päiden kiinnityspisteiden sijaintia siirrettiin 10 mm lähemmäksi, jolloin kiinnityspisteisiin vaikuttava momentti pienenee. Kuvassa 11 periaatekuva pintojen kiinnityksestä sekä kiinnitysliitoksen rakenteesta.

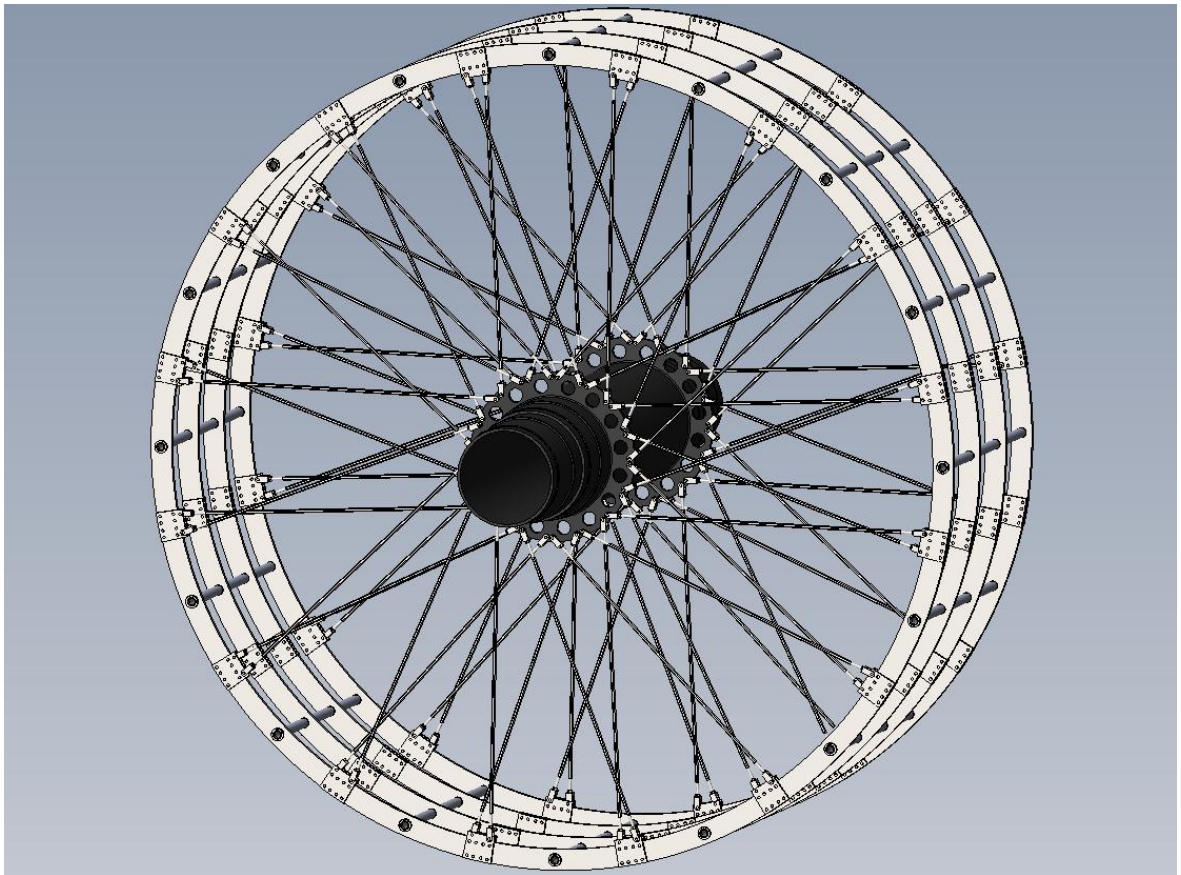


Kuva 11. Ulkokehä ja pintojen kiinnitysliitokset.

Ulkokehiä koossapitävä tukilevy sijaitsee yksittäisten kehien liitoskohdassa ja rakenne kiinnitetään tukipalkkiin yksinkertaisella ruuviliitoksella tai vaihtoehtoisesti kiinnityspalkit voidaan hitsata oikeille paikoilleen. Ulkokehän tukiputket voidaan tässä konseptissa hitsata oikeille paikoilleen. Erityistä huomiota tulee kiinnittää yksittäisten kehien keskellä olevissa tukiputkissa mikäli ne ovat hitsattuja, sillä palkin keskellä olevat varusteluhiitit voivat aiheuttaa rakenteeseen lämmöntuonnista johtuvia muutoksia. Käyttämällä erillistä kiinnitysliitosta voidaan tästä ongelmasta kuitenkin päästä eroon.

Toisessa kokonaisratkaisussa ulkokehän tukipalkkeja koossapitävä tukilevy on vahvistettu kehärakenteen alapuolelta. Näin ollen liitoksesta saatiin vahvempi kuin ensimmäisen kokonaisratkaisun kiinnitysliitoksesta. Lisäksi samaan kiinnitysratkaisuun tehtiin kiinnitysreiät pinnoille. Pinnat voidaan tässä konstruktiossa kiinnittää tukilevyn

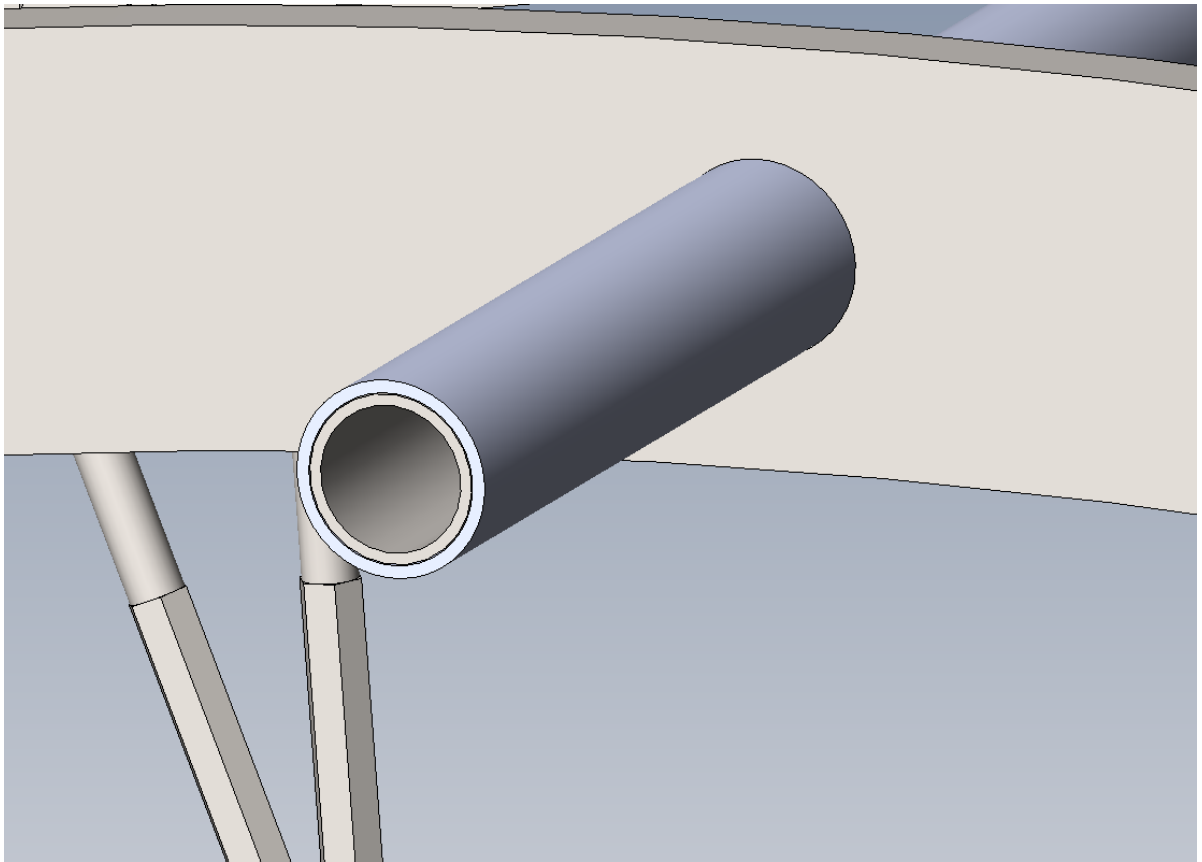
alareunaan, mikä mahdollistaa liitoskomponenttien toiminnan. Välituen alaosa kapenee pintojen suuntaisesti alaspäin. Välituki tukee pintoja, sillä alapuolella olevan tuen kulmissa on viisteet, jolloin pintojen mahdollisesti taipuessa yliasentoon pinnat tukeutuvat viisteen reunaan ja näin ollen estää pinnarakennetta liialliselta vääntymiseltä. Tämä rakenne voidaan valmistaa yhdestä osasta koneistamalla tai vaihtoehtoisesti voidaan myös valmistaa eri osista ja hitsata osat yhdeksi osakokoonpanoksi. Kuvassa 12 toisen kokonaisratkaisun mukainen malli.



Kuva 12. Toisen kokonaisratkaisun mukainen kokoonpano.

Tässä mallissa ulkokehän tukiputkia vähennettiin ja kehärakenteen läpimeneviä tukiputkia suunniteltiin valmistettavan yksi kehäpalkkia kohden. Tukiputkien päihin asennetaan lukitusrenkaat pitämään putket paikoillaan. Keskimmäiset kehävälit on tässä ratkaisussa tehty itsestään paikoittuviksi, jossa kehävälien keskelle lisättiin putkien päälle paikoitusta helpottavat tukiputket. Alkuperäisen läpäisevän tukiputken päälle sijoitetaan halkaisijaltaan suuremmat tukiputket, joiden tehtävä on estää neljän erillisen ulkokehän liikettä

sivuttaissuunnassa. Tukiputket tukevat myös koko roottorirakennetta sivuttaissuunnassa. Kuvassa 13 esitettynä mallin mukainen tukiputkien rakenne.

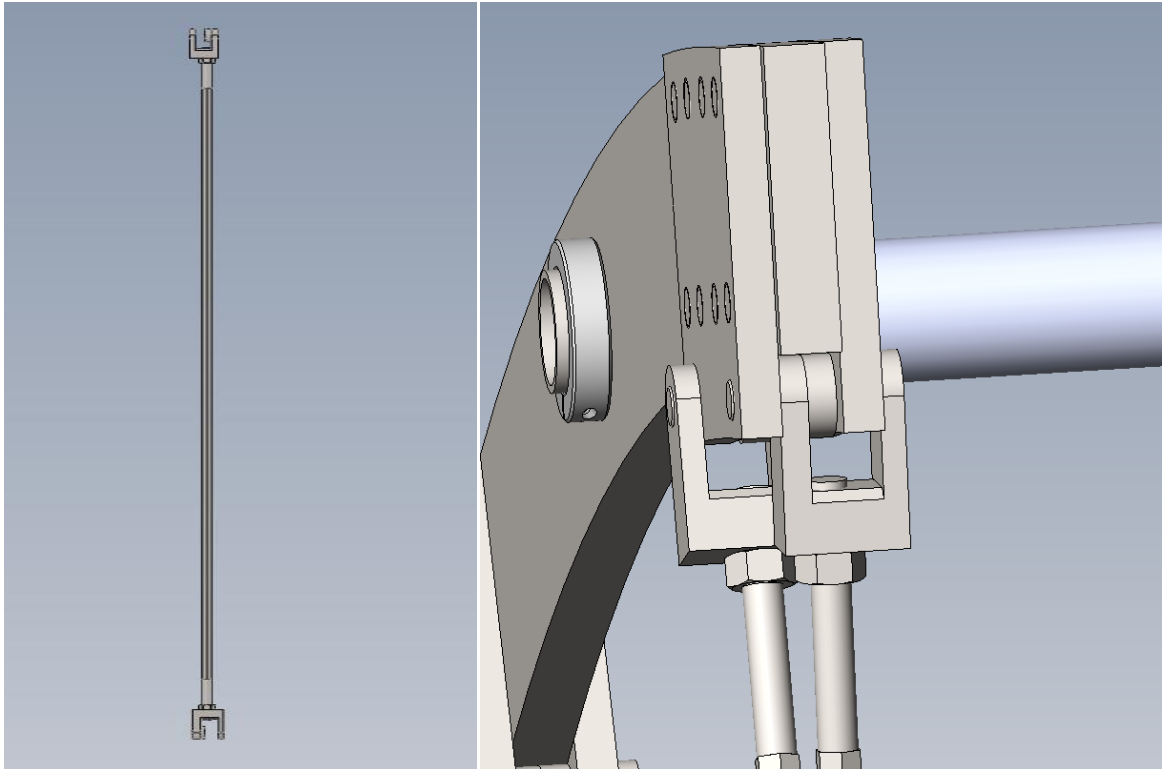


Kuva 13. Tukiputken paikoitusrakenne.

Lisäksi tässä kokonaisratkaisussa pienennettiin tukipalkkien pituutta entisestään. Tukiputkien määrää kasvatettiin tämän myötä 14:sta nykyiseen 16:sta. Rakenteesta poistettiin yhdellä kehävälillä sijaitsevat ulkokehän toiset tukiputket, sillä ne katsottiin tässä ratkaisussa tarpeettomiksi, koska palkkien keskellä on ylimääräiset tuet jotka estävät rakenteeseen kohdistuvaa vääntöä sivuttaissuunnassa. Näiden muutosten myötä pinnaparien määrä on tässä ratkaisussa myös 16.

Pinnojen yläosan kiinnitystä muutettiin niin, että päähän tulee erilainen kiinnityselementti kuin pinnarakenteen alaosaan. Alaosassa kiinnike on tässä ratkaisussa käännettynä eri suuntaan kuin yläosassa. Tällä tavalla kiinnike pystytään kiinnittämään ylhäällä tukilevyjen väliin ja kiinnittämään läpi ruuviliitoksella. Pinnojen kiinnityspäiden muotoja muutettiin niin, että kiinnike on yläpuolella leveämpi kuin alapuolella, sillä rakenne on paksumpi

ulkokehän kiinnityspisteessä. Kuvassa 14 esitettynä yksittäisen pinnan rakenne sekä pinnan kiinnitys ulkokehälle.



Kuva 14. Pinnarakenne ja sen kiinnitys ulkokehään.

Lisäksi pintojen yläpään kiinnityskomponentin sisäpinnoissa käytetään 14mm levikepaloja. Alakiinnityspisteessä käytössä on 9 mm levikepalat tukemassa rakennetta. Levikepalojen avulla rakenteesta saadaan tiivis eikä kiinnitysrakenteeseen pääse kohdistumaan vääntöä. Niiden avulla pystytään välttymään tarpeettomilta materiaalipaksuuden lisäyksiltä ylimääräisissä kohdissa.

3.6 Kokonaisratkaisujen vertailu

Kehittelyvaiheen jälkeen suoritetaan kokonaisratkaisuvaihtoehtojen vertailu. Selkein tapa arvostella eri ratkaisuvaihtoehtoja on pistearviointimenetelmä. Pistearviointi johtaa ratkaisumuunnelmien keskinäiseen vertailuun, josta voidaan havaita eri mallien välisiä paremmuseroja. Näin pystytään havainnollistamaan parhaat ratkaisut, kun huomioidaan oikeassa suhteessa kaikki rakenteeseen vaikuttavat seikat. (Pahl, Beitz, 1990, s.140.)

Ennen pistearviointia muodostettiin taulukko, jossa vertaillaan eri kokonaisratkaisuiden välisiä eroja. Tämä taulukko helpottaa pistearviointitaulukon määrittämistä, sillä mallien väliset erot ovat nähtävillä samasta taulukosta. Taulukossa 2 kokonaisratkaisujen välinen vertailu.

Taulukko 2. Kokonaisratkaisujen toimintojen välinen vertailu.

Kokoonpano	Alkuperäismalli	1. kokoonpano	2. kokoonpano
Ulkokehien lukumäärä	4	4	4
Tukipalkkien määrä ulkokehällä	12	14	16
Pinnaparien lukumäärä	24	28	32
Tukiputkien lukumäärä	24	28	16
Kehärakenteen ulkopuolisia liitoksia	24	-	-
Keskimmäisten ulkokehien kiinnitys	-	Hitsiliitos	Itsepaikoittuvien tukiputkien avulla, päissä lukitusrenkaat
Keskimmäisten ulkokehien tuenta	-	-	Tukiputket, jotka estävät kehärakenteen vääntymistä

Mallien välisen vertailutaulukon pohjalta sekä vertailemalla keskenään eri kokonaisratkaisuja aloitettiin pistearviointitaulukon tekeminen. Suunnitellut kokonaisratkaisut on kehitetty parantamaan roottorirakenteen toimintaa useasta eri näkökulmasta. Tämän vuoksi vertailu suoritetaan alkuperäiseen malliin nähden. Näiden tuloksien havainnollistamiseksi muodostettiin taulukko, jossa vertaillaan alkuperäisen rakenteen ja kahden lopullisen kokonaisratkaisun välisiä ominaisuuksia pistearvioinnilla, taulukko 3.

Taulukko 3: Kokonaisratkaisujen vertailu

Osa	Painoarvo	Alkuperäismalli	1. kokoonpano	2. kokoonpano
Turvallisuus	1	4	3	3
Kestävyys	1	3	4	4
Asennettavuus	1	3	4	5
Yhteensopivuus	1	3	3	4
Pinnojen kiinnitys	1	3	4	4
Pinnojen kiristys	0,3	4	5	4
Yksinkertaisuus	0,5	3	4	3
Valmistuskustannukset	0,2	5	3	2
Huolto konehuoneessa	0,5	3	4	4
Σ		21,2	24,1	25,1

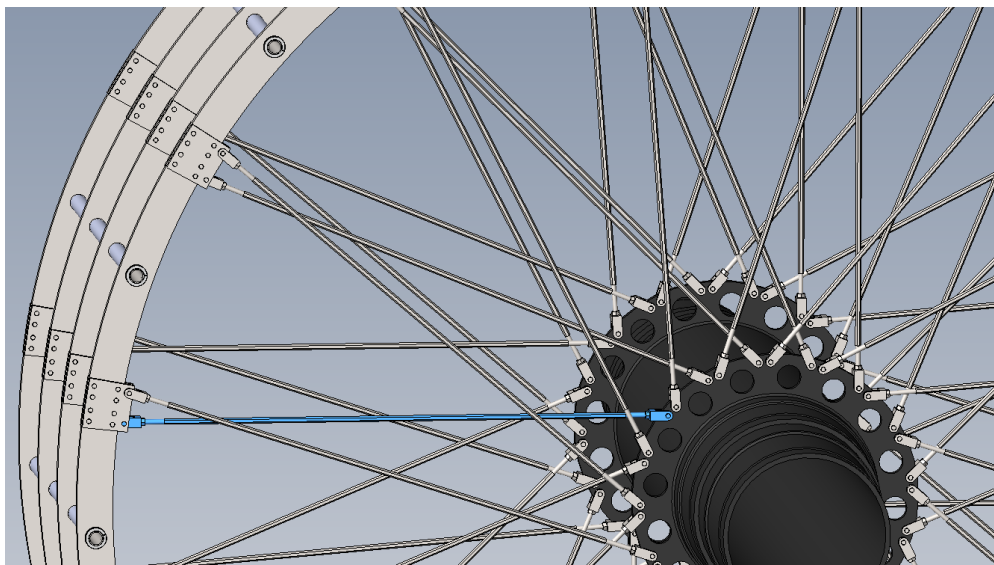
Taulukossa esitetyn arvoanalyysin pohjalta huomataan, että toinen kokonaisratkaisu sai parhaat pisteet arvoanalyysissä. Toinen kokonaisratkaisu on toimintojen kannalta paras vaihtoehto, mutta sen valmistaminen on kalliimpaa kuin kahden muun ratkaisun. Myös ensimmäisen kokonaisratkaisun mukainen kokonaisratkaisu sai arvoanalyysissä paremmat vertailupisteet kuin alkuperäismalli, joten työn kannalta tärkeiksi katsottujen ominaisuuksien pohjalta molemmat mallit luovat parannuksia alkuperäiseen rakenteeseen verrattuna.

Lopullinen valinta mallien välillä suoritettiin parhaiksi katsottujen toimintojen pohjalta, sillä lopulliset pisteet olivat melko tasaiset yllä olevassa taulukossa ensimmäisen ja toisen kokonaisratkaisun välillä. Tässä työssä pääpaino on toiminnallisissa ratkaisuissa, joten tämän vuoksi parhaaksi katsottu vaihtoehto on toinen kokonaisratkaisu, joka sai parhaat pisteet kokonaisuudessaan sekä myös työn kannalta tärkeimmistä osa-alueista, jotka olivat merkittynä taulukkoon painoarvolla 1.

4 TULOSTEN TARKASTELU

Työssä kehitettiin erilaisia kokonaisratkaisuja roottorirakenteelle. Työn tavoitteiden mukaisesti suunniteltiin kokonaisratkaisuja, jotka parantavat roottorirakenteen toimintaa valmistuksen, asennuksen ja suorituskyvyn osalta. Parhaaksi katsotulla kokonaisratkaisulla saavutettiin tavoitteiden mukaisia hyötyjä. Erityisesti keskityttiin osien pitämiseen riittävän pienenä ja yksinkertaisina, jotta roottorin huolto- ja mahdollisissa vauriotoimenpiteissä tehtävät korjaukset voidaan suorittaa helposti konehuoneessa, ilman että koko rakennetta tarvitsee purkaa. Lisäksi voidaan vaihtaa vain yksittäisiä osia halutuista paikoista ilman ylimääräistä purkutyötä. Työssä keskityttiin rakenteen pääasialliseen toimintaan ja näin ollen monia pieniä osatoimintoja ja yksityiskohtia voitaisiin tutkia lisää jatkokehittelyssä, jolloin saataisiin yhä parempia tuloksia.

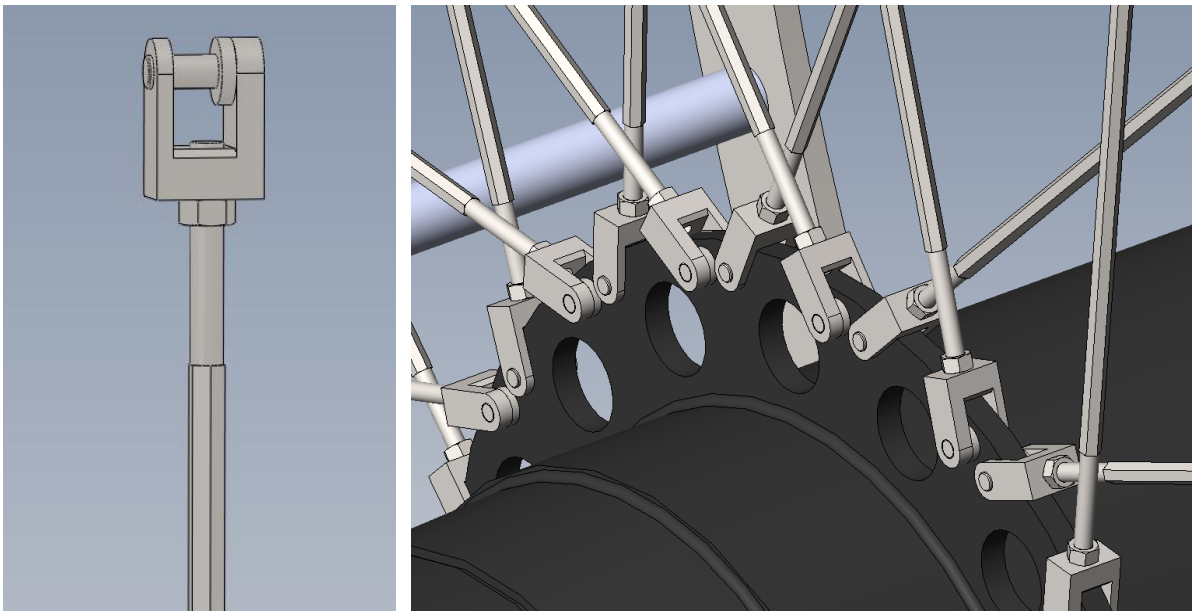
Pinnarakenne jäi työssä melko vähäiselle kehitysasteelle. Alkuperäisen mallin mukaiseen pinnan rakenteeseen oltiin tyytyväisiä, joten sille ei nähty tarpeelliseksi suunnitella uusia ratkaisuja, sillä vaihtoehdot toimivalle pinnarakenteelle ovat tämäntyyppisessä kokoonpanossa hyvin rajalliset. Pinnojen suunnittelussa olisi voitu kuitenkin käsitellä kulmaa, jossa pinnat kohtaavat ulkokehän. Tätä kulmaa muuttamalla voidaan rakenteesta saada vahvempi. Tarkastelemalla pinnojen kulmaa lujuuslaskennan pohjalta oltaisiin voitu havaita paras kulmasuuruus, jossa pinnan tulee olla ulkokehään nähden, kuva 15.



Kuva 15. Kehärakenne, jossa havainnollistettu yksittäisen pinnan kohtauskulma.

Ulkokehän tukipalkkeja lisättiin alkuperäiseen malliin verrattuna, jolloin osista saadaan kevyempiä ja näin saavutetaan hyötyjä asennusvaiheessa. Lisäksi keskelle tukipalkkia kohdistuu pienempi voima yksittäisen osan ollessa lyhyempi. Tukipalkkien toimintaa kokonaisratkaisun kannalta ei kuitenkaan tarkasteltu, joten todelliset vaikutukset roottorin pyöriessä jäivät testaamatta.

Pinnojen päissä olevien kiinnityspisteiden sijaintia muutettiin 10mm lähemmäksi tukipistettä, jolloin kiinnityspisteisiin vaikuttava momentti pienenee. Tämä parantaa osan kestävyyttä ehkäisten vauriotapauksia. Pinnojen kiinnityspisteiden suunnittelu jätettiin yleiselle tasolle, eikä yksityiskohtiin kiinnitetty suurta huomiota. Kiinnityspisteiden suunnitteluun oltaisiin kuitenkin voitu kehittää uusia vaihtoehtoisia ratkaisuja ja vertailla niitä nykyiseen ratkaisuun. Lisäksi liitosten toiminta ja kestävyys todellista pyörintätilannetta vastaavassa tilanteessa jäi testaamatta, sillä liitoskohtiin kohdistuu suuria vääntöjä liitoksien sijainnin muuttuessa todellisessa kuormitus tilanteessa kehärakenteeseen kohdistuvien voimien johdosta.

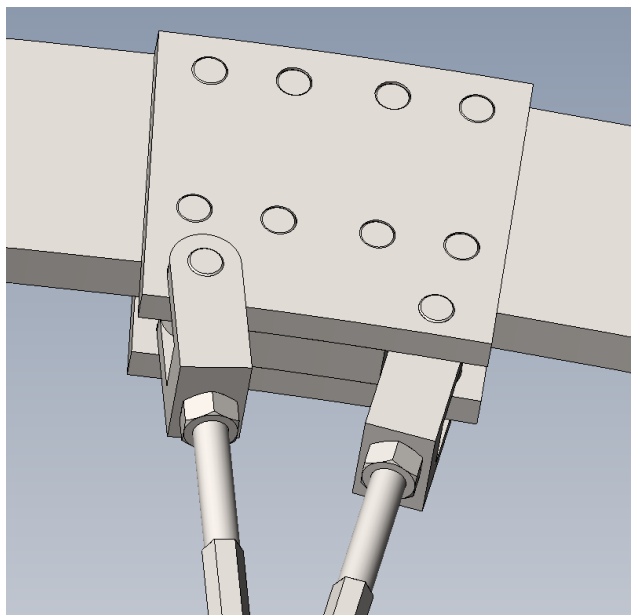


Kuva 16. Pinnarakenne, jossa uudistettu kiinnitysrakenne sekä pinnan kiinnitys.

Kokoonpanossa käytettyjen kiinnitysratkaisujen vertailuun perehdyttiin vain pintapuolisesti. Kehärakenteessa käytettiin monissa tapauksissa mallinnuksessa yksinkertaista liitosta, joka kuvastaa ruuviliitosta. Vaihtoehtoisesti oltaisiin voitu tarkastella hitsiliitoksia vastaavissa kohdissa ja verrata näiden kiinnitysratkaisuiden eroja. Lisäksi tarkastelematta jätettiin yksittäisten kehien keskellä olevat varusteluhitsit, jotka voivat aiheuttaa ylimääräisiä jännityskeskittymiä ja niiden mitoitus tulee kiinnittää erityistä huomiota. Näissä tilanteissa käyttämällä ruuviliitosta voidaan päästä helposti eroon tästä ongelmasta.

Ulkokehien kiinnitysratkaisuiden liitosten kantokykyä sekä muiden liitosten kantokykyä voitaisiin tutkia lisää jatkokehittelyssä. Samoin ulkokehien kiinnityspisteiden voimien kantokykyä voitaisiin tutkia lisää sekä tutkia millä kiinnitysratkaisulla päästään optimaaliseen toimintaan. Laskennalla oltaisiin voitu määrittää käytettävä rakenne niin, että se on mahdollisimman kevyt, mutta samalla riittävän kestävä, jotta se pitää koko roottorirakenteen koossa eikä rakenne pääse vaurioitumaan.

Toisessa ratkaisussa ulkokehien tukipisteisiin lisättiin kehän sisäpinnalle ylimääräiset tukipalkit, joiden tehtävänä on tukea pinnarakennetta. Kuvassa 16 esitettynä toisen kokonaisratkaisun ulkokehän sisäpuoliset tuet.



Kuva 17. Toisen kokonaisratkaisun sisäpinnan tukipalkki.

Lisäksi kaikkia muutoksia tarkasteltiin vain roottorirakenteen mallin pohjalta. Koko suunnitteluprosessia olisi ollut hyvä tarkastella myös laajemmasta näkökulmasta, jossa olisi voinut olla apuna koko generaattorirakenne, jolloin oltaisiin voitu havainnollistaa paremmin suunniteltujen muutosten hyötyjä koko rakenteen kannalta. Nyt esimerkiksi rakenteeseen suunniteltu tasaisen ulkokehän ulkopinnan vaikutukset mallin toimintaan jäivät kokonaan suunnittelun tasolle. Lisäksi muita pieniä ratkaisuja oltaisiin voitu kehittää entisestään sovittamalla niitä koko rakenteeseen sopivaksi.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Sähkönkulutuksen kasvun ja toisaalta samanaikaisesti pienempiin ympäristöongelmiin tähtäävän kehityksen seurauksena uusiutuvien energianlähteiden käyttö aiheuttaa kovaa kilpailua sähköntuotantoon. Tässä kilpailussa tuulivoimaloissa on paljon potentiaalia kehittää laitteista huomattavasti nykyistä tehokkaampia. Tällä tavoin niistä pystytään saavuttamaan enemmän hyötyä sähköntuotannossa. Tässä työssä keskityttiin suunnittelemaan pelkästään roottorirakenteeseen uusia ratkaisuja kehä rakenteen ja pintojen toimintaan sekä parantamaan liitoskohtien toimintaa.

Työssä keskityttiin ideoimaan uusia ratkaisuja, jotka helpottavat roottorirakenteen valmistusta sekä pyrittiin parantamaan osien yhteensopivuutta, jolloin asennus olisi helpompaa. Lisäksi liitoskohtien kiinnityspisteitä kehitettiin jäykemmiksi, jotta rakenne toimisi entistä varmatoimimemmin roottorin pyöriessä ja samalla koko rakenteen osalta pystyttäisiin parempaan sähköntuotantoon.

Lopullinen konstruktio suunniteltiin niin, että rakenne kestää siihen kohdistuvat rasitukset. Lujuustarkastelussa tarkastettiin staattisessa tilanteessa kriittiseen pisteeseen eli ruuviliitoksiin kohdistuvat jännitykset. Dynaamisessa kuormitustilanteessa rasitukset kohdistuvat paikoitellen pienemmälle alueelle ja voivat olla huomattavasti suurempia, mutta saatujen tulosten perusteella rakenne kestää suuriakin rasituksia. Koko rakenteen lujuustarkastelu voitaisiin suorittaa jatkokehittelyn tuloksena ja tarkastella jännityksiä ja voimia useissa eri pisteissä erilaisissa kuormitustilanteissa.

Roottorirakenteiden asennusvaiheessa helpointa on koota yksittäiset osat pieninä osakomponentteina, jolloin itse tuulivoimalan kasauksen yhteydessä on tarvetta siirtää vain pääkokoonpano. Osien suunnittelussa on lisäksi huomioitu huoltotarve, sillä koko rakenteen poistaminen konehuoneesta on hankala toimenpide ja tämän johdosta kaikki osat on suunniteltu niin, että rakenteesta voidaan vaihtaa pieniä osakokoonpanoja tai yksittäisiä osia mahdollisen vaurion sattuessa.

Vaatimuslistan tavoitteiden mukaisesti suunniteltiin rakenne, joka luo uusia ideoita mallin suunnitteluun. Suunnitellut kokonaisratkaisut täyttävät suurimman osan työlle asetetuista alkuperäisistä tavoitteista. Rakenne on lisäksi suunniteltu niin, että sen jatkokehittely ja koko rakenteen lujuustekninen tarkastelu on mahdollista jatkossa.

LÄHTEET

Alternative-energy news. [verkkodokumentti]. [viitattu 05.09.2012] Saatavissa: <http://www.alternative-energy-news.info/technology/wind-power/wind-turbines/>.

Ames, R. L. 1990. A.C. Generators design and application, s.25-34.

Aura, L. & Tonteri A. J. 1995. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet, s.304-343.

Auvinen, O. Lehtonen, M. 2003. Kehittynyt tuulivoimateknologia. [verkkodokumentti]. [viitattu 07.12.2012]. Saatavissa: http://tfy.tkk.fi/aes/AES/courses/crspages/Tfy-56.173_02/Tfy-56.173_02.pdf

Coastline, 2012. Life and business on the Finnish west coast 2012-2013. Pohjanmaan Kauppakamari. No. 3/2012.

European Wind Energy Association. 1999. Wind Energy - The Facts, European Communities.

Handroos, H. 2011. Luentomoniste. Mekatroniikan peruskurssi. Sähkökäytöt.

Hansen, A. Hansen, L. 2007. Market penetration of wind turbine concepts over the years. [verkkodokumentti] [viitattu 05.09.2012] Saatavissa: http://www.risoe.dk/rispubl/art/2007_136_paper.pdf

Laaksonen, H. Repo, S. 2003. Tuulivoimateknologia sähkönjakeluverkoissa. Tutkimusraportti. [verkkodokumentti] [viitattu 07.11.2012] Saatavissa: <http://butler.cc.tut.fi/~repo/Julkaisut/raportti1-2003.pdf>

Li, H. Chen, Z. 2008. Overview of different wind generator systems and their comparisons. [viitattu 12.11.2012] Saatavissa:

<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4469298&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F4159946%2F4469293%2F04469298.pdf%3Farnumber%3D4469298>

Paavola, M. Lehtinen, P. Sähkötekniikan oppikirja. WSOY 1991, s. 427.

Pahl G. & Beitz W. 1990. Koneensuunnitteluoppi. Metalliteollisuuden kustannus Oy.

Pyrhönen, J. 1991. Opintomoniste. Johdatus sähkökoneisiin.

Suomen tuulivoimayhdistys. Mitä on tuulivoima. [verkkodokumentti]. [viitattu 17.09.2012]. Saatavissa: <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tuulivoima>.

Tammelin, B. 1991. Suomen tuuliatlas. Julkaistu osana NEMO-ohjelman tuulienergiakartoitusta.

Tuulivoimala. [verkkodokumentti]. [viitattu 10.09.2012]. Saatavissa: <http://www.tuulivoimala.com/Tuulivoima.asp>.

Tuulivoimaloiden kuljettaminen ja pystyttäminen. [verkkodokumentti]. [viitattu 14.09.2012]. Saatavissa: <http://www.taaleritehdas.fi/fi/taaleritehtaan-tuulivoima.html>

Tuulivoiman projektiopas. Motivan julkaisu 5/1999 Energia-Ekono Oy
Copyright Motiva, Helsinki, 1999 ISBN 952-5304-04-3.

Tuulivoimatieto. Suomen Tuulivoimayhdistys ry. [verkkodokumentti]. [viitattu 14.11.2012]. Saatavissa: <http://www.tuulivoimatieto.fi>

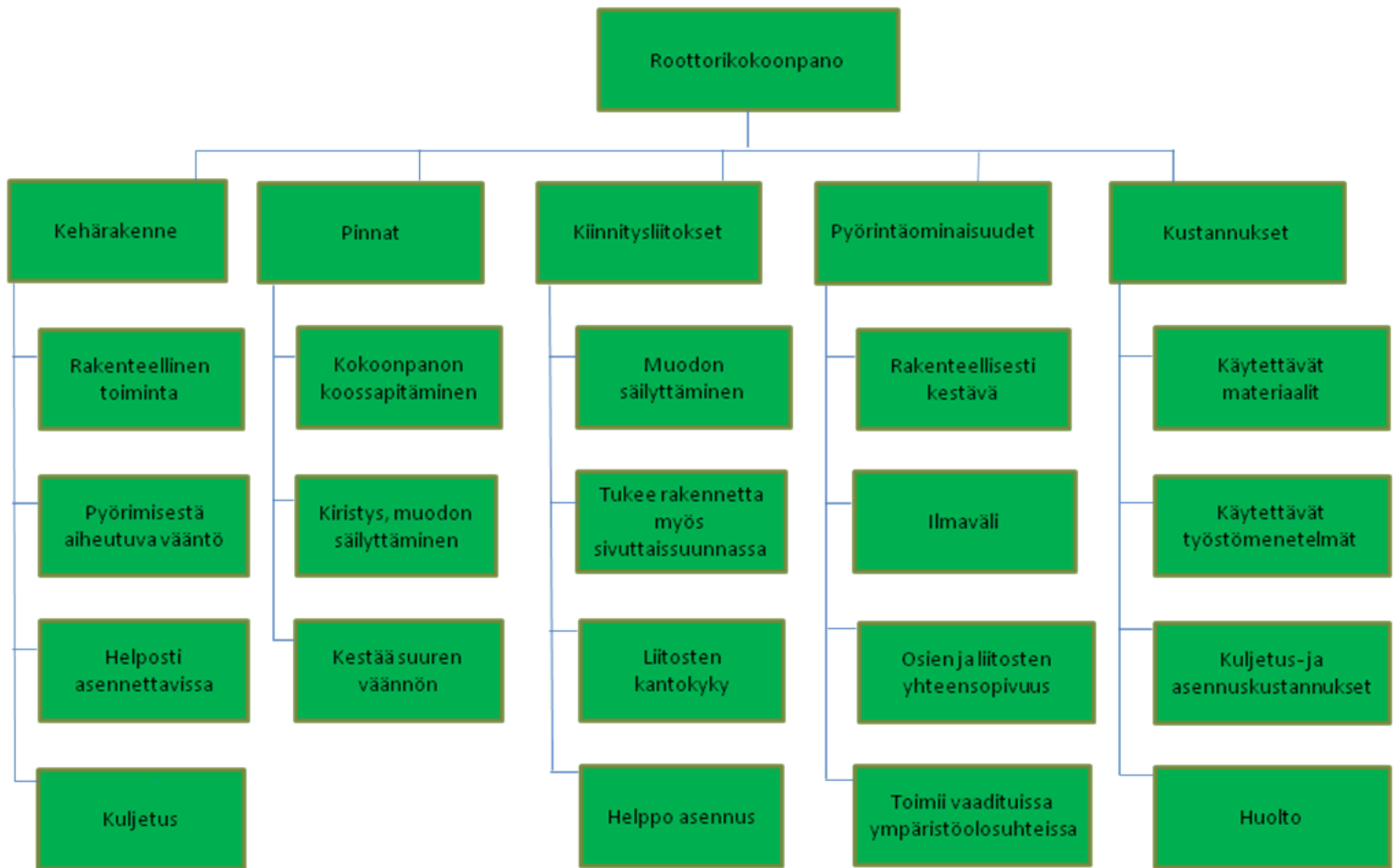
Valtanen, E. 2010. Tekniikan taulukkokirja. Genesis-Kirjat Oy

VTT. [verkkodokumentti]. [viitattu 21.09.2012]. Saatavissa: http://www.vtt.fi/references/wind_energy.jsp?lang=fi.

LIITE 1: Vaatimuslista

		Vaatimuslista Tuulivoimageraattorin roottorirakenteen suunnittelu
Muutos	V/T	Vaatimukset V=vaatimus, T=toivomus
		Geometria
	V	Halkaisija: 6000 mm
	V	Massa max: 10 000 kg
	V	Pinnojen kiinnitys keskiakseliin ja ulkokehälle
	T	Vähintään 4 erillistä ulkokehää
		Kinematiikka
	V	Erikseen koottava kehärakenne, joka mahdollistaa osien liikuttamisen
	V	Roottorin pyörimisnopeus max: 15-60 rpm
	V	Generaattorin pyörimisnopeus 1000-1500 rpm
		Voimat
	V	Kestää lapojen pyörimisen johdosta aiheutuvan väännön
	V	Pinnojen kolmiomainen rakenne, joka edesauttaa kestävämpään suuren väännön
	V	Pinnojen kiristäminen mahdollista
	V	Ulkokehän rakenteen tulee kestää pintojen kiristymisestä aiheutuvat voimat, estää rakenteen muodonmuutoksia
		Asennus
	V	Kehärakenne helposti koottavissa työoloissa varsinaisella asennuspaikalla
T	Liitoselementtien läheisyydessä riittävästi tilaa asennukselle	
T	Vaurion sattuessa osat vaihdettavissa pienissä osakokoonpanoissa, ilman että koko rakennetta tarvitsee purkaa	
	Turvallisuus	
V	Varmatoimiset liitoselementit, kestävät roottorin pyörimisestä johtuvat voimat	
V	Liitosten toimintaperiaate toimiva vaadituissa olosuhteissa	

LIITE 2: Toimintorakenne



LIITE 3: Lujuustarkastelu

Alkuperäisessä mallissa kaikki liitokset oli toteutettu M20 ruuviliitoksella. Tarkastellaan liitosten kestävyyttä uudessa rakenteessa samassa koossa, jotta varmistutaan M20 ruuvien käytettävyydestä uudessa rakenteessa.

Ruuvien nimellinen myötölujuus:

$$R_{er} = 8 * 8 * 10 = 640 \text{ MPa}$$

Leikkausvoima:

$$V = mg = 9600 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 94174 \text{ N}$$

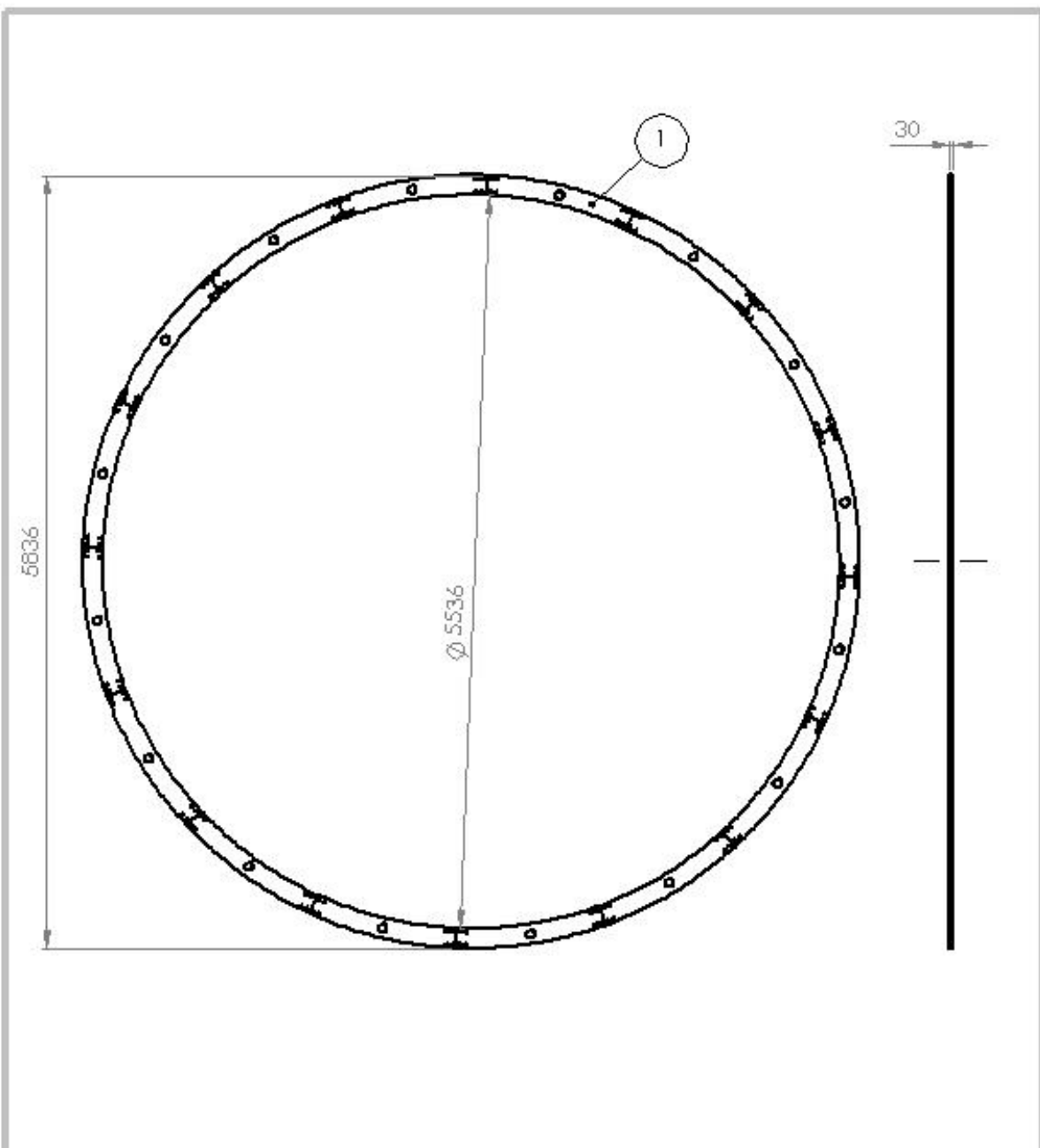
jossa m on rakenteen kokonaismassa ja g gravitaatiovoima.

Lasketaan leikkausjännitys yhdelle ruuville. Käytetään laskennassa yksinkertaistettua mallia, jossa tarkastellaan rakenteen ruuvien leikkausjännitystä. Yhden ruuvien leikkausjännitys saadaan:

$$A_s = \pi r^2 = \pi * (10 \text{ mm})^2 = 314.16 \text{ mm}^2$$

$$\tau = \frac{V}{z * A_s} = \frac{94174 \text{ N}}{128 * 314.16 \text{ mm}^2} = 2.342 \text{ MPa}$$

jossa r on ruuvien säde, z ruuvien lukumäärä ja A_s ruuviliitoksen kohdistama pinta-ala. Leikkausjännitys 2.342 MPa , joten ruuvit kestävät katkeamatta.



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	Ulkokehä	1140x205x30	16

UNITS: DIMENSIONS SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: ISO 2768-mS FITS: ANGULAR		FINISH	OTHER AND REFERENCE NOTES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME DRAWN: <i>Tommi Mäkelä</i> CHECKED: APPROVED: DATE:	SIGNATURE	DATE 20.12.2012	TITLE LUT	DWG NO Ulkokehä	
MATERIAL S355			DWG NO	A4	
WEIGHT			SCALE 1:1	SHEET 1 OF 1	