
HENKILÖNOSTIMEN TYÖKORI TUULIVOIMALAN LAPOJEN HUOLTOTOIMENPITEISIIN

Tuomo Immonen

Opinnäytetyö

Ammattikorkeakoulututkinto



Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä Tuomo Immonen			
Työn nimi Henkilönostimen työkori tuulivoimalan lapojen huoltotoimenpiteisiin			
Päiväys	28.4.2011	Sivumäärä/Liitteet	59
Työn valvoja Lehtori Pertti Kupiainen		Yrityksen yhteyshenkilö Suunnittelupäällikkö Mikko Asumaniemi	
Yritys Bronto Skylift Oy Ab			
Tiivistelmä <p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli esisuunnitella automaattisesti toimiva henkilönostimen työkori tuulivoimalan lapojen huoltotoimenpiteitä varten. Tavoitteena oli laatia työkorista vähintään kolme eri toteutusvaihtoehtoa. Työssä selvitettiin, kuinka tuulivoimalan lapojen pesu, tarkastus ja vahaus on mahdollista suorittaa työkorista käsin ja mitä työvaiheita toimenpiteet yleensä pitävät sisällään. Esisuunniteltavaa työkorista käytetään Bronto Skylift Oy Ab:n teollisuuskäyttöön suunnitelluissa henkilönostimissa.</p> <p>Työ aloitettiin selvittämällä toimeksiantajan työkorin rakenteelle ja toiminnalle asettamat tavoitteet ja toiveet. Työn alussa perehdyttiin myös henkilönostimen rakenteeseen ja sen asettamiin rajoituksiin työkorin suunnittelussa. Selvitykseen kuuluivat myös tutustuminen tuulivoimaan ja tuulivoimalaitoksen toimintaan sekä tuulivoimalan lapojen rakenteeseen. Tietoa työtä varten kerättiin kirjallisuudesta ja internet-lähteistä sekä haastattelemalla eri toimialojen yrityksiä.</p> <p>Lopputuloksena saatiin neljä esisuunnitelmaa työkoreista sekä niiden 3D-mallit. Lisäksi työn tuloksena saatiin laaja selvitys työkorin suunnittelussa ja valmistuksessa huomioitavista asioista. Kahta esisuunnitelluista työkoreista voidaan käyttää tuotteen jatkokehitykseen.</p>			
Avainsanat nostolaitteet, tuulivoimalat			
julkinen			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering			
Author Tuomo Immonen			
Title of Thesis Aerial Lift Cage for Wind Turbine Blade Maintenance			
Date	April 28, 2011	Pages/Appendices	59
Academic supervisor Mr Pertti Kupiainen, M.Sc., Lecturer		Company supervisor Mr Mikko Asumaniemi, B.Sc., Head of Design Department	
Company Bronto Skylift Oy Ab			
<p>Abstract</p> <p>The aim of this thesis was to pre-design an automatically functioning aerial platform cage for the maintenance of wind turbine blades. The idea was to create at least three models of the cage. During this project it was examined how cleaning, surface inspection and waxing the wind turbine blade should be carried out and what procedures do these actions require. The cage will be used in aerial platforms designed for industrial use for Bronto Skylift Oy Ab.</p> <p>In the beginning of the process it was studied what the customer requires concerning the structure and the functions of the cage. The structure of aerial platform and the limitations the structure sets for cage were also studied. The basics of wind power as well as the operation and the structure of a wind turbine and wind turbine blades were also studied during the process. Data for the project was collected from sources in literature and the Internet and by interviewing companies representing different branches of industry.</p> <p>As a result of this project four cages were designed and 3D-models of them were created. In addition to that there was also a wide report of the issues that need to be taken into account when designing and manufacturing the cage. Two of the cages designed are ready to be used for further development.</p>			
Keywords lifting apparatuses, wind turbines			
public			

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on tehty Bronto Skylift Oy Ab:lle. Työn tavoitteena oli esisuunnitella henkilönostimen työkori tuulivoimalan lapojen huoltotoimenpiteitä varten. Työn ohjaajana toimi lehtori Pertti Kupiainen Savonia-ammattikorkeakoulusta.

Suuri kiitos mekaniikkasuunnittelun päällikölle Mikko Asumaniemelle, joka mahdollisti yhteistyön Bronto Skylift Oy Ab:n kanssa. Kiitos myös kaikille muille Bronto Skyliftin työntekijöille, jotka ovat auttaneet työn valmistumisessa.

Tampereella 28.4.2011

Tuomo Immonen

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
2	TYÖN TAUSTAT	8
2.1	Bronto Skylift Oy Ab	8
2.2	Henkilönostin	8
2.2.1	Henkilönostimen rakenne	9
2.2.2	Henkilönostimen työkori	10
2.2.3	XDT- ja HLA-sarjat	11
2.3	Tuulivoima	13
2.3.1	Tuulivoimalan rakenne	14
2.3.2	Tuulivoimalan lavat	15
2.3.3	Tuulivoimalan lapojen huolto	17
3	TYÖN SUORITUS	18
3.1	Lähtötilanne ja esiselvitys	18
3.2	Tavoitteet	19
3.3	Suunnittelu	20
3.4	Työkörin toiminta ja siihen tarvittava laitteisto	21
3.4.1	Laitteen toiminta pesun ja vahauksen aikana	21
3.4.2	Ohjaus- ja hallintalaitteisto	22
3.4.3	Pesu- ja vahauslaitteisto	28
3.4.4	Tarkastuslaitteisto	35
3.4.5	Materiaalien valinta	36
3.5	Lujuustekninen mitoitus	36
3.6	Painehäviöt putkistossa	45
4	TYÖN TULOKSET	48
4.1	Työkori 1	49
4.2	Työkori 2	50
4.3	Työkori 3	51
4.4	Työkori 4	51
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	53
5.1	Työkorien vertailu	54
5.2	Pohdinta ja kehittämisideat	56
	LÄHTEET	58

1 JOHDANTO

Tuulivoima on kasvattanut valtavasti suosiotaan maailmalla. Päästöttömänä, uusiutuvana ja hinnaltaan vakaana energiantuotantomuotona se on vakavasti otettava kilpailija fossiilisten polttoaineiden korvaajana. Tuulivoimalat vaativat huoltoa, jotta niiden energiantuotanto ei laske ja mahdolliset vauriot eivät pääse rikkomaan voimalaa.

Tämän työn tavoitteena on esisuunnitella henkilönostimen työkori tuulivoimalan lapojen huoltotoimenpiteitä varten. Työssä suunniteltavaa työkoria käytetään Bronto Skylift Oy Ab:n teollisuuskäyttöön suunnitelluissa henkilönostimissa. Työ on valittu markkinoilla havaitun tarpeen vuoksi. Pyrkimyksenä on tehdä vähintään kolme eri toteutusmallia työkorista, jolla voidaan automaattisesti pestä ja vahata tuulivoimalan lavat sekä tarkastaa ne automaattisesti vaurioiden varalta. Jos vaurioita löytyy, ne on tarpeen vaatiessa kyettävä korjaamaan työkorista käsin. Työn aikana selvitetään, kuinka tuulivoimalan lavan pesu, vahaus ja tarkastus voidaan suorittaa sekä minkälaisia työvälineitä ja -tapoja siihen vaaditaan. Tuulivoimalan lapojen huoltoon kykeneviä työkoreja on suunniteltu aikaisemminkin, mutta mallit eivät ole päätyneet laajamittaiseen tuotantoon.

Työn tavoitteena on myös luoda yritykselle uudenlainen tuotesuuntaus nostimen ja työkorin toimintaperiaatteisiin. Aikaisemmat työkorit ovat toimineet vain korissa olevan henkilön työskentelytasoina ja mahdollistaneet pääsyn työpisteeseen. Automaattiseen työskentelyyn kykenevä työkori, jonka toimintaa henkilö vain valvoo, on hyvin tärkeä osa uudenlaista ajattelumallia. Automaattista voidaan hyödyntää lukuisiin eri sovelluksiin ja se avaa yritykselle täysin uuden markkina-alueen.

Projekti aloitetaan esiselvityksellä ja taustatiedon hankinnalla tuulivoimasta sekä henkilönostimista. Hankittujen tietojen pohjalta laaditaan lista tavoitteista, joita projektissa tulee saavuttaa ja jotka ovat tarpeellisia tai toivottavia projektin kannalta. Tämän jälkeen työkorista laaditaan esisuunnitelmat. Työtä varten laaditaan salassapitosopimus ja työn tekijänoikeus luovutetaan toimeksiantajalle. Raportista tehdään kaksi versiota, joista julkisesta versiosta poistetaan liitteet ja toimeksiantajan valitsema kuvamateriaali.

2 TYÖN TAUSTAT

Seuraavissa luvuissa käsitellään toimeksiantajayritystä, henkilönostimien rakennetta ja niiden teknisiä tietoja sekä tuulivoimaa ja tuulivoimalan rakennetta.

2.1 Bronto Skylift Oy Ab

Bronto Skylift Oy Ab on maailman johtava kuorma-autoalustaisten nostolavalaitteiden valmistaja. Yritys on erikoistunut suuriin henkilönostimiin, ja sen tuotevalikoima käsittää kymmeniä laitteita, jotka yltyvät 16 metristä aina 112 metriin. Juuriltaan suomalainen yritys on toimittanut henkilönostimia yli 120 maahan, joten sen markkina-alue on hyvin laaja. Vuonna 1995 yritys siirtyi amerikkalaisomistukseen. Laitteiden tuotanto sijaitsee kuitenkin edelleen Suomessa Tampereen ja Porin tehtailla. Yrityksen pääkonttori sijaitsee Tampereella, jossa toimivat hallinnon lisäksi myös myynti- ja suunnitteluosasto sekä huolto. Tampereen tehdas tekee myös laitteiden loppukokoonpanon ja lopputestauksen. Porin tehtaalla toteutetaan pääasiassa varsiston valmistus ja kokoonpano. Yrityksellä on Suomessa noin 340 työntekijää ja ulkomailla noin 30 työntekijää.

Nostolavalaitteita käytetään palosammutukseen ja pelastamiseen sekä teollisuuden eri tarpeisiin. Palo- ja pelastuslaitteet toimitetaan kunnallisille ja teollisuuspalokunnille. Teollisuuslaitteet myydään pääasiassa rakennus- ja vuokrausyrityksille. Bronto Skylift valmistaa myös erikoissovelluksiin tarkoitettuja henkilönostimia, kuten eristetyllä korivarrella tai kamerakorilla varustettuja nostimia.

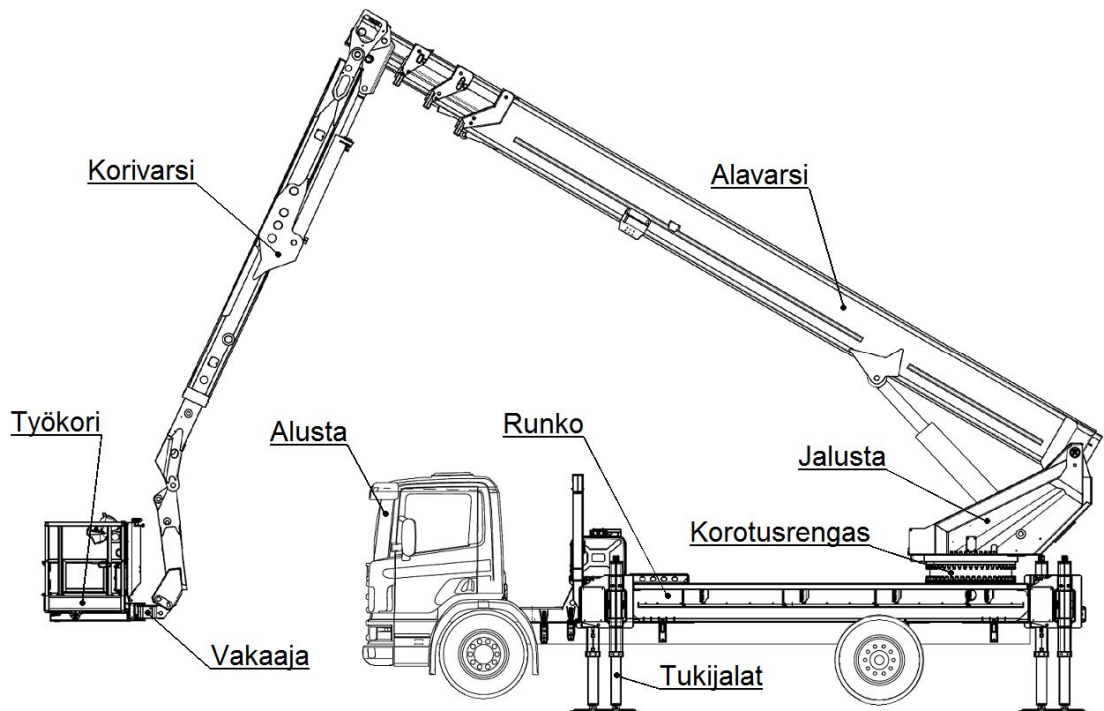
2.2 Henkilönostin

Henkilönostimen tarkoituksena on mahdollistaa pääsy korkealla tai muuten vaikeassa paikassa sijaitsevaan työkohteeseen. Henkilönostimien valmistajia on useita, samoin kuin nostimien toiminta- ja liikutteluperiaatteita.

Tässä työssä käsitellään Bronto Skylift Oy Ab:n teollisuuskäyttöön suunniteltuja ajoneuvoalustaisia nostimia, jotka perustuvat kuorma-autoalustan päälle rakennettuun nostolaitteeseen. Kuorma-autoalusta mahdollistaa laitteen tieliikennekäytön ja sen helpon ja nopean siirtämisen tarvittavaan työkohteeseen. Lisäksi se toimii nostimen hydraulijärjestelmän voimanlähteenä. Henkilönostimen käytön aikana laite tuetaan erillisille tukijaloille, joten nostimen toimintaan kuorma-auto ei muuten osallistu.

2.2.1 Henkilönostimen rakenne

Henkilönostin on mallista riippumatta perusrakenteeltaan yleensä samankaltainen. Kuvassa 1 on esitetty laitteen perusrakenne. Henkilönostin rakentuu kuorma-auton alustan päälle. Alustalle asennetaan runko, johon kiinnitetään tukijalat sekä korotusrenkas. Korotusrenkaan tilalla voidaan käyttää myös erillistä runkoon hitsattavaa jalustan petiä. Korotusrenkaan päälle asennetaan jalusta ja niiden välinen rajapinta laakeroidaan, jolloin varsisto pääsee kääntymään korotusrenkaan keskiakselin ympäri. Jalustan päälle kiinnitetään alavarresta ja korivarresta rakentuva nivelöity varsisto. Korivarren päähän kiinnitetään vakaaja ja työkori.



KUVA 1. Henkilönostimen rakenne

2.2.2 Henkilönostimen työkori

Teollisuuslaitteissa työkorin tarkoituksena on mahdollistaa pääsy työpisteeseen ja toimia samalla työskentelytasona. Korimalleja on useita, ja työkori on vaihdettavissa tarpeen mukaan. Työkorit soveltuvat useiden eri työtehtävien suorittamiseen, ja niihin on saatavilla lisävarusteena monia työskentelyä helpottavia laitteita. Kuvassa 2 on esitetty levitettävä työkori, jota käytetään useissa teollisuuskäyttöön suunnitelluissa nostimissa.



KUVA 2. Teollisuuslaitteen levitettävä työkori

Korit pyritään aina suunnittelemaan mahdollisimman keveiksi ja sen vuoksi ne valmistetaankin pääasiassa alumiinista. Kori on yleensä mitoiltaan 2 500 x 1 000 x 1 100 mm (pituus x leveys x korkeus) ja sen suurin sallittu korikuorma on 270 - 700 kg. Korikuormaa tarkkaillaan automaattisesti korikuorma-anturilla. Korilla voidaan liikkua laitteen ulottumien rajoissa kaikkiin suuntiin ja korin kääntö vaakatasossa on mahdollista 90 astetta molempiin suuntiin. Korit on varustettu keinohorisontilla ja törmäyssuojilla, jotka tarkkailevat korin paikkaa, asentoa ja etäisyyttä ympäristön muihin kohteisiin nähden. Lisäksi korissa on tuulimittari tuulienopeuden määrittämistä varten. Työkoria ohjataan ohjauskeskuksella joko korista tai auton takaosasta käsin. Työkoriin on mahdollista saada 12 V, 24 V ja 230/400 V sähkövirta. Lisäksi työkoreissa on mahdollisuus hydraulitehon ulosottoon.

2.2.3 XDT- ja HLA-sarjat

Suunniteltavaa työkoria käytetään Bronton XDT -tuoteperheen suurimmissa urakkalaitteissa sekä HLA-tuoteperheen S 104 HLA -urakkalaitteessa. Seuraavissa luvuissa on esitetty XDT- ja HLA-sarjan laitteiden perustietoja.

XDT-sarja

Bronto Skyliftin XDT-sarja on suunniteltu pääasiassa teollisuuden tarpeita varten. XDT-sarjan laitteet ovat asennettavissa yleisimpien alustojen päälle, ja niiden työskentelykorkeudet vaihtelevat 38 metristä 78 metriin. Laitteissa on teleskooppaava pääpuomi ja korivarsi. Teleskooppaavalla korivarrella saavutetaan suuremmat ulottumat ylös, sivuille sekä nollatason alapuolelle. Lisäksi korivarsi mahdollistaa suoran sivuttaisliikkeen ja suuremman korikuorman. Kuvassa 3 on esitetty XDT-sarjan suurin laite S 78 XDT.




KUVA 3. Bronto Skylift S 78 XDT

XDT-sarjan laitteet on suunniteltu helposti kuljetettaviksi: kuljetusasennossa korivarsi on sijoitettu pääpuomin sivulle ja työkori varsiston alapuolelle. Nostimen käytön aikana työskentelykorkeutta säädetään alavarren teleskoopin, varsiston ja jalustan kulman sekä korivarren teleskoopin avulla. Kaikissa laitteissa on vaihdettava työkori ja tilalle on saatavilla useita eri korimalleja. Työkoriin suurin sallittu korikuorma on 700 kg, mutta se on vaihdettavissa tarvittavan kuorman tai ulottuman mukaan.

Lisävarusteena XDT-sarjaan on saatavilla useita eri laitteita, kuten esimerkiksi hydraulisesti levitettävä työkori tai hydraulitoiminen vinssi. Taulukossa 1 on esitetty XDT-sarjan mallien tekniset tiedot. (Bronto Skylift Oy Ab 2010. *XDT brochure*.)

TAULUKKO 1. XDT-sarjan tekniset tiedot (Bronto Skylift Oy Ab 2010. *XDT brochure*)

	Työskentelykorkeus (maks.)	Sivulottuma (maks.)	Korikuorma (maks.)	Kuljetuskorkeus, riippuen alustasta	Kuljetuspituus, riippuen alustasta	Kuljetusleveys	Kokonaispaino
S 38 XDT	38 m	27 m	700 kg	3,7 m	10 m	2,5 m	18000 kg
S 46 XDT	46 m	25 m	700 kg	3,7 m	10 m	2,5 m	18000 kg
S 53 XDT	53 m	35 m	700 kg	3,8 m	12 m	2,5 m	26000 kg
S 61 XDT	61 m	37 m	700 kg	3,9 m	12 m	2,5 m	32000 kg
S 70 XDT	70 m	36 m	700 kg	4,0 m	12 m	2,5 m	33000 kg
S 78 XDT	78 m	37 m	700 kg	4,0 m	13 m	2,5 m	41000 kg

HLA-sarja

HLA-sarja on suunniteltu erittäin korkealla tapahtuvaan työskentelyyn. Laitteiden työskentelykorkeudet alkavat 81 metristä, ja suurimman laitteen työskentelykorkeus ylittää 112 metriin. HLA-sarjan 112 HLA on korkein ja 104 HLA kolmanneksi korkein kuorma-autoalustainen henkilönostin maailmassa. Kuvassa 4 on esitetty S 112 HLA, joka on sarjan suurin laite.




KUVA 4. Bronto Skylift S 112 HLA

HLA-sarjan laitteet eroavat XDT-sarjan nostimista alavarren toimintaperiaalta ja työkorin sijoitukselta. Nostinta käytettäessä alavarsi ajetaan pystysuoraan asentoon ja se pysyy samassa asennossa koko työskentelyn ajan. Työskentelykorkeutta säädetään alavarren teleskoopin sekä korivarren kulman ja teleskoopin avulla.

Kuljetusasennossa HLA-sarjan työkori sijoittuu auton takaosaan varsiston päähän. Taulukossa 2 on esitetty HLA-sarjan tekniset tiedot. (Bronto Skylift Oy Ab 2010. *HLA brochure*.)

TAULUKKO 2. HLA-sarjan tekniset tiedot (Bronto Skylift Oy Ab 2010. *HLA brochure*)

	Työskentelykorkeus (maks.)	Sivulottuma (maks.)	Korikuorma (maks.)	Kuljetuskorkeus, riippuen alustasta	Kuljetuspituus, riippuen alustasta	Kuljetusleveys	Kokonaispaino
S 81 HLA	81 m	32 m	700 kg	3,95 m	15,5 m	2,55 m	45000 kg
S 90 HLA	90 m	32 m	700 kg	3,95 m	15,5 m	2,55 m	48000 kg
S 104 HLA	104 m	32 m	700 kg	3,95 m	16,7 m	2,55 m	62000 kg
S 112 HLA	112 m	33 m	700 kg	4,0 m	19 m	2,7 m	75000 kg

2.3 Tuulivoima

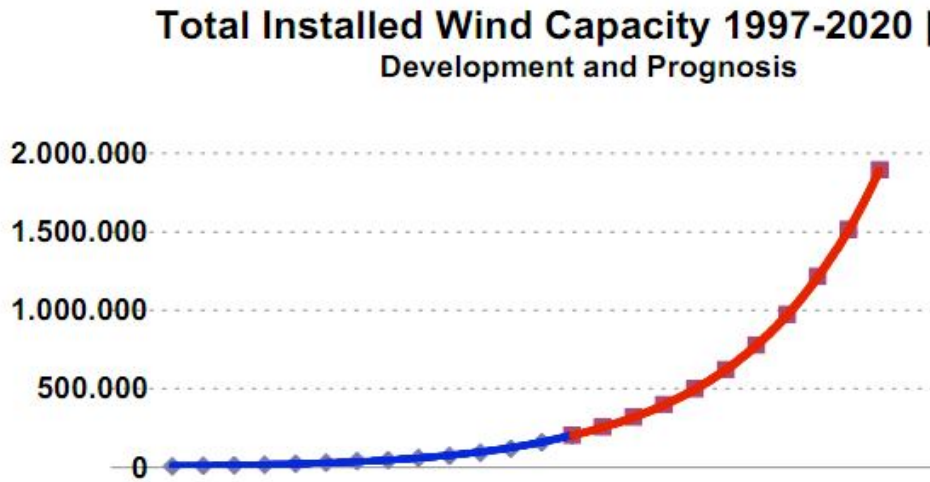
Maailman energiantarve on kasvamassa voimakkaasti. Fossiiliset polttoaineet ovat lisänneet ilmaston lämpenemistä, joten energiantuotantoa lisättäessä tulee samaan aikaan pyrkiä vähentämään fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Uusiutuvilla energianlähteillä, kuten tuulivoimalla, on suuri merkitys tulevan energiantarpeen kattamisessa. (Motiva Oy & Suomen tuulivoimayhdistys ry 2009.)

Tuulivoima on ollut maailman nopeimmin kasvava sähköntuotantomuoto 1990-luvulta lähtien. Tuulivoimaa asennettiin EU:ssa vuonna 2009 enemmän kuin mitään muuta uutta energiantuotantomuotoa ja kasvun oletetaan jatkuvan myös lähivuosina. (Motiva Oy & Suomen tuulivoimayhdistys ry 2009.)

Tuulivoiman käytön voidaan odottaa kasvavan etenkin Kiinassa, Amerikassa, Saksassa, Espanjassa, Intiassa ja monissa Euroopan maissa, etenkin Itä-Euroopan alueella. Tuulivoiman odotetaan kasvavan myös monissa Aasian ja Latinalaisen Amerikan maissa sekä Etelä- ja Pohjois-Afrikassa. (World Wind Energy Association WWEA 2010, 15.)

Tuulivoiman kiihtyneen kasvun johdosta WWEA (World Wind Energy Association) on nostanut ennustettaan tuulivoiman käytöstä tulevaisuudessa. Vuoden 2020 lopulla tuulivoimaloita odotetaan olevan asennettuina ainakin 1 900 000 megawatin edestä. (World Wind Energy Association WWEA 2010, 15.)

Kuvassa 5 on esitetty WWEA:n ennuste tuulivoiman käytöstä. Seuraavissa alaluvuissa perehdytään tuulivoimalan ja tuulivoimalan lapojen rakenteeseen sekä lapojen huoltotoimenpiteisiin. (World Wind Energy Association WWEA 2010, 15.)



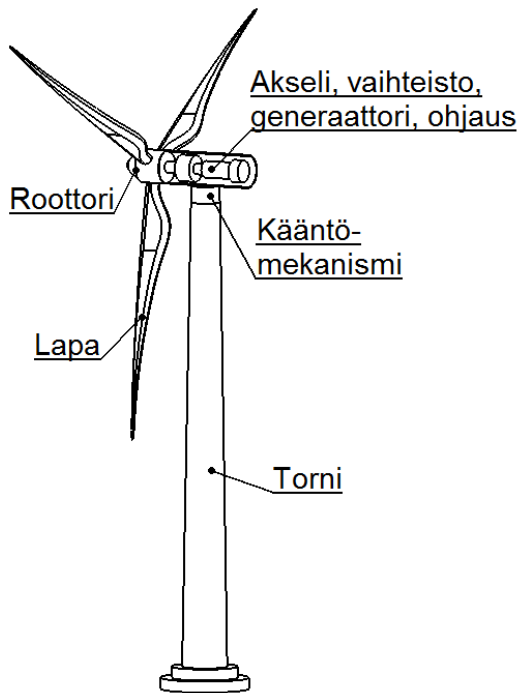
KUVA 5. Tuulivoiman käytön ennuste (World Wind Energy Association WWEA 2010, 15)

2.3.1 Tuulivoimalan rakenne

Tuulivoimala rakentuu yleensä seuraavista komponenteista:

- torni
- roottori, jossa kaksi tai kolme lapaa kiinnitettynä napaan
- akseli, jossa vaihteisto
- generaattori
- kääntömekanismi
- anturit ja ohjaus. (Patel 2006, 61.)

Kuvassa 6 on esitetty tuulivoimalan rakenne.



KUVA 6. Tuulivoimalan rakenne

2.3.2 Tuulivoimalan lavat

Uusissa tuulivoimaloissa on kaksi tai kolme lapa. Lاپojen muoto suunnitellaan tarkasti, jotta tuulesta saataisiin mahdollisimman paljon tehoa. Muodoltaan lavan poikkileikkaus on yläpinnalta pidempi kuin alapinnalta. Bernoullin lain mukaan lavan poikkileikkaukseen vaikuttava nostevoima muodostuu paine-eron johdosta. Paine-ero syntyy tuulen virratessa poikkileikkauksen ylä- ja alapintojen ohi. Nostevoima saa lentokoneet lentämään ja tuulivoimalan lavat pyörimään. Nostevoiman lisäksi lapoihin vaikuttaa myös ilmanvastus. Ilmanvastus vaikuttaa kohtisuoraan lapoihin haitaten nostovoimaa ja hidastaen moottorin nopeutta. Lاپojen suunnittelun päämääränä onkin saada aikaan mahdollisimman suuri nostovoiman ja ilmanvastuksen suhde, jota voidaan muuttaa lavan pituuden matkalta. Näin voidaan optimoida voimalan tuotto eri nopeuksilla. (Patel 2006, 66.)

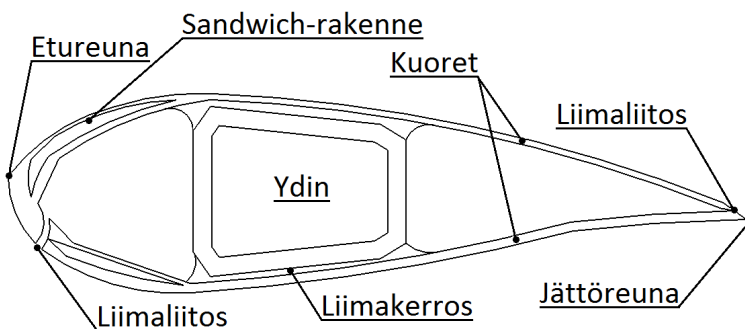
Tuulivoimalan lavat ovat nosteen luomisen suhteen periaatteessa samanlaisia kuin lentokoneiden siivet, mutta niiden välillä on merkittäviä suunnittelussa huomioon otettavia eroja. Lavat eroavat lentokoneiden siivistä esimerkiksi siten, että niissä on pituusakselin mukainen kiertymä. Lاپaan on lisätty kiertymä, jotta kohtauskulma

saavutettaisiin vakioksi koko lavan mitalle. Kohtauskulmalla tarkoitetaan lavan jänneviivan ja suhteellisen tuulen nopeuden välistä kulmaa. Lisäksi tuulivoimalan lavat ovat ohuempia ja pidempiä kuin lentokoneiden siivet, koska tarvitaan parempaa tehokkuutta pienemmillä tuulennopeuksilla. Tämän työn kannalta tärkein ero lapojen ja siipien välillä on lapojen likaantuminen hyönteisistä ja muista tekijöistä. Likaantuminen voi aiheuttaa merkittävää tehohäviötä. Lapojen puhdistus on hyvin kallista, joten tämä aiheuttaa suunnittelulle haasteen. (Jain 2011, 170.)

Tuulivoimalan lapa rakentuu seuraavista osista:

- Ydin. Lavan ydin tehdään balsa-puusta tai vaahdosta ja se antaa lavalle sen muodon. Ydin on periaatteessa pitkä putkimainen palkki koko lavan pituudella.
- Kuoret. Kuoret tehdään lasikuidusta ja epoksihartsista. Kuoret liimataan toisiinsa siiven etu- ja takareunoista ja ne kiinnitetään lavan ytimeen liimaamalla.
- Juuri. Lavan juuri on metallisylinteri, joka kiinnitetään pulteilla roottorin napaan.
- Salamaniskun suojausjärjestelmä. Järjestelmässä on tunnistimia koko lavan matkalla ja ne ovat yhdistettynä johtimiin jotka maadoittavat salaman.
- Anturit. Anturit valvovat rasitusta, venymää, akustisia emissioita ja muita merkkejä vaurioista lavassa.
- Hallintajärjestelmä liian suuren nopeuden varalle. Tällainen on esimerkiksi säädettävät siivenpäät. Uusimmissa suurissa voimaloissa ei ole tätä ominaisuutta. (Jain 2011, 170-171.)

Tuulivoimalan lavan perusrakenne on esitetty kuvassa 7.



KUVA 7. Tuulivoimalan lavan rakenne

2.3.3 Tuulivoimalan lapojen huolto

Tilastojen mukaan tuulivoimala on keskimäärin 50 % vuodesta käyttämättä, joko liian pienen tuulennopeuden tai huoltotoimenpiteiden vuoksi. Lavat muodostavat 7 % kaikista huollettavista tai korjattavista komponenteista ja ovat kuudenneksi suurin tekijä voimalan huollettavissa tai korjattavissa komponenteissa. Lapojen rikkoontumista ja likaantumista voidaan ehkäistä tehokkaalla huolto-ohjelmalla. (Patel 2006, 302-303.)

Lian kerääntyminen tuulivoimalan lapoihin alentaa voimalan hyötysuhdetta C_p ja tätä kautta huonontaa energiantuotantoa. Tuulivoimalan lapojen puhdistamisen tarvetta voidaan tutkia hyötysuhteiden maksimiarvojen avulla. Arvioitua liasta johtuvaa energiantuotannon hävikkiä verrataan lapojen puhdistamisen aiheuttamiin kustannuksiin ja päätetään milloin on kustannuksellisesti paras aika puhdistaa lavat. (Odgaard, Damgaard & Nielsen 2009, 1.)

Tuulivoimalan energiantuotannon optimoinnista on tehty muutamia tutkimuksia. Optimaalisia väännön ja lapakulman arvoja on saatu kartoittamalla energiantuotannon suhdetta, lapakulmaa ja kärkinopeussuhdetta (siiven kärjen ja tuulennopeuden suhde). Kartoitusta kutsutaan C_p -pinnaksi ja sitä voidaan tutkia esimerkiksi tuulitunneleissa. (Odgaard ym. 2009, 2.)

C_p -pinta muuttuu ajan mittaan esimerkiksi lian kertymisen vuoksi. Pinta muuttuu keskimäärin yhden prosentin vuodessa optimaalisen C_p -pinnan suhteen. Muutos on pieni, mutta ajan myötä sillä on suuri vaikutus voimalan energiantuotantoon. Viiden vuoden aikana optimaalinen tehon arvo muuttuu 5 %, mikä, riippuen C_p -pinnan muodosta, voi aiheuttaa suuria muutoksia voimalasta saatavaan energiaan. (Odgaard ym. 2009, 2.)

Tuulivoimalan energiantuotanto voi myös laskea erilaisten lapojen vaurioiden takia. Tällaisia vaurioita voivat aiheuttaa salamaniskut, lintujen törmäykset tai lapaan käytön aikana kohdistuva rasitus. Tällöin pelkkä puhdistaminen ei riitä vaan lapa täytyy myös korjata. Jos vaurioita ei korjata, voivat ne kasvaa ja vähentää voimalan energiantuotantoa entisestään. Pahimmassa tapauksessa vauriot voivat aiheuttaa koko lavan rikkoontumisen.

3 TYÖN SUORITUS

3.1 Lähtötilanne ja esiselvitys

Lähtötilanteena oli vastata markkinoinnissa havaittuun tarpeeseen. Tuulivoimalan huoltoon ja puhdistamiseen kykenevillä työkoreilla on maailmalla kysyntää. Lisäksi Bronto Skylift ei ole aikaisemmin valmistanut itsenäiseen työhön kykeneviä työkoreja, joten työ on hyvin merkittävä yritykselle sekä markkinoiden että tuotekehityksen kannalta.

Esisuunnittelu aloitettiin selvittämällä toimeksiantajan tavoitteet ja toiveet. Tiedon kerääminen aloitettiin kyselytutkimuksella ottamalla yhteyttä useisiin tuulivoimaloiden ja niiden komponenttien valmistajiin. Lisäksi tietoja kyseltiin tuulivoimaloiden huoltoon erikoistuneilta yrityksiltä. Yhteydenotoissa tiedusteltiin mm. tuulivoimalan lapojen mittoja, huollon toteuttamista ja siihen tarvittavia työkaluja sekä tietoja lapojen pinnoitteista. Tietoja etsittiin myös työkoriin tarvittavista pesu- ja tarkastuslaitteistoista. Tiedonhakulähteinä käytettiin myös kirjallaisia ja internetiä. Työn aikana lähestyttiin 19:ää tuulivoimaloiden ja niiden komponenttien valmistajaa, 8:aa konenäköjärjestelmiin erikoistunutta yritystä, 7:ää voimaloiden huoltoon erikoistunutta yritystä, 6:ta pesusovelluksien, suuttimien ja pumppujen valmistajaa sekä 3:a teollisuusharjojen valmistajaa. Lisäksi tietoa kerättiin soittamalla yli 20 henkilölle työn kaikkista osa-alueista. Esiselvityksellä ja tiedusteluilla saatiin paljon tietoa muun muassa lapojen rakenteesta, materiaaleista ja lapojen pesussa sekä tarkastuksessa huomioon otettavista asioista. Työkorian toiminta ja siihen tarvittava laitteisto -luvussa (luku 3.4) esitetyt asiat pohjautuvat suoraan esiselvityksestä ja tiedonkeruusta saatuihin tuloksiin. Joihinkin osa-alueisiin saatiin vaihtelevaa tietoa tiedustelun kohteena olevan yrityksen mukaan. Kaikki esitetyt mielipiteet on otettu huomioon työtä laadittaessa.

Heti työn alussa tutustuttiin myös nykyisin käytössä oleviin työkoreihin sekä korien ja varsiston rajapintoihin. Rakenteita tutkimalla pyrittiin selvittämään, millaisia voimia rakenteet kestävät ja kuinka korien kiinnitys toteutetaan nykyisin käytössä olevissa nostimissa. Lisäksi tutkittiin, kuinka paljon tilaa laitteiston rakenteet saavat enintään viedä, jotta ne mahtuvat nostimiin myös kuljetuksen aikana.

Tuulivoimaloiden lapojen muodot vaihtelevat valmistajan käyttämän lapaprofiilin mukaan. Valmistajat eivät mielellään paljasta profiilien mittoja, joten tämä asetti

haasteen laitteen suunnittelulle. Tässä työssä suunniteltu pesulaitteisto mitoitettiin karkeasti Vestas V80-2.0 MW GridStreamer™ -voimalassa käytettävien lapojen päämittojen mukaan. Tuulivoimalan lavan pituutena käytettiin 39:ää metriä, maksimileveytenä 3,4:ää metriä ja lavan juuren paksuutena 1,88:aa metriä. (Vestas Wind Systems A/S 2010, 6-7.)

3.2 Tavoitteet

Työn tavoitteena oli esisuunnitella vähintään kolme eri työkorimallia ja tehdä niistä 3D-mallit. Lisäksi työssä tuli perehtyä siihen, kuinka tuulivoimalan lapa voidaan pestä, vahata ja tarkastaa automaattisesti. Työkoreille laadittiin taulukossa 3 esitetty vaatimuslista.

TAULUKKO 3. Työkorien vaatimuslista

Kehitettävän tuotteen tulee täyttää seuraavat vaatimukset:	Prioriteetti
Vaatimuksen tulee toteutua	Välttämätön
Vaatimus, jonka toteutuminen ei ole välttämätöntä, mutta se pyritään toteuttamaan	Tarpeellinen
Päämitat ja korikuorma	
Kuljetusleveys maks. 2500 mm	Välttämätön
Kuljetuspituus maks. 1000 mm	Tarpeellinen
Kaidekorkeus min. 1100 mm	Välttämätön
Korikuorma maks. 700 kg, levitettävälle työkorille maks. 600 kg	Tarpeellinen
Sisätila yhdelle henkilölle	Välttämätön
Valmistettavuus	
Pyrkimys nykyisin käytettävien kiinnikkeiden hyödyntämiseen	Välttämätön
Korin toiminta	
Lavan automaattinen pesu ja vahaus	Tarpeellinen
Lavan automaattinen pinnantarkastus	Tarpeellinen
Tuulen huomiointi	Välttämätön
Turvallisuus	
Laitteiston käyttäjän turvallisuus	Välttämätön
Laitteiston turvallinen toiminta törmäystilanteessa	Välttämätön

3.3 Suunnittelu

Suunnittelun lähtökohtana oli toteuttaa tavoitteiden mukaiset esisuunnitelmat. Suunnittelussa tuli heti aluksi ottaa huomioon muutamia käytännön asioita. Yksi huomioitavista asioista oli työkorin liikkuminen tuulen vaikutuksesta. Varsistoon muodostuu työskentelyn aikana suuri tuulipinta-ala ja tuuli voi liikuttaa varsistoa useita metrejä. Huollon aikana työkori ajetaan lähelle tuulivoimalan lapaan, joten törmäyksen riski kasvaa etenkin tuulisella säällä. Henkilönostimella ei saa turvallisuussyistä ottaa tukea muista rakenteista, joten nostimen ankkuroiminen tuulivoimalan varteen tai sen lapaan ei ole mahdollista. Siirtymää voidaan ainakin osittain hallita sijoittamalla pesulaitteisto erillisen ohjausrakenteen päähän. Ohjausrakenne mahdollistaa tuulen kompensoinnin ja toimivamman ohjauksen työkorille sekä pesulaitteistolle tuulisella säällä. Laitteen käytölle määritetään myös suurin sallittu tuulennopeus, jolla nostinta saa käyttää. Lisäksi työkorin pesulaitteistoon lisättiin mekaaniset törmäyssuojat, jotka joko pysäyttävät henkilönostimen liikkeen törmäystilanteessa tai ajavat työkorin kauemmas voimalasta. Mahdollista törmäystilannetta varten pesulaitteiston rakenteista tehtiin joustavat, jotta ne antavat periksi lapaan osuessaan eivätkä riko sitä.

Ohjausrakennetta voidaan hyödyntää myös XDT-laitteen vertikaalijon aiheuttamassa varsiston nopeassa sisäänajossa. Kun laitteella ajetaan pystysuoraa liikettä korivarren ja alavarren kulman ollessa yli 55 astetta, joudutaan varsistoa tietyssä tilanteessa ajamaan sisään hyvin nopeasti. Yhtäkkiset nopeat liikkeet aiheuttavat epämiellyttävän tilanteen korissa työskentelevälle henkilölle. Ohjausrakenteella voidaan säätää työkorin etäisyyttä tuulivoimalan lapaan, jolloin varsistolla ei jouduta ajamaan niin nopeita liikkeitä ja korissa työskentely on miellyttävämpää.

Toinen huomioon otettava asia oli HLA-sarjan laitteiden alavarren taipuma. Laitteiden alavarret voivat taipua työskentelyn aikana jopa kaksi metriä. Taipuma muodostuu, kun alavarsi on ajettu täysin ulos ja korivarsi ajetaan vaakasuorasta asennosta pystyasentoon. Taipumaa voidaan rajoittaa pitämällä alavarsi osittain ajettuna sisään työskentelyn aikana tai rajoittamalla korivarren ulottumaa. Ulottumaa pienentämällä rajoitetaan kuitenkin koko laitteiston toiminta-alue ja rajoitus voi estää lavan puhdistamisen. Jos ulottumaa joudutaan pienentämään, tulee varmistaa, että laite kykenee lavan pesun vaatimiin korkeuksiin ja liikkeisiin.

Kolmantena huomioon otettavana asiana oli laitteiston paino. Pitkät rakenteet nostavat laitteiston painoa sekä lisäävät työkorin ja varsiston väliseen niveleen kohdistuvaa vääntömomenttia. Korivarren lujuus ei välttämättä riitä kestämään kasvanutta painoa. HLA-sarjan laitteissa varsiston ja työkorin kantokykyä voidaan kasvattaa lyhentämällä korivarren ulottumaa pesulaitteiston käytön aikana. XDT-sarjaan tämä ratkaisu kuitenkin ei lyhyemmän korivarren vuoksi auta. Lähtökohtaisesti laitteisto tulee suunnitella mahdollisimman kevyeksi, jotta nostimen ulottumia ei jouduta rajoittamaan.

Lisäksi oli tarkasteltava yleisiä asioita laitteen käytön kannalta. Pesulaitteiston käytön tulisi olla mahdollisimman helppoa ja sen pitäisi sisältää vähän työvaiheita. Laitteiston täytyy olla helposti kuljetettavissa ja sen käyttöönoton tulee tapahtua nopeasti. XDT-laitteissa tilaa on kuljetuksen aikana työkorin ympärillä hyvin vähän, joten kuljetusasennossa työkorin ja pesulaitteiston tulisi sopia normaaliin työkorin vaatimaan tilaan. HLA-sarjan laitteissa työkori sijoittuu auton takaosaan, joten pesulaitteisto voidaan sijoittaa tilapäisesti työmaalla tapahtuvaa ajoa varten siten, että laitteisto ylittää auton normaalin pituuden. Paras ratkaisu olisi saada koko laitteisto sopimaan normaalikokoisen työkorin vaatimaan tilaan.

3.4 Työkorin toiminta ja siihen tarvittava laitteisto

Työkori vaatii useita toimilaitteita ja antureita toimiakseen turvallisesti ja ollakseen varmatoiminen. Seuraavissa alaluvuissa on käsitelty kaikissa työssä suunnitelluissa työkoreissa huomioon otettavia asioita. Korien yksilökohtaiset erot esitetään myöhemmin työn tuloksissa.

3.4.1 Laitteen toiminta pesun ja vahauksen aikana

Lavan pesun ja vahauksen tulisi työkorin mallista riippumatta tapahtua aina samalla tavalla. Lavan pesu aloitetaan levittämällä pesuaine lavan pintaan. Pesuaineen vaikutusajan täytyttyä aloitetaan pesu lavan alapäästä. Näin estetään pesuaineen huuhtoutuminen lavan pinnasta. Jos pesu aloitetaan ylhäältä, huuhtoutuu alempana oleva pesuaine pois alaspäin virtaavan veden mukana. Ilman pesuainetta aloitussuunnalla ei ole väliä. Lavan pinnantarkastus suoritetaan samaan aikaan lavana pesun kanssa. Kamera on asennettu rakenteeseen siten, että se tarkastaa puhdistettua lapaa pesurin pestessä lapaa edempänä. Pesun ja lavan kuvauksen

loputtua levitetään vaha lavan pintaan. Jos kameran käyttö ei ole mahdollista samaan aikaan pesun kanssa, tulee lavan pintatarkastus tehdä omana työvaiheenaan.

3.4.2 Ohjaus- ja hallintalaitteisto

Työkori ajetaan tuulivoimalan lavan kärjen luokse manuaalisesti, minkä jälkeen laite aloittaa automaattisen toiminnan. Työkorin tulee kyetä täysin itsenäiseen työskentelyyn, joten ohjaus- ja hallintajärjestelmän suunnittelussa täytyy ottaa huomioon itse työtapahtuman lisäksi myös mahdolliset vika- ja vaaratilanteet. Vaaratilanteiden vuoksi työkorissa täytyy olla aina henkilö ohjaamassa laitteen toimintaa. Korissa tulee olla käytössä järjestelmä, joka estää laitteen toiminnan ilman valvontaa. Järjestelmä voidaan toteuttaa esimerkiksi napilla ja polkimella, joita tulee pitää pohjassa laitteen toiminnan aikana. Jos kontakti yhteen tai useampaan kytkimeen katkeaa, laite lopettaa työskentelyn ja pysähtyy.

Koko nostimen automaattinen toiminta vaatii oman ohjelmiston, jotta lavan seurantaan tarvittavat liikkeet ovat mahdollisia. Ohjelmistoa varten tarvitaan matemaattinen malli jalustasta, varsistosta, työkorista ja pesulaitteistosta. Tuulivoimalan lavan profiili vaihtelee pituus- ja leveys suunnassa suuresti, joten on tärkeää, että laitteisto tunnistaa lavan muodon riittävällä tarkkuudella. Laitteiston tulee osata seurata lavan muotoja törmäämättä siihen ja samalla ohjata pesu-, vahaus- ja tarkastuslaitteita.

Lavan muodon seuranta ja etäisyyden mittaaminen

Muodon seuranta voidaan toteuttaa optisesti tai mekaanisesti. Optiseen muodon seurantaan voidaan hyödyntää monia eri ratkaisuja, kuten esimerkiksi laseria tai kameraa. Optista tapaa käytettäessä pesulaitteiston etäisyyttä lapaan mitataan jatkuvasti useilla pesulaitteiston rakenteeseen sijoitetuilla antureilla. Etäisyys pyritään pitämään aina vakiona ja tiettyjen raja-arvojen sisällä. Jos etäisyys pienenee tai kasvaa raja-arvojen ulkopuolelle, korjataan etäisyys pesulaitteiston, ohjaurakenteen tai varsiston säädöllä. Tarkoituksena on pitää laitteisto turvallisella etäisyydellä lavasta. Samalla laitteiston tulee kuitenkin seurata lavan profiilia niin lähellä, että sen peseminen ja tarkastaminen on mahdollista suorittaa. Elektroninen seuranta on turvallinen tapa seurata lavan muotoa, mutta se vaatii laitteeseen kalliimpia komponentteja ja enemmän ohjelmistoa.

Muodon seurantaan voi käyttää myös mekaanista ratkaisua. Mekaanisella raja-anturilla lavan muodon seuranta voidaan toteuttaa esimerkiksi lavan pinnalla kulkevalla muovirullalla tai ilmatyynyllä. Mekaaninen tapa on toimintavarma ja yksinkertainen toteuttaa. Sitä käytettäessä tulee kuitenkin varmistaa, ettei raja pääse vaurioittamaan lapa tai jättämään jälkiä sen pintaan.

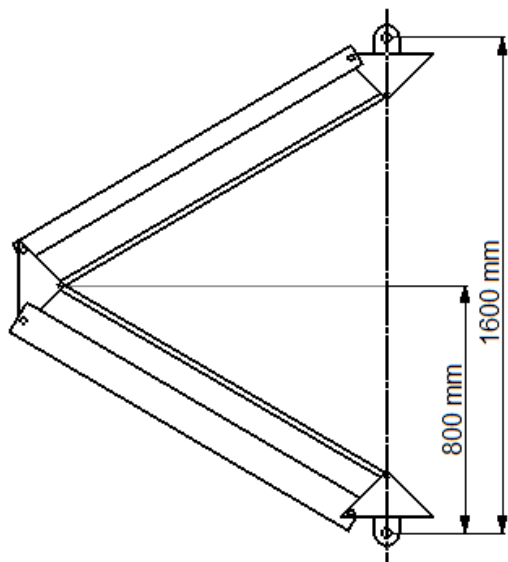
Anturit ohjaavat muodon seurannan lisäksi myös suuttimien toimintaa pesutapahtuman aikana. Lavan muodon muuttuessa esimerkiksi kapeammaksi, uloimmat anturit huomaavat muodon muuttuneen ja joko sammuttavat suuttimet siltä osalta, jolle vettä ei tarvita tai ohjaavat suuttimia suihkuttamaan vettä kapeammalle alueelle. Suuttimien ohjauksella saadaan säästettyä pesuvettä.

Tuulen kompensointi

Tuuli voi siirtää työkoria useita metrejä. Työskentely tapahtuu hyvin lähellä voimalan lapa, joten on tärkeää että tuulen vaikutusta voidaan hallita tai edes rajoittaa jollain tapaa.

Tuulen kompensointi toteutetaan työkoreissa kahdella erilaisella ratkaisulla. Molemmat ratkaisut perustuvat erilliseen ohjausrakenteeseen, jotka korjaavat pesulaitteiston etäisyyttä pestävään lapaan automaattisesti. Suunnitelluissa työkoreissa 1, 2 ja 3 käytetään pidempää nivelöityä rakennetta ja työkorissa 4 rakenne on lyhyempi. Ohjausrakenteiden päihin voidaan soveltaa monenlaisia eri ratkaisuja pesurin toteuttamiseksi

Työkorien 1, 2, ja 3 ohjausrakenne toteutetaan pitkällä rakenteella. Kuvassa 8 on esitetty ohjausrakenne nolatilassa. Kuvassa rakenne on kuvattu ylhäältä päin. Ohjausrakenne kompensoi tuulen vaikutusta ja vähentää varsistolla ajettavia liikkeitä.

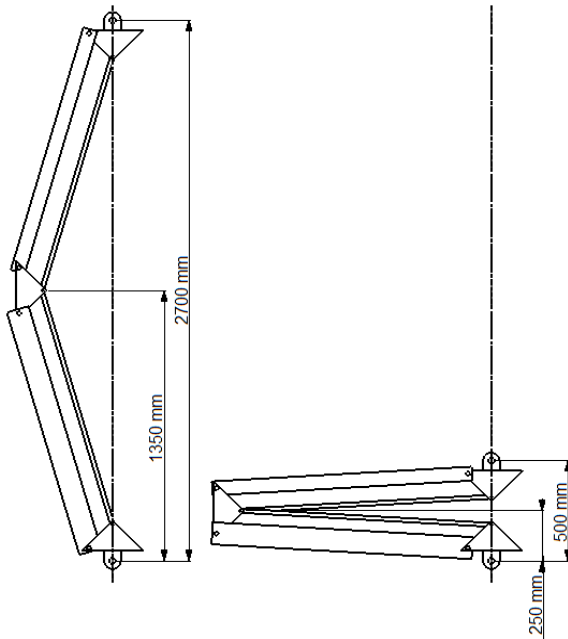


KUVA 8. Työkorien 1, 2 ja 3 ohjausrakenne nolatilassa

Rakenne liikkuu kaikkiin ilmansuuntiin ja se on suunniteltu korjaamaan 1,1 metrin siirtymät pitkittäissuuntaan ja 0,5 metrin siirtymät poikittaissuuntaan. Korjattavien siirtymien arvoja voidaan tarvittaessa muuttaa osien mitoitusta muuttamalla. Ohjausrakenne koostuu nivelrakenteesta, jonka pituussäätö tapahtuu kahdella hydraulisynterillä. Rakenne voidaan kiinnittää työkoriin joko nivelellä tai johteella. Johde mahdollistaa suuremman sivusuuntaisen liikkeen. Rakenteen liikkuminen johteessa voidaan toteuttaa esimerkiksi hydraulisynterillä, hammastangolla tai ketjuvedolla. Ohjausrakenteen kiinnitys pesulaitteistoon tapahtuu nivelellä. Kiinnitykseen käytettyjä niveliä voidaan ohjata hydraulisyntereillä tai sähkömoottoreilla, joilla saadaan käännettyä ohjausrakennetta korin suhteen ja pesulaitteistoa ohjausrakenteen suhteen.

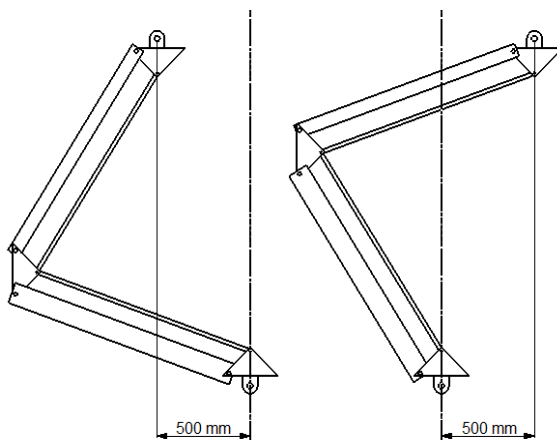
Ohjausrakenteen, työkorien ja pesulaitteiston paikkoja ja asentoja suhteessa tuulivoimalan lapaan tarkkaillaan erillisillä antureilla. Antureita on sijoitettu pesulaitteistoon, ohjausrakenteen niveliin sekä työkoriin. Tavoitteena on pitää koko rakenne aina samalla etäisyydellä lavan suhteen, eli ns. nolatilassa. Tällöin rakenteella on eniten liikkumavaraa kaikkiin ilmansuuntiin. Jos ohjausrakenteen tai työkorien sijainti muuttuu tuulen vaikutuksesta, anturit havaitsevat muutokset ja ajavat

korin ja ohjausrakenteen takaisin nollatilaan. Ohjausrakenne on hyvin tärkeä etenkin tilanteissa, joissa työkoriin kohdistuu sivuttaisuuntaista tuulta. Varsistolla ei voida kompensoida sivuttaissuuntaisia liikkeitä, jolloin erillinen rakenne on välttämätön törmäystilanteiden ehkäisemiseksi. Kuvassa 9 on esitetty ohjausrakenteen pitkittäissuuntainen liikkumavara.



KUVA 9. Työkorien 1, 2 ja 3 ohjausrakenteen pitkittäissuuntainen liikkumavara

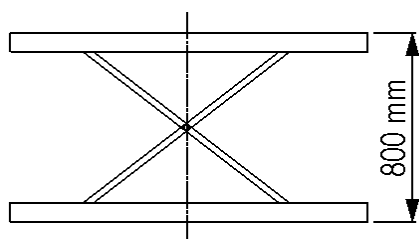
Kuvassa 10 on esitetty rakenteen poikittaissuuntainen liikkumavara.



KUVA 10. Työkorien 1, 2 ja 3 ohjausrakenteen poikittaissuuntainen liikkumavara

Rakenteesta voidaan tehdä kevyempi mitoittamalla rakenteen keskellä olevat nivelet ja pesurilaitteistoon kiinnittyvä nivel pienemmiksi kuin työkorin kiinnitykseen käytetty nivel. Rakenteen keskellä oleviin niveliin ja pesurilaitteistoon kiinnittyvään niveleen kohdistuu vähemmän voimia, kuin työkoriin kiinnitykseen käytettävään niveleen, joten ne voidaan mitoittaa pienemmiksi.

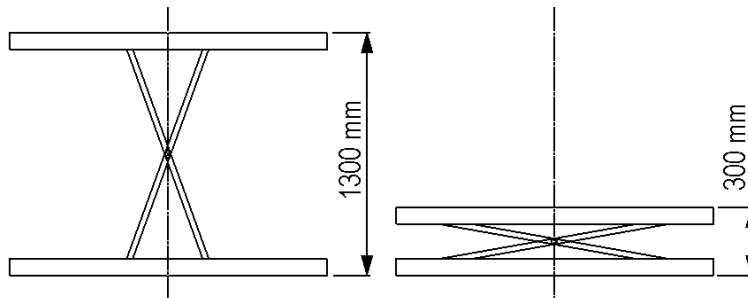
Työkorissa 4 käytetty ohjausrakenne on mitoiltaan selvästi edellä esitettyä ohjausrakennetta pienempi ja rakenteeltaan yksinkertaisempi. Suurimpana erona ohjausrakenteiden välillä on se, että työkorissa 4 käytettyä ohjausrakennetta voidaan liikuttaa vain pitkittäissuunnassa. Ohjausrakenne nolatilassa on esitetty kuvassa 11. Kuvassa rakenne on esitetty ylhäältä päin.



KUVA 11. Työkorin 4 ohjausrakenne nolatilassa

Ohjausrakenne koostuu yksinkertaisesta ristikosta, jonka osien kulmaa muuttamalla saadaan rakenne liikkumaan pitkittäissuuntaan. Rakenteen pitkittäissuuntaiset liikkeet voidaan toteuttaa esimerkiksi hydraulisynterillä, hammastangolla tai ketjuvedolla. Rakenne on suunniteltu korjaamaan 1,0 metrin pitkittäissuuntaiset liikkeet. Anturit tarkkailevat ohjausrakenteen, työkorin, sekä pesulaitteiston paikkoja ja asentoja suhteessa tuulivoimalan lapaan. Jos ohjausrakenteen tai työkorin sijainti muuttuu tuulen vaikutuksesta, anturit havaitsevat muutokset ja ajavat korin ja ohjausrakenteen takaisin nolatilaa.

Kuvassa 12 on esitetty ohjausrakenteen pitkittäissuuntainen liikkumavara.



KUVA 12. Työkorin 4 ohjausrakenteen pitkittäissuuntainen liikkumavara

Törmäyssuojat

Henkilönostimen työkori ja siinä käytettävä pesulaitteisto eivät saa vaurioittaa tuulivoimalan lapa missään tilanteessa. Tämän vuoksi pesulaitteiston rakenne on suunniteltava siten, että törmäystilanteessa se antaa periksi ja joustaa lavan tieltä pois. Pesurin rakenteeseen voidaan esimerkiksi sijoittaa kaasujousilla kuormitetut nivelet, jotka mahdollistavat rakenteen kääntymisen törmäyksen sattuessa. Jos rakenne törmää lapaan, alkavat nivelet kuormittaa jousia. Kuormituksen kasvaessa tarpeeksi suureksi, antavat kaasujouset periksi ja päästävät pesurin rakenteen kääntymään nivelen varassa. Jousien avulla rakenteesta saadaan kestävä ja se on helposti palautettavissa normaalitilaan. Nivelet voidaan myös lukita sokilla, jotka rikkoutuvat, kun niihin kohdistuu tarpeeksi voimaa. Törmäys lapaan ylittää sokkien murtorajan, jolloin ne pettävät ja vapauttavat nivelet. Pesurin rakenteet kääntyvät nivelen varassa voimalan lavan tieltä ja estävät suurempien vaurioiden syntymisen. Sokkia käytettäessä rakenteesta saadaan yksinkertainen, mutta rakenteen palauttaminen normaalitilaan vaatii enemmän työtä kuin esimerkiksi jousia käytettäessä. Lisäksi törmäystilanteen jälkeen laitteen hallittavuus on huonompi kuin jousia käytettäessä. Sokat aiheuttavat myös materiaalihukkaa ja varasokkien kuljettamisesta työkorin mukana koituu vaivaa.

Työkorin pesulaitteiston puoleisiin rakenteisiin voidaan asentaa pehmusteet, jotka estävät vaurioiden syntymisen mahdollisessa, voimaltaan pienessä törmäystilanteessa. Lisäksi laitteessa tulee olla mekaaniset törmäyssuojat, jotka joko pysäyttävät koko henkilönostimen toiminnan törmäyksen sattuessa tai ohjaavat

työkorin kauemmas lavasta. Työkorin etäisyyttä muihin kohteisiin tarkkaillaan työkorien vakiovarusteisiin kuuluvilla törmäyssuojilla.

3.4.3 Pesu- ja vahauslaitteisto

Lavan pesu voidaan toteuttaa painepesulla, harjapesulla tai niiden yhdistelmällä. Yhdistelmällä saavutetaan luultavasti paras puhdistustulos, mutta se on samalla haastavin toteuttaa. Lapojen pesun ja huollon yhteydessä tärkeimmiksi huomioon otettaviksi asioiksi on havaittu veden riittävyys, tehokkaan liuottimen käyttö ja mahdollisuus lavan mekaaniseen puhdistamiseen. Mekaaninen puhdistus voidaan toteuttaa esimerkiksi harjapesulla.

On tärkeää tiedostaa, ettei lavan puhdistus voi aina onnistua täydellisesti. Likaa voi jäädä vaikeasti puhdistettaviin paikkoihin tai pinttynyt lika ei irtoa yhdellä pesukerralla. Tämän vuoksi työkoriin voidaan sijoittaa myös käsikäyttöinen painepesuri ja harja, joilla epäpuhtaudet voidaan tarvittaessa poistaa manuaalisesti.

Joidenkin valmistajien mukaan tehokasta painepesulaitteistoa käytettäessä pesuaineen käyttö ei ole välttämätöntä. Oikein mitoitettu ja säädetty painepesuri puhdistaa lavan pinnan tehokkaasti ilman pesuaineita. Eräät lavan pesuja suorittaneet yritykset kuitenkin suosittelevat vahvan pesuaineen käyttöä pesun yhteydessä.

Pesutapahtuma

Usein lapojen puhdistukseen käytetään käsikäyttöistä painepesuria ja mekaanista puhdistusta sitä vaativiin kohtiin. Lavan pesu tulisi toteuttaa pinnan likaisuuden mukaan. Jos pinnalla on vain vähän helposti irtoavaa likaa, voidaan pesu suorittaa normaalisti. Jos taas lavan pinnalle on päässyt vuotamaan paksu kerros rasvaa tai öljyä, olisi paras ratkaisu ohentaa kerrosta kuumalla vedellä ennen varsinaisen pesun aloittamista. Ohentamisen jälkeen tulisi lisätä pesuaine ja aloittaa pesu. Rasvan ja öljyn poistamiseen voi harkita myös mekaanista ratkaisua, kuten harjaa. Erään pesuaineen toimittajan mukaan vaikeimmin puhdistettava lika koostuu rasvasta, johon on päässyt sekoittumaan ilmansaasteita ja vettä. Irrotukseen lika vaatii ohentamisen noin 80 - 85 asteisella vedellä sekä vahvan pesuaineen ja mahdollisimman pitkän vaikutusajan. Pesutapahtumassa tärkeintä on huomioida, että

pesun lopputulosta ei voida tietää ennen käytännön kokeita. Laitteistoa tulisi testata esimerkiksi aloittamalla yhdellä suuttimella ja säätämällä käyttöpainetta, suuttimen kulmaa ja suuttimen etäisyyttä lapaan. Samalla tulisi kokeilla, kuinka eri pesuaineet ja vahat vaikuttavat lopputulokseen. Vain perusteellisella testauksella voidaan selvittää parhaiten toimivat ratkaisut.

Tuulivoimalan lapojen valmistajilla on erilaisia suosituksia lavan puhdistamista varten. Lavan pesussa on huomioitava muun muassa, mitä puhdistusmenetelmiä lavan pesuun saa käyttää ja mitä lämpötiloja ja pesuaineita lavan pintamateriaali kestää. Tiedot tulee selvittää lapojen valmistajilta ennen pesun aloittamista.

Suuttimet ja pumput

Pesulaitteistossa voidaan käyttää muun muassa autopesuloissa hyödynnettäviä viuhkasuuttimia. Suuttimia suositellaan käytettäväksi enintään 15 asteen kulmassa vaakatasoon nähden ja suuttimien peittoalueiden tulisi mennä enintään 30 astetta limittäin.

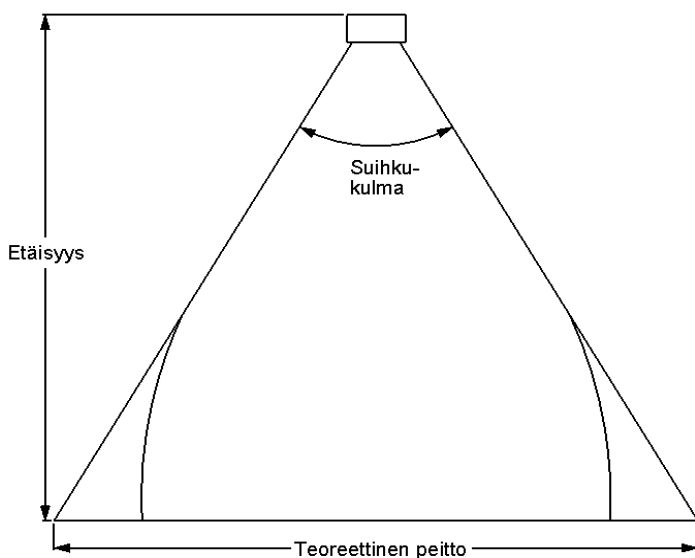
Painepesu voidaan toteuttaa myös hydraulikäyttöisillä pyörivillä pistesuuttimilla. Suuttimet tuottavat suihkun 90 asteen kulmassa, joten niillä voidaan kattaa suuri pesualue. Lavan yhden puolen peseminen hoituisi 3 suutinyksiköllä. Suuttimet vaativat kuitenkin $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ eli 70 l/min tilavuusvirran jokaiselle suutinyksikölle, joten niiden käyttäminen ei ole taloudellista vedenkulutuksen kannalta.

Pesusuuttimien käyttöön tarvitaan korkeapainepumppu. Pumppu voi toimia sähkömoottorilla, hydraulikalla tai polttomoottorilla. Pestäessä lapa käsikäyttöisellä painepesurilla käytetään noin 20 MPa:n eli 200 barin painetta. Käsikäyttöisten painepesureiden tilavuusvirrat ovat yleensä noin $1,67 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ eli 10 l/min. Jos suuttimien halutaan toimivan noin 20 MPa:n paineella ja tilavuusvirtauksella $1,67 \text{ m}^3/\text{s}$, täytyy pumpun tuoton vastata suuttimien lukumäärää. Jos suuttimia tarvitaan esimerkiksi 10 kappaletta, täytyy pumpun tuoton olla $10 \text{ kpl} \cdot 1,67 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = 16,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ eli 100 l/min. Erään korkeapainepumppuja myyvän yrityksen mukaan yhdelle suuttimelle tulisi saada noin $2,5 \cdot 10^{-4} - 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ eli 15 - 20 l/min tuotto, jos suuttimen etäisyys lavasta olisi 0,5 - 1,0 m.

Jos laitteistossa käytetään useita suuttimia, voi vedenkulutus nousta liian suureksi. Usean suuttimen käyttö vaatii myös suuremman korkeapainepumpun ja erilliset korkeapaineventtiilit suuttimien ohjaukseen. Liian suureksi mitoitettu pumppu ja korkeapaineventtiilit voivat nostaa koko laitteiston hintaa tarpeettomasti. Kaikkia suuttimia tarvitaan vain hetkellisesti lavan puhdistuksen aikana, mutta korkeapainepumppu täytyy kuitenkin mitoittaa suurimman vedenkulutuksen mukaan. Tämän vuoksi pumppu joutuu suurimman osan ajasta kierrättämään ylimääräistä tuottoa takaisin. Tämä voi johtaa pumpun ylikuumentumiseen ja vaurioitumiseen. Ongelman voi ratkaista esimerkiksi säätämällä pumpun pyörimisnopeutta tai käyttämällä säätötilavuuspumppua, jonka tuottoa voidaan säätää. Eräs ratkaisu olisi rakentaa järjestelmään takaisinkieritys kauempaa, jolloin pumppu ei joudu niin kovan rasituksen alaiseksi. Kaikki ratkaisut nostavat kuitenkin laitteiston kustannuksia.

Optimaalisin ratkaisu kustannusten ja vedenkulutuksen kannalta olisi käyttää yhtä tai kahta suutinta, joita liikutetaan erillisen rakenteen mukana lavan pinnalla. Rakenne mittaisi lavan leveyttä esimerkiksi laserilla tai valokennolla ja liikkuisi vain sillä matkalla, jolla se havaitsee lavan olevan.

Kuvassa 13 on esitetty suuttimen teoreettinen peittoalue. Todellisuudessa peittoalue on jonkin verran pienempi ja se vaihtelee käytettävän paineen sekä nesteen viskositeetin, lämpötilan ja pintajännityksen mukaan. Lisäksi virtauksen pyörteily ja ilmanvastus vaikuttavat sitä enemmän, mitä kauempana suutinaukosta puhdistettava pinta on.



KUVA 13. Suuttimen teoreettinen peittoalue

Taulukossa 4 on esitetty suutinten teoreettiset peittoalueet eri suihkukulmilla ja etäisyyksillä puhdistettavasta pinnasta. Taulukosta havaitaan, että esimerkiksi 50 asteen suihkulla ja 70 cm:n etäisyydellä sijaitseva suutin muodostaisi teoreettisesti noin 65,3 cm peittävän suihkun lavan pinnalle. Taulukkoa tarkasteltaessa on kuitenkin huomioitava, että mitä kauemmas lavan pinnasta mennään, sitä enemmän peittoalueeseen vaikuttaa suihkua heikentäviä voimia. Lisäksi suihkun iskuvoima heikkenee pidemmällä etäisyyksillä ja suihkun suunta voi muuttua merkittävästi esimerkiksi tuulen vaikutuksesta.

TAULUKKO 4. Suutinten teoreettiset peittoalueet (Spraying Systems Co. 2010, A5)

Suihku- kulma	Teoreettinen peitto eri etäisyyksillä (cm)									
	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm	80 cm	100 cm
5 °	1,3	1,8	2,2	2,6	3,5	4,4	5,2	6,1	7,0	8,7
10 °	2,6	3,5	4,4	5,3	7,0	8,8	10,5	12,3	14,0	17,5
15 °	4,0	5,3	6,6	7,9	10,5	13,2	15,8	18,4	21,1	26,3
20 °	5,3	7,1	8,8	10,6	14,1	17,6	21,2	24,7	28,2	35,3
25 °	6,7	8,9	11,1	13,3	17,7	22,2	26,6	31,0	35,5	44,3
30 °	8,0	10,7	13,4	16,1	21,4	26,8	32,2	37,5	42,9	53,6
35 °	9,5	12,6	15,8	18,9	25,2	31,5	37,8	44,1	50,5	63,1
40 °	10,9	14,6	18,2	21,8	29,1	36,4	43,7	51,0	58,2	72,8
45 °	12,4	16,6	20,7	24,9	33,1	41,4	49,7	58,0	66,3	82,8
50 °	14,0	18,7	23,3	28,0	37,3	46,6	56,0	65,3	74,6	93,3
55 °	15,6	20,8	26,0	31,2	41,7	52,1	62,5	72,9	83,3	104
60 °	17,3	23,1	28,9	34,6	46,2	57,7	69,3	80,8	92,4	115
65 °	19,1	25,5	31,9	38,2	51,0	63,7	76,5	89,2	102	127
70 °	21,0	28,0	35,0	42,0	56,0	70,0	84,0	98,0	112	140
75 °	23,0	30,7	38,4	46,0	61,4	76,7	92,1	107	123	153
80 °	25,2	33,6	42,0	50,4	67,1	83,9	101	118	134	168
85 °	27,5	36,7	45,8	55,0	73,3	91,6	110	128	147	183
90 °	30,0	40,0	50,0	60,0	80,0	100	120	140	160	200
95 °	32,7	43,7	54,6	65,5	87,3	109	131	153	175	218
100 °	35,8	47,7	59,6	71,5	95,3	119	143	167	191	238

Pesuaineen ja vahan levitys kannattaa toteuttaa erillisillä suuttimilla. Viuhkasuuttimet ovat hyvä vaihtoehto myös tällaisessa käytössä. Pesuaineen ja vahan levityksen voi toteuttaa matalapainepumpulla tai pesuun käytettävällä korkeapainepumpulla. Korkeapainepumppua käytettäessä on huolehdittava että pumpun tilavuusvirta ei aiheuta ongelmia. Valitsemalla suuttimet, joissa on suurempi suutinaukko, saadaan laskettua korkeapainepumpun tuottamaa painetta, jolloin myöskään pumpun tilavuusvirta ei pääse tuottamaan ongelmia.

Pesuaineen kuljetus voidaan toteuttaa joko tuomalla valmista pesuaineliuosta alhaalta koko putkiston läpi tai sijoittamalla pesuainetiiviste työkoriin ja injektoimalla

se vasta, kun vesi on saavuttanut työkorin. Jos pesuaine tuodaan alhaalta injektorin avulla, pesuainetiiviste sekoittuu suureen määrään vettä ja sen vahvuus voi jäädä liian laimeaksi. Erään korkeapainepumppuvalmistajan mukaan injektorilla voidaan saavuttaa enintään noin 15 %:n vahvuinen pesuaineliuos. Jos pesuaine sijoitetaan työkoriin, voidaan sen levitys toteuttaa erillisellä putkistolla.

Mahdollisesti paras tapa pesuaineen levittämiseksi olisi käyttää vaahtoavaa pesuainetta. Alhaalta tuleva korkeapainevesi ohjattaisiin erilliseen vaahtotusputkistoon, joka imisi pesuainetiivisten työkorissa sijaitsevasta säiliöstä. Nykyisiin palo- ja pelastuskäyttöön suunniteltuihin nostimiin on mahdollista saada vaahtosammutusjärjestelmä. Vaahtotus tapahtuu erillisillä suuttimilla ja vaahto kuljetetaan työkoriin kotelorungossa sijaitsevasta säiliöstä. Vaahtojärjestelmän soveltamista pesulaitteistoon kannattaa tarkastella laitteistoa suunniteltaessa.

Pesuaine ja vaha

Pesuaineeksi tulee valita ympäristöystävällinen biohajoava tuote. Lapaa pestäessä täytyy huomioida pesuaineen vaatima vaikutusaika. Pesuaineiden vaikutusajat ovat yleensä muutamia minuutteja, mutta ne riippuvat lavan pintamateriaalista ja pinnan likaisuudesta. Jos pesu aloitetaan liian aikaisin, ei pesuaine ole ehtinyt irrottaa likaa ja pinta ei välttämättä puhdistu. Vaikutusaika ei kuitenkaan saa olla niin pitkä, että pesuaine pääsee kuivumaan lavan pintaan. Vaikutusaikaa voidaan pidentää kastelemalla lavan pintaa, ennen kuin pesuaine ehtii kuivua.

Pesuainetta valittaessa tulee ottaa huomioon lavan valmistusmateriaali. Liuotin ei saa olla liian voimakasta, jotta lavan pinta ei vaurioidu, mutta kuitenkin riittävän tehokasta, jotta lika irtoaa lavan pinnasta. Pesuainetta valittaessa kannattaa tutustua myös vaahtoaviin pesuaineisiin. Vaahtoava pesuaine kuivuu hitaammin kuin nestemäinen pesuaine, joten sillä saavutetaan pidemmät vaikutusajat.

Vahaksi tulisi myös valita ympäristöystävällinen biohajoava tuote. Vahan täytyy kestää UV-säteilyä ja suolaa etenkin, jos voimala sijaitsee meren lähellä.

Harjapesu

Harjapesun yhteydessä käytetään tavallisesti myös painepesua. Tuulivoimalan lavat valmistetaan komposiitista, joten niiden kestävyys täytyy ottaa huomioon harjapesun yhteydessä. Puhdistamiseen sopii parhaiten pehmeästä materiaalista valmistettu harja. Sopiva materiaali olisi esimerkiksi vaahdotettu polyeteeni, jota käytetään autopesuloissa. Materiaaliksi sopii myös pehmeä nylonkuitu, jonka vahvuus olisi noin 0,50 mm. Nylonkuitu on pitkäikäinen ja kestää hyvin pesuaineita. Jos lapa halutaan kiillottaa, täytyy harjat olla valmistettu esimerkiksi valkofiiberistä.

Lavat likaantuvat eniten noin 30 mm:n matkalta etureunasta. Etureunalla on suurin vaikutus voimalan tuottoon, joten harjapesua tulee käyttää etenkin etureunan puhdistamiseen. Harjamallina voi käyttää esimerkiksi harjarullaa tai lautasharjaa. Harjarulla voisi olla työleveydeltään noin 500 mm ja ulkohalkaisijaltaan noin 200 – 300 mm. Muovisella halkaisijaltaan $d = 40$ mm runkoputkella harjan painoksi tulisi noin 10 kg. Painoon tulee lisätä vielä käytettävän akselin massa. Halkaisijaltaan $d = 500$ mm lautasharjan painoksi tulisi vastaavasti noin 5 kg. Lautasharja ei tarvitse erillistä akselia.

Harjojen pyörimisnopeus voisi olla noin 3,3 - 8,3 r/s eli 200 - 500 r/min. Tarvittavaan pyörimisnopeuteen vaikuttavat muun muassa puhdistettavan pinnan likaisuus, työkorin liikkumisnopeus sekä harjojen kuluneisuus. Tehontarve ei ole pienen kitkan vuoksi suuri. Harjoja voidaan käyttää joko hydraulilla tai sähkömoottorilla. Sähkömoottorilla harjojen nopeudensäätö voidaan toteuttaa invertterillä. Harjojen etäisyyttä lapaan voidaan ohjata esimerkiksi paineen avulla.

Haasteena harjapesussa on harjojen ohjaus. Harjarullaa on vaikea saada joustamaan sivusuunnassa, mikä taas lautasharjalla onnistuisi helpommin. Toisaalta lautasharjan kosketuspinta on pieni ja se soveltuu parhaiten erilaisiin käsikäyttöisiin koneisiin ja esimerkiksi lattianpesukoneisiin.

Putkisto ja vesisäiliö

Painepesulaitteisto tarvitsee suuttimien ja pumpun lisäksi myös putkiston, jota pitkin vettä saadaan siirrettyä työkoriin tarpeeksi korkealla paineella. Veden kuljetus voidaan hoitaa 5/8 ”, eli $d = 15,9$ mm putkella. Putkisto voidaan sijoittaa varsiston

sisään energiansiirtoketjuun, ja monissa laitteissa se on jo valmiiksi asennettuna. Putkisto on myös mahdollista jälkiasentaa varsiston ulkopuolelle.

Jos laitetta käytetään kylmällä ilmalla, tulee ottaa huomioon putkiston mahdollinen jäätyminen. Lisäksi putkiston päiden tulisi kestää hyvin korroosiota, joten niiden materiaaliksi kävisi esimerkiksi ruostumaton teräs.

Vettä voidaan varastoida joko henkilönostimien kotelorunkoon 1000 l:n säiliöön tai erilliseen säiliöperävaunuun. Useisiin HLA-sarjan laitteisiin on mahdollista asentaa vesisäiliö, mutta läheskään kaikissa XDT-sarjan laitteissa ei ole sitä varten tarpeeksi tilaa.

Pesuveden talteenotto

Lavan pesussa tulee ottaa huomioon sen ympäristölle aiheuttama kuormitus. Luontoon ei saa päästä pesussa mahdollisesti käytettäviä haitallisia aineita. Ympäristön kannalta paras ratkaisu olisi kerätä likainen vesi talteen tai kierrättää sitä koko pesuprosessin ajan.

Pesuveden talteenoton voi toteuttaa esimerkiksi imurilla, jolloin vesi imettäisiin lavan pinnalta pesurakenteen alapäästä. Haasteelliseksi tässä muodostuu imurilaitteiston imusuulakkeen pitäminen tarpeeksi lähellä lavan pintaa sekä laitteiston koko ja paino. Suulakkeen tulee olla hyvin lähellä lapaa, jotta imurin tehontarve voidaan pitää mahdollisimman pienenä ja samalla lavan pintaan saadaan kohdistumaan mahdollisimman tehokas imu. Talteenotettu vesi tulisi joko varastoida työkoriin erilliseen säiliöön, jolloin se lisää korikuormaa tai kuljettaa erillistä putkea pitkin maan tasalle, jolloin laitteeseen tulisi lisätä yksi ylimääräinen putkisto.

Jos laitteisto pystytään pitämään jatkuvasti hyvin lähellä lavan pintaa, voidaan imurin lisäksi pohtia myös erilaisten lastojen käyttämistä. Tällöin lavan pinnalla kulkisi tiiviste, joka pyyhkisi pinnalta enimmäkseen vedet pois ja ohjaisi ne maahan johtavaan putkistoon. Tällä tavoin veden talteenotto toimisi painovoiman avulla ja tarvittavan laitteiston paino voitaisiin pitää pienenä.

Paras ratkaisu olisi kierrättää pesuvettä. Vettä kerättäisiin esimerkiksi imurilla ja se kierrätettäisiin suodattimen kautta takaisin pesulaitteistoon. Tällöin vettä säästettäisiin

huomattavasti ja pesuvettä ei päätyisi paljoa luontoon. Tällöin myös veden talteenottoa ei tarvitsisi järjestää esimerkiksi erillisiin säiliöihin.

Pesuveden talteenkeräys voi olla haasteellista toteuttaa. Monet veden keräämiseen tarkoitetut välineet tulisi sijoittaa lähelle pestävää lapaa tai kiinni sen pintaan. Saman etäisyyden pitäminen työkorin liikkua voi osoittautua vaikeaksi. Asia voidaan osittain ratkaista käyttämällä ympäristöystävällisiä pesuaineita ja vahoja. Luontoon joutuessaan aineet hajoavat ja eivät aiheuta ongelmia.

Erään pesusovelluksien valmistajan mukaan veden talteenottaminen ei ole tarpeellista, koska painepesua käytettäessä vesi höyrystyy ja lavan pinnalla olevat epäpuhtaudet sitoutuvat siihen. Höyryn ja lian laskeutuessa maata kohti sekoittuvat ne ilmaan ja suurin osa epäpuhtauksista jää ilman sekaan eikä päädy maahan. Tässäkin ratkaisussa tulisi kuitenkin pohtia ympäristön kuormitusta.

3.4.4 Tarkastuslaitteisto

Tarkastuslaitteisto koostuu kamerasta ja sen vaatimista toimilaitteista. Kameraa valittaessa on tärkeää huomioida valaistus. Tarkasteltavan kohteen tulee näkyä hyvin kaikissa käyttöolosuhteissa, joten valaistuksen tulisi olla mahdollisimman stabiili. Valaistus voidaan toteuttaa loisteputkilla tai led- tai strobovaloilla. Paras ratkaisu valaistukseen selviää kokeilemalla. Myös kuvaolosuhteiden tulisi olla mahdollisimman stabiilit. Tämän vuoksi nostimen nopeus ja kameran etäisyys lavasta eivät saisi muuttua suuresti tarkastuksen aikana. Lisäksi kameran säänkesto tulee ottaa huomioon laitteistoa suunniteltaessa. Kamera tulisi tarvittaessa koteloida säänkestävään koteloon, jolloin se kestää ulkoilmaa paremmin.

Konenäön voi toteuttaa esimerkiksi harmaasävykameralla. Jos valkoiselta pohjalta etsitään mustia virheitä, on harmaasävykamera tarkempi kuin värikamera. Kameran tarkkuudeksi voisi riittää VGA. VGA-kameran tarkkuus riittää havaitsemaan 50 x 50 cm:n alueelta jopa millin suuruiset virheet. Kameralla pystytään kuvaamaan noin 1 m:n suuruisia alueita 0,5 m:n etäisyydellä lavasta. Kuvattavan alueen kokoa pystytään kuitenkin muuttamaan kameran kallistuksella ja etäisyyttä muuttamalla. Peitto 3,5 m:ä leveälle lavalle kyettäisiin saavuttamaan kahdella kameralla.

Erään valmistajan mukaan paras ratkaisu olisi käyttää 3 x 3 m:n kokaisia alueita kuvaavaa viivakameraa. Tällöin lavan puolikasta varten tarvittaisiin 14 kuvaa.

Kameran etäisyyden tulisi olla noin 1-2 m:ä lavan pinnasta, jolloin pystytään vielä erottamaan pieniä yksityiskohtia.

Haasteeksi kameraa käytettäessä voi muodostua lian erottaminen vaurioista. Jos lavan pinta ei ole aivan puhdas, voi kamera erehtyä luulemaan likaista kohtaa vaurioksi. Asia täytyy huomioida laitteiston testauksen yhteydessä.

3.4.5 Materiaalien valinta

Laitteiston suunnittelussa tulee kiinnittää huomiota myös materiaalien valintaan. Materiaalivalinnoilla voidaan saavuttaa suuria säästöjä laitteiston painossa, kestävydessä ja kokonaiskustannuksissa.

Materiaaleja valittaessa olisi hyvä harkita metallien ohella myös muoveja ja komposiittimateriaaleja, kuten hiili- ja lasikuitua. Komposiitit ovat kestäviä, kevyitä ja kestävät korroosiota hyvin. Jos materiaalina käytetään metallia, täytyy se pintakäsittellä korroosion estämiseksi. Pesuaineet ovat hyvin emäksisiä ja voivat sen vuoksi syövyttää jopa alumiinia.

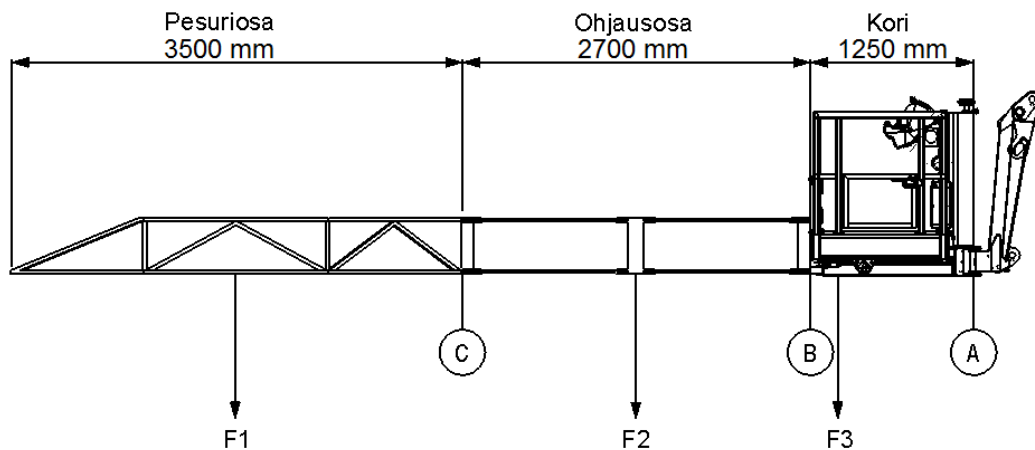
3.5 Lujuustekninen mitoitus

Työkoreja suunniteltaessa laadittiin myös karkeat lujuustekniset mitoitukset. Mitoitusten avulla voitiin tarkastella kuinka paljon pesulaitteiston osat saavat enintään painaa varsiston ja työkorin kestävyden kärsimättä. Työkoreilla 1, 2 ja 3 on pidempi ohjausrakenne kuin työkorilla 4, joten niille käytettiin samaa laskelmaa ja työkorille 4 laadittiin oma laskelma.

Laskelmien pohjana ja vertailukohteena käytettiin XDT-sarjan levitettävän työkorin kuormituslaskelmia vinssikäytön aikana. S 104 HLA -laitteessa käytetään samoja osia korin kiinnityksessä, joten laskelmat pätevät myös siihen. Työkorin korikuorma saa levitettävässä työkorissa olla enintään 600 kg. Korikuormasta 120 kg varataan korissa työskentelevän henkilön ja mahdollisten työkalujen painoksi. Korikuormasta jää siis 480 kg pesulaitteistoa varten. Laitteisto saa aiheuttaa enintään 12 kNm:n dynaamisen vääntömomentin työkorin niveleen, mutta laskelmissa pyrittiin pitämään niveleen kohdistuva vääntömomentti alle 10 kNm:ssä varmuuden maksimoimiseksi.

Lujuuslaskelmat työkoreille 1, 2 ja 3

Työkorit 1, 2 ja 3 on suunniteltu mahdollisimman kevyiksi ja mitoiltaan normaalia työkorin pienemmiksi. Laadituissa laskelmissa käytettiin varmuuden lisäämiseksi normaalin työkorin mittoja ja saatuja tuloksia verrattiin normaalin työkorin kestävyuteen. Laskelmissa laitteiston rakenne jaettiin kolmeen osaan: koriin, ohjausosaan ja pesuriosaan (kuva 14).



KUVA 14. Korien 1, 2 ja 3 rakenne, painopisteiden sijainnit sekä tarkasteltavat kohdat

Aluksi tarkasteltiin työkorin kannattimeen (kuva 14, kohta A) vaikuttavaa vääntömomenttia. Pesuriosan ja ohjausosan painopisteiden F1 ja F2 oletettiin sijaitsevan niiden keskellä. Korissa työskentelevän henkilön painopiste F3 sijaitsee 100 mm:n päässä työkorin etureunasta. Laskelmissa pesuriosan kokonaismassana käytettiin 80 kg:aa ja sen painopiste F1 sijaitsee 5700 mm:n etäisyydellä kannattimesta. Pesuriosan massa jaetaan kahteen osaan niissä työkoreissa, joissa käytetään lavan molemminpuolista pesua. Ohjausosan massana käytettiin 90 kg:aa ja sen painopiste F2 sijaitsee 2600 mm:n etäisyydellä kannattimesta. Korissa työskentelevän henkilön massaksi asetettiin 100 kg ja mahdollisten työkalujen painoksi 20 kg. Henkilön painopiste F3 on 1150 mm:n etäisyydellä kannattimesta.

Kannattimeen vaikuttavaksi staattiseksi vääntömomentiksi saatiin 8,28 kNm. Laskelmien tulokset on esitetty taulukossa 5.

TAULUKKO 5. Kannattimeen vaikuttava staattinen momentti työkoreissa 1, 2 ja 3

Osa	Paino (N)	Etäisyys (m)	Momentti (Nm)
Kori (työmies + varusteet)	1200	1,15	1380
Ohjausosa	900	2,60	2340
Pesuriosa	800	5,70	4560
Yhteensä	2900		8280

Käytännön kannalta on parempi tarkastella momenttia dynaamisen kuormituksen avulla. Dynaaminen kuormitusmomentti lasketaan kertomalla staattisen kuormituksen arvo dynaamisella kertoimella. Bronto Skyliftillä kertoimen arvona käytetään 1,2:ta.

Kannattimeen vaikuttavaksi dynaamiseksi momentiksi saatiin

$$8,28 \text{ kNm} \cdot 1,2 = 9,936 \text{ kNm}$$

Laskettu dynaaminen momentti 9,936 kNm jää varmuusrajan 10 kNm alle ja on selvästi pienempi kuin alkuperäiseen vinssikäyttöön suunnitellun työkorin vastaava arvo 12,88 kNm. Lisäksi työkorit ovat painoltaan huomattavasti alkuperäistä levitettävää työkoria kevyempiä, joten rakenne kestää asetetuilla kuormituksilla hyvin.

Pesulaitteistolle oli käytössä 480 kg korikuormasta. Jos kannattimeen vaikuttava dynaaminen vääntömomentti halutaan pitää alle 10 kNm:n, ohjausosan ja pesuriosan yhteispainoa ei voida juurikaan kasvattaa käytetyillä etäisyyksillä suuremmaksi kuin 170 kg.

Ohjausosan ja pesuriosan kiinnityksiin käytettyihin niveliin (kuva 14, kohdat B ja C) vaikuttavien vääntömomenttien arvot laskettiin samalla periaatteella. Ohjausosan niveleen vaikuttavaksi staattiseksi vääntömomentiksi saatiin 4,775 kNm ja pesuriosan vastaavaksi vääntömomentin arvoksi saatiin 1,400 kNm.

Taulukossa 6 on esitetty ohjausosan niveleen vaikuttava staattinen momentti ja taulukossa 7 pesuriosan niveleen vaikuttava staattinen momentti.

TAULUKKO 6. Ohjausosan nivelen staattinen momentti työkoreissa 1, 2 ja 3

Osa	Paino (N)	Etäisyys (m)	Momentti (Nm)
Ohjausosa	900	1,35	1215
Pesuriosa	800	4,45	3560
Yhteensä	1700		4775

Ohjausosan nivelen dynaamiseksi vääntömomentiksi saatiin

$$4,775 \text{ kNm} \cdot 1,2 = 5,730 \text{ kNm}$$

TAULUKKO 7. Pesuriosan nivelen staattinen momentti työkoreissa 1, 2 ja 3

Osa	Paino (N)	Etäisyys (m)	Momentti (Nm)
Pesuriosa	800	1,75	1400
Yhteensä	800		1400

Pesuriosan nivelen dynaamiseksi vääntömomentiksi saatiin

$$1,40 \text{ kNm} \cdot 1,2 = 1,68 \text{ kNm}$$

Ohjausosan kiinnikkeen mitoitusta tarkasteltiin taivutusvastuksen W avulla. Poikkileikkauksen taivutusjännitys lasketaan kaavalla:

$$|\sigma_t|_{\max} = \frac{|M_t|}{W} \quad (1)$$

jossa M_t on taivutusmomentti ja σ_t taivutusjännitys (Outinen, Salmi & Vulli 2007, 182; kaava 5).

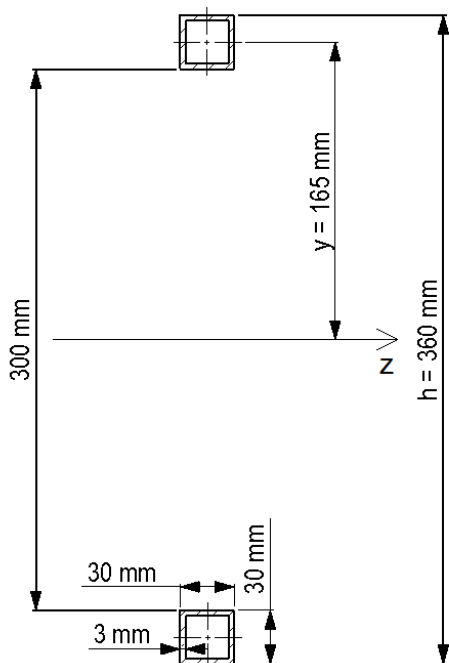
Kiinnikkeeseen vaikuttava taivutusvastus lasketaan kaavaan 1 perustuvalla kaavalla:

$$W = \frac{M}{\sigma} \quad (2)$$

jossa M on kiinnikkeeseen vaikuttava momentti ja σ käytettävän materiaalin myötöraja. Osien tulee olla kevyitä, joten valmistusmateriaalina oletetaan käytettävän alumiinia. Bronto Skyliftillä alumiinin myötörajana käytetään 150 MPa. Sijoittamalla arvot saatiin

$$W = \frac{5\,730\,000 \text{ Nmm}}{150 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 38\,200 \text{ mm}^3 = 3,82 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Kiinnikkeeseen voidaan siis käyttää profiilia, jonka taivutusvastus on suurempi kuin $3,82 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$. Käytettävän rakenteen poikkileikkaus vaikuttaa merkittävästi taivutusvastuksen arvoon. Taivutusvastusta tarkasteltiin kuvassa 15 esitetylle poikkileikkaukselle.



KUVA 15. Tarkasteltava poikkileikkaus ja sen päämitat

Poikkileikkauksen taivutusvastus W_1 lasketaan kaavalla

$$W_1 = \frac{I_z}{a_1} \quad (3)$$

jossa I_z on neliömomentti z-akselin suhteen ja a_1 reunaetäisyys (Outinen ym. 2007, 182; kaava 3). Kuvassa 15 esitetylle poikkileikkaukselle taivutusvastus W lasketaan kaavaan 3 perustuvalla kaavalla:

$$W = \frac{I_z}{\frac{h}{2}} \quad (4)$$

jossa h on profiilien uloimpien pintojen etäisyys toisistaan. STEINERin lauseen mukaan neliömomentti I lasketaan kaavalla:

$$I = I_0 + A \cdot a^2 \quad (5)$$

jossa I_0 on yhdensuuntaisen keskeissuoran (pintakeskiön) suhteen laskettu neliömomentti, a suorien välimatka ja A kyseisen pinnan ala (Outinen ym. 2007, 411; kaava 1). Neliömomentti I_z kuvassa 15 esitetylle poikkileikkaukselle lasketaan kaavan 5 perusteella kaavalla:

$$I_z = 2 \cdot A \cdot y^2 + 2 \cdot I_z \quad (6)$$

jossa A on profiilin pinta-ala, y on etäisyys profiilin keskilinjasta poikkileikkauksen massakeskipisteeseen ja I_z profiilin neliömomentti. Tässä suuruusluokassa I_z jätetään huomioimatta, koska sen merkitys on mitätön. Mitoiltaan 30 x 30 x 3 mm neliöprofiilille neliömomentiksi I_z saatiin:

$$I_z = 2 \cdot [(30 \text{ mm})^2 - (24 \text{ mm})^2] \cdot (165 \text{ mm})^2 = 17\,641\,800 \text{ mm}^4$$

Sijoittamalla neliömomentin arvo kaavaan 4 saatiin taivutusvastuksen arvoksi:

$$W = \frac{17\,641\,800 \text{ mm}^4}{\frac{360 \text{ mm}}{2}} = 98\,010 \text{ mm}^3 \approx 9,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Neliöprofiilista valmistetun poikkileikkauksen taivutusvastuksen arvoksi saatiin $9,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$. Arvo on selvästi suurempi kuin ohjausosan taivutusvastuksen arvo $3,82 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$, joten rakenne kestää asetetulla kuormituksella varmasti.

Poikkileikkauksen kestävyyttä tarkasteltiin myös $d = 30 \text{ mm}$ putkiprofiililla ja 3 mm seinämävahvuudella. Neliömomentsi I_z laskettiin kaavalla 6:

$$I_z = 2 \cdot [\pi \cdot (15 \text{ mm})^2 - \pi \cdot (12 \text{ mm})^2] \cdot (165 \text{ mm})^2 \approx 13\,855\,837,32 \text{ mm}^4$$

Sijoittamalla neliömomentin arvo kaavaan 4 saatiin taivutusvastuksen arvoksi:

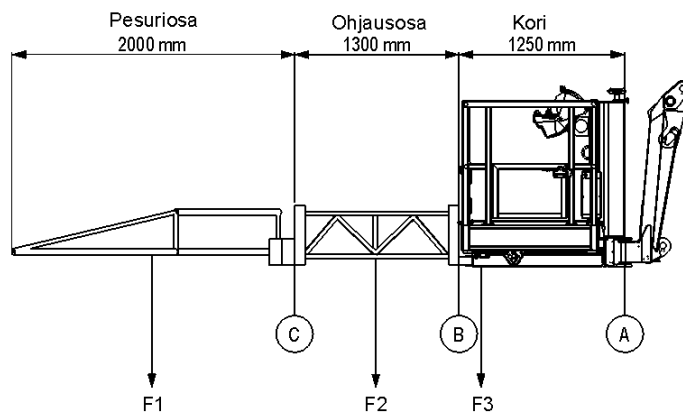
$$W = \frac{13\,855\,837,32 \text{ mm}^4}{\frac{360 \text{ mm}}{2}} \approx 76\,976,87 \text{ mm}^3 \approx 7,7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Putkiprofiilista valmistetun poikkileikkauksen taivutusvastuksen arvoksi saatiin $7,7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$. Arvo on selvästi suurempi kuin ohjausosan taivutusvastuksen arvo $3,82 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$, joten rakenne kestää asetetulla kuormituksella varmasti.

Laskujen perusteella havaittiin, että vaikka kuvassa 15 esitetyn poikkileikkauksen profiilit on mitoitettu pieneksi, ne kestävät asetetuilla painoilla hyvin. Pesuriosan kiinnikkeeseen kohdistuva voima on selvästi pienempi kuin ohjausrakenteeseen vaikuttava voima. Tämän vuoksi voidaan olettaa, että pesuriosan kiinnikkeeseen käytetyt rakenteet kestävät, jos niissä käytetään kuvassa 15 esitettyä poikkileikkausta ja $30 \times 30 \times 3 \text{ mm}$ neliöprofiilia tai $d = 30 \text{ mm}$ putkiprofiilia 3 mm:n seinämävahvuudella.

Lujuuslaskelmat työkorille 4

Työkorille 4 lujuuslaskelmat tehtiin samoin kuin työkoreille 1, 2 ja 3. Tarkoituksena oli selvittää suurimmat massat, joita rakenteessa voi käyttää. Kuvassa 16 on esitetty laitteiston periaatekuva. Pesuriosan ja ohjausosan painopisteiden F1 ja F2 oletettiin sijaitsevan niiden keskellä. Korissa työskentelevän henkilön painopiste F3 sijaitsee 100 mm: n etäisyydellä korin etureunasta. Laskelmien erot muodostuvat työkorin 4 huomattavasti lyhyempien ohjausrakenteen ja pesuriosan vuoksi. Käytännössä rakenne voi olla kevyempi ja mitoiltaan lyhyempi.



KUVA 16. Korin 4 rakenne, painopisteiden sijainnit ja tarkasteltavat kohdat

Aluksi selvitettiin kannattimeen (kuva 16, kohta A) vaikuttava vääntömomentti. Pesuriosan massaksi asetettiin 120 kg ja sen painopiste F1 sijaitsee 3550 mm: n etäisyydellä kannattimesta. Ohjausosan painoksi asetettiin 140 kg ja sen painopiste F2 sijaitsee 1900 mm: n etäisyydellä kannattimesta. Korissa työskentelevän henkilön massaksi asetettiin 100 kg ja mahdollisten työkalujen painoksi 20 kg. Henkilön painopiste F3 on 1150 mm: n etäisyydellä kannattimesta. Kannattimeen vaikuttavaksi staattiseksi momentiksi saatiin 8,3 kNm. Taulukossa 8 on esitetty laskelmien tulokset.

TAULUKKO 8. Kannattimeen vaikuttava staattinen momentti työkorissa 4

Osa	Paino (N)	Etäisyys (m)	Momentti (Nm)
Kori (työmies + varusteet)	1200	1,15	1380
Ohjausosa	1400	1,90	2660
Pesuriosa	1200	3,55	4260
Yhteensä	3800		8300

Kannattimeen vaikuttavaksi dynaamiseksi momentiksi saatiin

$$8,3 \text{ kNm} \cdot 1,2 = 9,96 \text{ kNm}$$

Laskettu dynaaminen momentti 9,96 kNm jää varmuusrajan 10 kNm alle ja kestää asetetuilla kuormilla varmasti. Rakenne kestää siis jopa 260 kg painon asetetuilla etäisyyksillä.

Vastaavasti ohjausosan ja pesuriosan kiinnityksiin käytettyihin niveliin (kuva 16, kohdat B ja C) vaikuttaviksi staattisiksi vääntömomenteiksi saatiin 3,67 kNm ja 1,2 kNm. Taulukossa 9 on esitetty ohjausosan kiinnikkeeseen vaikuttava staattinen momentti.

TAULUKKO 9. Ohjausosan nivelen staattinen momentti työkorissa 4

Osa	Paino (N)	Etäisyys (m)	Momentti (Nm)
Ohjausosa	1400	0,65	910
Pesuriosa	1200	2,30	2760
Yhteensä	2600		3670

Ohjausosan niveleen vaikuttavaksi dynaamiseksi momentiksi saatiin

$$3,67 \text{ kNm} \cdot 1,2 = 4,404 \text{ kNm}$$

Taulukossa 10 on esitetty pesuriosan niveleen vaikuttava momentti.

TAULUKKO 10. Pesuriosan nivelen staattinen momentti työkorissa 4

Osa	Paino (N)	Etäisyys (m)	Momentti (Nm)
Pesuriosa	1200	1,00	1200

Pesuriosan niveleen vaikuttavaksi dynaamiseksi momentiksi saatiin

$$1,2 \text{ kNm} \cdot 1,2 = 1,44 \text{ kNm}$$

Kiinnikkeisiin laskettujen dynaamisten momenttien arvot 4,404 kNm ja 1,44 kNm ovat selvästi pienemmät, kuin työkorien 1, 2 ja 3 vastaavat arvot 5,73 kNm ja 1,68 kNm,

jolloin myös taivutusvastusten arvot jäävät pienemmiksi. Tämän vuoksi voidaan olettaa kiinnikkeiden kestävän jos niissä käytetään samanlaista rakennetta ja poikkileikkausta (kuva 15), kuin työkoreissa 1, 2 ja 3.

3.6 Painehäviöt putkistossa

Suuri työskentelykorkeus ja pitkät etäisyydet aiheuttavat vesiputkistoon painehäviöitä. Mitä pidempi putkisto on, sitä suurempi on painehäviö. Vesi siirretään maan tasosta työkoriin 5/8 ” putkea pitkin. Putken halkaisija $d = 15,875$ mm. Haluttu tilavuusvirta q_v putkistossa riippuu käytettävien suuttimien määrästä ja siitä kuinka paljon tuottoa tarvitaan, jotta lavan pinta saadaan puhtaaksi.

Lavan yhden puolen pesuun voisi riittää 8 kappaletta suuttimia, joiden etäisyys lavasta olisi 70 cm ja peittoalue olisi noin 60 cm. Jos pesuun käytetään 8:aa suutinta $1,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ eli 10 l/min tilavuusvirralla, pumpun tilavuusvirran q_v tulee tällöin olla $13,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ eli 80 l/min. Veden viskositeetti ν on 1,00 cSt ja veden tiheys ρ on $1000,00 \text{ kg/m}^3$. Painehäviöt putkistossa laskettiin seuraavalla tavalla:

Tilavuusvirta q_v lasketaan kaavalla:

$$q_v = A \cdot v \quad (7)$$

jossa A on putken pinta-ala ja v virtausnopeus (Mäkelä, Soininen, Tuomola & Öistämö 2005, 99). Virtausnopeus lasketaan kaavaan 7 perustuvalla kaavalla:

$$v = \frac{q_v}{A} = \frac{q_v}{\pi \cdot \frac{d^2}{4}} \quad (8)$$

johon sijoittamalla saatiin

$$v = \frac{13,3 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\pi \cdot \frac{(0,015875 \text{ m})^2}{4}} \approx 6,74 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reynoldsin luku Re lasketaan kaavalla:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (9)$$

jossa D on putken halkaisija d (Mäkelä ym. 2005, 101). Kaavaan sijoittamalla saatiin

$$Re = \frac{6,74 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,015875 \text{ m}}{0,000001 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} \approx 106\,938,75$$

Tulos on suurempi kuin 2300, joten virtaus on turbulентtinen. Sileälle hydrauliputkelle turbulентtisella virtauksella kitkahäviö lasketaan Blasiuksen kaavalla:

$$f = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad (10)$$

jossa f on kitkahäviö (Ministry of Science and Technology, Department of Technical and Vocational Education, 1). Sijoittamalla Reynoldsin luku kaavaan, saatiin

$$f = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{106\,938,75}} \approx 0,017 \approx 0,02$$

Putken painehäviö Δp lasketaan Darcy-Weisbachin kaavalla:

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{l}{d_h} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (11)$$

jossa l on putkiston pituus, d_h putken halkaisija d ja λ edellisessä laskussa laskettu kitkahäviö f (The Engineering ToolBox). Painehäviö lasketaan kaavaan 11 perustuvalla kaavalla:

$$\Delta p = \frac{f \cdot \frac{l}{d} \cdot v^2 \cdot \frac{\rho}{2}}{100\,000} \quad (12)$$

S 78 XDT -laitteeseen tulee noin 90 metriä putkistoa, jolloin painehäviöksi saatiin

$$\Delta p = \frac{0,02 \cdot \frac{90 \text{ m}}{0,015875 \text{ m}} \cdot (6,74 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \cdot \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{2}}{100\,000} \approx 22,51 \text{ bar} \approx 23 \text{ bar}$$

Lisäksi pumpattaessa vettä maantasosta ylöspäin täytyy huomioida hydrostaattisen paineen aiheuttama häviö. Painehäviö on karkeasti 1 bar/10 m.

S 78 XDT laite ylittää lähes 80 metrin korkeuteen, joten laskettuun tulokseen tuli lisätä vielä 8 bar. Tällöin S 78 XDT -laitteen painehäviöksi $1,33 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ eli 80 l/min tilavuusvirralla saatiin $23 \text{ bar} + 8 \text{ bar} = 31 \text{ bar}$ eli 3,1 MPa.

S 104 HLA-laitteeseen putkistoa tulee noin 115 m, jolloin painehäviöksi saatiin noin 29 bar. Laskettuun tulokseen lisättiin vielä hydrostaattisen paineen aiheuttama häviö 11 bar, jolloin saatiin $29 \text{ bar} + 11 \text{ bar} = 40 \text{ bar}$ eli 4,0 MPa.

Käytetyillä arvoilla laitteisto tulisi mitoittaa siten, että se kattaa suurimmillaan 4,0 MPa:n painehäviön.

4 TYÖN TULOKSET

Tuloksia tarkasteltaessa tulee muistaa, että esitetyt ratkaisut ovat vasta luonnoksia lopullisesta tuotteesta. Valmista ratkaisua lavan pesuun, vahaukseen ja tarkastukseen ei voida esittää, ennen kuin laitteistoa on päästy testaamaan käytännössä.

Työn aikana suunniteltiin luonnokset neljästä pesulaitteistosta, joista kolme asennetaan täysin uuteen työkorimalliin ja yksi voidaan jälkiasentaa nykyisin käytössä oleviin työkoreihin. Kaikissa työkoreissa korin kiinnitys varsistoon tapahtuu nykyisin käytössä olevilla osilla ja niissä voidaan käyttää normaaleja antureita ja mittareita. Kaikki pesulaitteistot hyödyntävät painepesua ja harjapesua, mutta ne voidaan toteuttaa myös ilman harjapesuria.

Työkorit on ryhmitelty ohjausrakenteen tyyppin perusteella. Pidemmällä ohjausrakenteella varustetut pesulaitteistot vaativat kuljetusasennossa enemmän tilaa, ja tämän vuoksi niitä varten on suunniteltu täysin uusi korimalli. Uusi korimalli on mitoiltaan normaalia koria kapeampi ja lyhyempi. Lyhyellä ohjausrakenteella varustettu pesulaitteisto on suunniteltu jälkiasennettavaksi nykyisin käytössä oleviin työkoreihin. Työkorit, joissa käytetään pidempää ohjausrakennetta toimivat täysin automaattisesti, kun taas lyhyttä ohjausrakennetta käytettäessä nostinta ajetaan käsiajolla. Pesulaitteisto työkoreissa 1, 2 ja 3 sijoittuu pidemmän ohjausrakenteen päähän ja työkorissa 4 käytetään lyhyttä ohjausrakennetta.

Kaikissa työkoreissa käytetään viuhkasuuttimia ja pesuaineet ja vahat on sijoitettu työkoriin. Suuttimet on asennettu pesulaitteistojen varsistoihin joko erillisiin suutinputkiin tai suoraan varsiston rakenteeseen. Suuttimia tarvitaan 8 kappaletta lavan yhtä puolta kohden. Suuttimet on asetettu kohtisuoraan lavan pintaan nähden, jotta suihkun iskuvoima olisi mahdollisimman suuri. Pesuun käytettävä vesi saadaan kotelorunkoon asennetusta vesisäiliöstä. Koreissa käytettävä tarkastuslaitteistona käytetään viivakameraa, jolla otetaan noin 14 kuvaa lavan yhtä puolta kohden. Työkoreihin on lisätty muoviset suojalasit, jotka suojaavat korissa työskentelevää henkilöä pesussa roiskuvalta vedeltä ja lialta.

Työkierrot ovat kaikissa työkoreissa samankaltaiset. Erot työkierroissa riippuvat siitä, pestäänkö tuulivoimalan lapa molemmilta vai vain toiselta puolelta kerrallaan. Lavan kahdelta puolelta pesevien laitteistojen työkierto olisi esimerkiksi:

1. Henkilönostimen ajaminen tuulivoimalan viereen ja käyttökuntoon laittaminen
2. Työkorin ajaminen lavan kärkeen
3. Työkorin ajaminen lavan juureen ja pesuaineen levitys, lavan silmämääräinen tarkastus
4. Työkorin ajaminen lavan kärkeen
5. Työkorin ajaminen lavan juureen ja lavan pesu sekä tarkastus kameralaitteistolla
6. Mahdollisten vaurioiden tarkastus ja korjaus, likaiseksi jääneiden kohtien puhdistus manuaalisesti
7. Vahan levitys

Vain toiselta puolelta kerralla pesevien laitteistojen tulee edellä esitetyn työkierron jälkeen kääntää pesulaitteisto lavan toiselle puolelle ja palata kohtaan 2.

4.1 Työkori 1

Työkori 1 on suunniteltu puhdistamaan, tarkastamaan ja vahaamaan lavan molemmat puolet automaattisesti. Työkorin 1 pesulaitteisto on jaettu kahteen osaan. Pesuriosan molemmat puolet koostuvat kolmesta jaksosta, jotka liittyvät toisiinsa nivelillä. Jaksot valmistetaan putkiprofiilista ja niissä käytetään ristikkorakennetta. Putkiprofiili mahdollistaa pesuveden kuljetuksen rakenteen sisällä, joten erillistä vesiputkistoa ei tarvita. Pesusuuttimet on asennettu suoraan kiinni putkiprofiiliin.

Varsiston ensimmäisiä jaksoja käytetään pesulaitteiston juureen kiinnitetyillä hydraulisylintereillä. Ensimmäisten jaksojen raja-antureina toimivat jaksoihin kiinnitetyt pesuharjat. Pesuharjoissa on painetta tarkkailevat anturit, jotka tunnistavat, kuinka suurella paineella harjat painavat lavan pintaa. Ensimmäisten jaksojen liikkeitä hallitaan harjojen paineantureilta saatujen tietojen perusteella. Toinen ja kolmas jakso toimivat jousikuormituksilla, ja niitä ohjataan mekaanisilla raja-antureilla. Antureina toimivat lavan pinnalla kulkevat muovirullat. Rullat levittävät pesulaitteistoa nivelten jousikuormaa vastaan.

Pesulaitteisto otetaan käyttöön ajamalla työkori tuulivoimalan lavan kärjen alle ja painamalla laitteiston kolmansien jaksojen päät yhteen. Kun työkoria aletaan ajaa ylöspäin lapa, mekaaniset rajat osuvat lavan pintaan. Anturit alkavat taivuttaa pesulaitteiston jousikuormitteisia jaksoja ulospäin samalla levittäen koko pesulaitteistoa kauemmas lavan pinnasta.

Lavan pintaa seurataan siis koko lavan matkalta mekaanisesti pintakosketuksen avulla. Raja-anturit ohjaavat myös vedensyöttöä. Jos lavan muoto esimerkiksi kapenee, anturit havaitsevat muutoksen ja katkaisevat veden syöttämisen alueelle, jolle vettä ei enää tarvita. Kuljetusasennossa ohjausrakenne on vedetty kasaan ja pesulaitteiston varret on taiteltu käsin nippuun.

Työkorin 1 jatkokehitys lopetettiin, koska mekaanisten rajojen käyttö ei ole joidenkin tuulivoimalan lapa- valmistajien mukaan suositeltavaa.

4.2 Työkori 2

Työkori 2 on suunniteltu puhdistamaan, tarkastamaan ja vahaamaan lavan molemmat puolet automaattisesti. Korin 2 pesulaitteiston rakenne poikkeaa työkorin 1 laitteistosta siten, että tuulivoimalan lapaan ei oteta mekaanista kontaktia muuten kuin pesuharjojen osalta. Pesulaitteiston raja-antureina käytetään laserilla toimivia mittalaitteita. Anturit tarkkailevat pesurin etäisyyttä lapaan ja ohjaavat hydraulisyntereitä, jotka pitävät pesulaitteiston halutulla etäisyydellä lavasta. Lisäksi anturit mittaavat lavan muotoja ja ohjaavat suuttimia pesemään vain sen alueen, jolle vettä tarvitaan.

Työkorin pesulaitteisto on jaettu kahteen osaan, jotka muodostuvat kahdesta nivelillä toisiinsa liitetystä jaksosta. Jaksot on tehty neliöprofiilista ja niissä käytetään ristikkorakennetta. Käyttämällä kahta jaksoa kolmen sijaan on pyritty yksinkertaistamaan ja keventämään pesurin rakennetta. Kuljetusasentoa varten ensimmäisiin jaksoihin on lisätty nivelet, joiden varassa laitteiston saa taiteltua pienempiin osiin. Nivelet ovat lukittuina koko työskentelyn ajan ja ne vapautetaan vain kuljetusasennon käytön ajaksi.

Rakenteen ensimmäiset jaksot kiinnittyvät ohjausrakenteeseen nivelillä ja niitä käytetään hydraulisyntereillä. Ensimmäisen jakson mekaanisina raja-antureina toimivat pesuharjat. Harjoissa on kontaktia tarkkailevat anturit, jotka toimivat samalla

periaatteella, kuin työkorissa 1. Myös rakenteen toisia jaksoja käytetään hydraulisyliinterillä ja niitä ohjataan toisiin jaksoihin sijoitetuilla laser-antureilla. Kuljetusasennossa ohjausrakenne on vedetty kasaan ja pesulaitteiston varret on taiteltu käsin nippuun.

Työkoria 2 ei kehitetty pidemmälle, koska sen valmistaminen tulisi käytännössä liian kalliiksi. Kustannukset nousevat korkeiksi kaksipuoleisen pesurakenteen vaatiman monimutkaisen ohjauksen vuoksi. Laitteen toimintavarmuuden saavuttaminen ja turvallinen käyttö vaatisivat liian paljon antureita ja ohjelmistoa.

4.3 Työkori 3

Työkori 3 on rakenteeltaan lähes samanlainen kuin työkori 2, mutta sitä on yksinkertaistettu poistamalla pesuriosan toinen puoli. Ratkaisulla on haettu laitteiston parempaa hallittavuutta ja ohjattavuutta. Lisäksi antureita, ohjelmistoa ja materiaaleja vähentämällä säästetään valmistuskustannuksissa. Työkori puhdistaa, tarkastaa ja vahaa lavan pinnat automaattisesti.

Laitteiston pesuriosan ja ohjausrakenteen niveleen on lisätty 180 asteen käännön mahdollistava moottoroitu nivel. Laitteistolla pestään lavasta vain yksi puoli kerrallaan ja pesun ja vahauksen jälkeen laitteisto käännetään nivelen varassa lavan toiselle puolelle. Kuljetusasennossa ohjausrakenne on vedetty kasaan korin eteen ja pesulaitteisto on käännetty korin sivulle linkkuun.

4.4 Työkori 4

Työkori 4 on suunniteltu lisälaitteeksi jo myytyihin työkoreihin. Koria ajetaan käsiajolla ja pesulaitteiston etäisyyttä lapaan säädetään automaattisesti lyhyellä ohjausrakenteella. Kori pesee, tarkastaa ja vahaa lavat yhdeltä puolelta kerrallaan. Laitteisto käännetään lavan toiselle puolelle moottoroidun nivelen varassa.

Lyhyt ohjausrakenne ja lavan pesu yhdeltä puolelta kerrallaan mahdollistavat laitteiston kevyemmän rakenteen. Lyhyen ohjausrakenteen vuoksi kori sijoittuu lähemmäksi voimalan lapaan, jolloin siinä työskentelevän henkilön on helpompi tarkkailla työtapahtumaa ja korin asemaa lavan suhteen.

Pesulaitteisto kiinnitetään lisälaitteena saatavan hydraulisen vinssin kiinnikkeisiin. Jos laitteistolle tarvitaan lisätukea, sitä voidaan ottaa työkorin kaiteista. Tukea otettaessa tulee kuitenkin varmistaa, että kaiteet kestävät kuorman ja eivät vaurioidu. Kaiteiden kestävyys on tärkeää ottaa huomioon etenkin levitettävää työkoria käytettäessä, jolloin kaiteiden tulee päästä liikkumaan korin levityksen aikana.

Laitteisto otetaan käyttöön ajamalla varsisto ja työkori tuulivoimalan lavan juureen sen keskilinjalle. Sen jälkeen koria käännetään korikäännöllä ja laitteisto ajetaan lavan sivulle. Kun kori on oikeassa asemassa, aloitetaan pesuaineen levitys ja pesu.

Pesulaitteiston rakenne koostuu pesuriosasta, joka on jaettu kahteen hydraulisyylinterillä käytettyyn jaksoon ja erilliseen harjapesuriin. Harjapesuria ohjataan paine-anturilla samoin kuin muissakin työkoreissa. Ensimmäisen ja toisen jakson hydraulisyylinterien ohjaus toteutetaan jaksoihin sijoitettujen laser-anturien antamien tietojen perusteella. Anturit ohjaavat myös veden syöttöä ja estävät veden pääsyn alueille, joille sitä ei tarvita. Kuljetusasennossa laitteisto sijoittuu työkorin eteen. Ohjausrakenne on vedetty kasaan ja pesurakenne taiteltu nivelien varassa nippuun.

Laitteisto vaatii pesulaitteiston lisäksi korkeapainepumpun jalustaan ja 5/8 ” putkiston varsistoon, jos se asennetaan jo käytössä oleviin työkoreihin.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tuloksina saadut työkorit ovat vasta luonnostelmia. Toteutusvaihtoehtoja koreille, pesureille ja tarkastuslaitteistoille on lukuisia, ja niistä toimivimmat voidaan todeta parhaiten käytännön testeillä. Laitteistoa suunniteltaessa olisi hyvä pohtia myös asiantuntijapalveluiden käyttämistä esimerkiksi pesu- ja konenäkösuunnittelussa.

Käytännöllisin tapa lähestyä korin ja pesulaitteiston lopullista rakennetta olisi toteuttaa laitteisto ensin mahdollisimman yksinkertaisesti. Automatiikkaa ja muita lisälaitteita lisättäisiin vasta, kun pesu- ja pinnantarkastussovellus toimisivat ongelmitta. Jos laitteistoon pyritään heti aluksi käyttämään useita eri komponentteja ja niiden sovelluksia, voi lopputuloksena olla paljon ongelmia. Työkori on laaja kokonaisuus osia ja rakenteita. Suuressa kokonaisuudessa laitteiden ongelmat voivat kertautua ja ne voivat myös vaikuttaa toisiinsa. Tällöin yksittäisen ongelman ratkaiseminen voi aiheuttaa tilalle vain uuden ongelman.

Yksinkertaiseen toimivaan sovellukseen on helpompi lisätä laitteita ja toiminnallisuuksia. Jos uudessa kokoonpanossa havaitaan ongelmia, on ne helppo paikallistaa viimeksi lisättyyn laitteeseen tai toimintoon. Periaatteena olisi tutkia, mitkä ratkaisut toimivat ja jatkokehitettää tuotetta siitä eteenpäin.

Edellytyksenä pesulaitteiston toimintavarmuudelle ja pesun hyvälle lopputulokselle on perusteellinen testaus. Laitteissa on paljon muuttujia, joten testaus on välttämätöntä parhaiten yhteensopivien komponenttien ja rakenteiden selvittämiseksi.

Laitteistoa testattaessa tulisi pohtia ainakin seuraavia asioita:

Pesutapahtuma ja puhdistustulos

- Millaisella suutinmallilla, suuttimien kulmilla, peittoalueilla ja suutinten etäisyyksillä pestävästä pinnasta pesu toimii parhaiten?
- Millä käyttöpaineella ja tilavuusvirralla saadaan paras pesutulos?
- Mitä pesuaineita ja vahoja lavan puhdistamiseen saa käyttää ja mitkä pesuaineet ja vahat toimivat parhaiten lavan pinnalla?
- Millaisella harjalla ja harjamateriaalilla saavutetaan paras puhdistustulos?
- Kuinka vedenkulutus saadaan mahdollisimman pieneksi?

Pinnantarkastuslaitteisto ja vaurioiden havaitseminen

- Millaisella kameramallilla saavutetaan paras tarkastustulos ja millä toimintaetäisyydellä kamera toimii parhaiten? Sekoittuvatko lika ja virheet toisiinsa?
- Millaisella valaistuksella saavutetaan paras tarkastustulos kaikissa käyttöolosuhteissa?
- Kuinka kameralle saadaan stabiili käyttöympäristö?

Työkorin, ohjausosan ja pesuriosan rakenne yleisesti

- Kuinka rakenteet sijoittuvat nostimeen laitteen käytön ja kuljetuksen aikana?
- Kuinka rakenteita ohjataan? (Esimerkiksi tuulisella säällä lavan muotoa seurattaessa)
- Kuinka rakenteiden ohjaus sykronoidaan, jotta ne toimivat keskenään saumattomasti?
- Millä materiaaleilla saavutetaan parhaat lujuus-, korroosiokesto- ja paino-ominaisuudet?

Muita asioita

- Kuinka laite toimii poikkeus- ja vaaratilanteissa?
- Kuinka valmistuskustannukset saadaan pidettyä mahdollisimman alhaisina?

5.1 Työkorien vertailu

Seuraavissa kappaleissa käsitellään lyhyesti työkorien hyviä ja huonoja puolia sekä mahdollisesti parasta jatkokehitykseen sopivaa ratkaisua.

Työkori 1 (ei jatkokehitetä)

Työkorin 1 rakenne on yksinkertainen ja varmatoiminen. Korin valmistuskustannukset ovat vähäiset ja lapa on nopea huoltaa. Laitteisto on kuitenkin hyvin suuri ja vaatii

paljon tilaa. Lisäksi tuulivoimalan lavat eivät välttämättä kestä mekaanisten raja-antureiden käyttöä.

Työkori 2 (ei jatkokehitetä)

Työkörin 2 pesulaitteisto on turvallinen käyttää, koska raja-antureina käytetään lasermittareita. Pesu lavan molemmilta puolilta nostaa kuitenkin laitteiston valmistuskustannukset liian suuriksi, koska antureita ja ohjelmistoa tarvittaisiin paljon. Myös työkörissa 2 laitteisto on suurikokoinen ja vaatii paljon tilaa.

Työkori 3

Työkörin 3 rakenne on yksinkertaisempi kuin työkörin 2 ja vaatii vähemmän antureita ja ohjelmistoa. Tämän vuoksi myös sen valmistuskustannukset jäävät vähäisemmiksi kuin työkörin 2. Laitteisto on kuitenkin selvästi työkoria 2 hitaampi, koska sillä puhdistetaan lavasta vain yksi puoli kerrallaan. Lisäksi laitteen suuri koko vie kuljetusasennossa paljon tilaa.

Työkori 4

Työkörin 4 rakenne on yksinkertainen ja lyhyemmällä ohjausrakenteella varustettuna se on helpompi toteuttaa kuin pitkällä ohjausrakenteella varustetut työkorit. Lyhyt ohjausrakenne on kuitenkin tuulen kompensoinnin kannalta huonoin ratkaisu. Lisäksi työkoria tulee ajaa käsikäytöllä. Laitteisto sopii kuitenkin pieneen tilaan ja on helposti jälkiasennettavissa jo myytyihin työkoreihin.

Yhteenveto

Suunnitelluista työkoreista korien 1 ja 2 jatkokehitys lopetettiin. Syynä tähän olivat työkörin 1 mekaaniset raja-anturit, joita tuulivoimalan lavat eivät mahdollisesti kestä, ja työkörin 2 korkeiksi nousevat valmistuskustannukset.

Taulukossa 11 on esitetty työkorien tärkeimmät erot.

TAULUKKO 11. Työkorien tärkeimmät erot

	Ohjausrakenne (Pitkä/Lyhyt)	Raja-anturit (Optiset/Mekaaniset)	Toiminta (Autom./Käsi käyttö.)	Automaatiotaso (Korkea/Matala)	Jatkokehitys (Kyllä/Ei)
Työkori 1	Pitkä	Mekaaniset	Automaattinen	Matala	Ei
Työkori 2	Pitkä	Optiset	Automaattinen	Korkea	Ei
Työkori 3	Pitkä	Optiset	Automaattinen	Korkea	Kyllä
Työkori 4	Lyhyt	Optiset	Käsi käyttöinen	Matala	Kyllä

Jatkokehitykseen soveltuisi parhaiten työkoriin jälkiasennettava laitteisto (työkori 4). Laitteisto olisi käytännön toteutuksen kannalta halvin ja yksinkertaisin toteuttaa. Laitteiston jatkokehitys ja valmistus maksavat vähemmän kuin kokonaan uuden työkorin ja siihen kuuluvien laitteistojen kehittäminen ja valmistaminen.

5.2 Pohdinta ja kehittämisideat

Työn tavoitteet saavutettiin projektin aikana pääosin hyvin. Esiselvitys ja tiedonhaku vaativat odotettua suuremman osan projektiin käytettävästä ajasta, joten työkorien esisuunnitelmien laatimiseen käytettävää aikaa jouduttiin lyhentämään. Tämän vuoksi työkorien esisuunnitelmista tuli ajateltua suppeampia. Tiedonhaun tuloksena saatiin kuitenkin laaja selvitys työkorien suunnittelussa ja valmistuksessa huomioitavista asioista, jotka helpottavat tuotteen jatkokehitystä. Esiselvitykseen käytettävän ajan kasvamisesta huolimatta projekti pysyi kokonaisuudessaan hyvin aikataulussa. Työmäärältään projekti oli sopiva.

Ennen kuin työkorin toteutus on käytännössä mahdollista, vaativat työkorien kaikki osa-alueet paljon jatkokehitystä. Vedenkulutuksen minimoiminen on hyvin tärkeä osa laitteiston jatkokehitystä. Tämän vuoksi yhtenä jatkokehityskohteena voisi tutkia vaihtoehtoisia pesumenetelmiä. Vaihtoehtoisina menetelminä voisivat olla esimerkiksi kuivajää-, höyry-, sooda- tai ultraäänipesu sekä niiden erilaiset sovellukset. Pesumenetelmiä kehittämällä voitaisiin vähentää pesuun tarvittavan veden määrää ja mahdollisesti poistaa veden tarve kokonaan. Lisäksi eri pesumenetelmät saattavat osoittautua puhdistusteholtaan paremmiksi kuin perinteinen vesipesu.

Pinnantarkastukseen jatkokehityskohteena voisi olla esimerkiksi NDT-menetelmien (Non-Destructive Testing) hyödyntäminen lavan tarkastuksessa. Tarkasteltavia menetelmiä voisivat olla esimerkiksi lavan tutkiminen ultraäänen tai röntgensäteilyn avulla tai radiografisella mittauksella. NDT-menetelmillä kyettäisiin havaitsemaan lavan sisäiset vauriot, joita normaalilla kamerakäytöllä ei huomata. NDT-menetelmät eivät vaurioita tarkastettavan lavan pintaa.

Suunniteltujen pesulaitteistojen rakenteet tehtiin joko neliö- tai putkiprofiillista, jotka taiteltiin kasaan nivelien varassa. Rakenteiden jatkokehityskohteena voisivat olla esimerkiksi erilaiset teleskooppirakenteet sekä niiden soveltaminen laitteistoon. Teleskooppiratkaisu voisi säästää tilaa kuljetusasennossa ja helpottaa laitteiston ohjausta nostimen käytön aikana.

Nykyiset laitteistot pakataan kuljetusasentoon työkorin ulkopuolelle, jossa ne vievät tällä hetkellä liian paljon tilaa. Sen vuoksi jatkokehitystä voisi soveltaa myös laitteiston kuljetusasentoon pakkaamisen osalta. Työkorissa on kuljetuksen aikana paljon tarpeetonta tilaa, joten yhtenä vaihtoehtona voisi tutkia laitteiston pakkaamista korin sisään.

LÄHTEET

Bronto Skylift Oy Ab. 2010. *HLA brochure* [verkkodokumentti]. Bronto Skylift Oy Ab [viitattu 25.2.2011]. Saatavissa:

<http://www.bronto.fi/brochurebankview.aspx?id=76&s=1>

Bronto Skylift Oy Ab. 2010. *XDT brochure* [verkkodokumentti]. Bronto Skylift Oy Ab [viitattu 25.2.2011]. Saatavissa:

<http://www.bronto.fi/brochurebankview.aspx?id=84&s=1>

Jain, P. 2011. *Wind Energy Engineering*. New York: The McGraw-Hill Companies.

Ministry of Science and Technology, Department of Technical and Vocational Education. *Sample Questions & Worked Out Examples For ME-05019 COMPUTER APPLICATIONS IN MECHANICAL ENGINEERING II* [Verkkodokumentti]. Ministry of Science and Technology [viitattu 9.3.2011]. Saatavissa:

http://www.most.gov.mm/techuni/media/ME05019_QA.pdf

Motiva Oy & Suomen tuulivoimayhdistys ry. 2009. *Tuulivoima Suomessa ja maailmalla* [verkkosivu]. Motiva Oy [viitattu 9.3.2011]. Saatavissa:

http://www.tuulivoimatieto.fi/suomi_maailma

Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S. & Öistämö, J. 2005. *Tekniikan kaavasto*. 5. uudistettu painos. Hämeenlinna: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.

Outinen, H., Salmi, T. & Vulli, P. 2007. *Lujuusopin perusteet*. Tampere: Pressus Oy.

Odgaard, P.F., Damgaard, C. & Nielsen, R. 2009. *Detection of the Need for Wind Turbine Blade Cleaning* [verkkodokumentti]. Europe's premier wind energy event Ewec [viitattu 9.3.2011]. Saatavissa:

http://www.ewec2009proceedings.info/allfiles2/35_EWEC2009presentation.pdf

Patel, M.R. 2006. *Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation*. Second edition. Boca Raton, FL : CRC Press, Taylor & Francis Group.

Spraying Systems Co. 2010. *Industrial Spray Products, Catalog 70-M*.

The Engineering Toolbox. *D'Arcy-Weisbach Equation for Pressure and Head Loss* [verkkosivu]. The Engineering Toolbox [viitattu 9.3.2011]. Saatavissa:

http://www.engineeringtoolbox.com/darcy-weisbach-equation-d_646.html

Vestas Wind Systems A/S. 2010. *General Specification V80-2.0 MW GridStreamer™*.

World Wind Energy Association WWEA. 2010. *World Wind Energy Report 2009* [verkköjulkaisu]. World Wind Energy Association WWEA [viitattu 9.3.2011]. Saatavissa:

http://www.wwindea.org/home/images/stories/worldwindenergyreport2009_s.pdf

www.savonia.fi

